

Génération active des déplacements d'un véhicule agricole dans son environnement

Philippe Delmas

▶ **To cite this version:**

Philippe Delmas. Génération active des déplacements d'un véhicule agricole dans son environnement. Sciences de l'environnement. Doctorat Electronique et systèmes, Université Blaise Pascal, Ecole doctorale SPI Clermont-Ferrand, 2011. Français. NNT : . tel-02595945

HAL Id: tel-02595945
https://hal.inrae.fr/tel-02595945

Submitted on 15 May 2020

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

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

N° d'ordre : 2110
EDSPIC : 515

UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL - CLERMONT II

ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

Thèse

Présentée par

Pierre DELMAS

pour obtenir le grade de

Docteur d'Université

Spécialité : Electronique et Systèmes

Génération active des déplacements d'un véhicule agricole dans son environnement

Soutenue publiquement le 24 février 2011 devant le jury :

M. Abderrafiâa KOUKAM	Président
Mme. Véronique CHERFAOUI	Rapporteur
M. Simon LACROIX	Rapporteur
M. Christophe DEBAIN	Examinateur
M. Roland LENAIN	Examinateur
M. Roland CHAPUIS	Directeur de thèse

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Résumé

Dans ces travaux, nous proposons un système de guidage automatique pour la navigation sûre d'un robot mobile dans un monde ouvert. Le principe est de contrôler la direction et la vitesse du véhicule afin de préserver son intégrité physique et celle de son environnement. Cela se traduit par la généralisation du concept d'obstacle permettant d'estimer l'espace de vitesses admissibles par le véhicule en fonction de la surface de navigation des capacités du véhicule et de son état. Afin d'atteindre cet objectif, le système doit pour chaque itération : 1) fournir à la tâche de perception une zone sur laquelle elle devra focaliser son attention pour la reconstruction de l'environnement ; 2) générer des trajectoires admissibles par le véhicule ; 3) estimer le profil de vitesse admissible pour chacune d'entre elles ; 4) pour finir, sélectionner la plus optimale par rapport à un critère prédéfini. Des résultats simulés et réels permettent d'analyser les performances obtenues du système face à des scénarios divers.

Mots clefs : guidage automatique, robot non-holonome, préservation de l'intégrité physique, génération de trajectoire, système cognitif, transfert de charge, stabilité.

Abstract

In this work, we propose an automatic guidance system for safe navigation og a mobile robot in an open environment. The principle is to control the direction and speed of the vehicle to preserve its physical integrity and that of its environment. That results in the generalization of obstacle's concept to estimate the admissible speed space of the vehicle based, on the surface navigation the capabilities of the vehicle and its state. To accomplish this objective, the system has to : 1) provide to the perception task an area on which it can focus its attention to build the environment, 2) generate trajectories eligible by the vehicles ; 3) estimate the admissible speed profile for each of them, 4) finally, select the most optimal with respect to a predefined criterion. Simulated and real results show the performance of the system obtained against various scenarios.

Keywords : automatic guidance system, non holonomic robot, physical integrity preservation, trajectory generation, cognitive system, load transfert, stability.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Remerciements

Bien que cette partie soit en début de mon manuscrit, elle conclut cependant un peu plus de trois années de travail réalisées au sein du Cemagref de Clermont-Ferrand (dirigé par Anne Rizand) avec l'étroite collaboration du LASMEA (dirigé par Michel Dhome). Ces deux établissements me proposèrent un cadre de recherche confortable et des moyens techniques de qualités, je leurs adresse mes sincères remerciements. Je souhaite remercier Simon Lacroix, Veronique Cherfaoui pour avoir rapporté mes travaux ainsi que Abderrafiâa Koukam (président du jury) et tout le jury présent lors de la soutenance. Leur intérêt pour mes travaux ainsi que les échanges scientifiques lors de ma soutenance fut très enrichissantes. De plus, je tiens à remercier le conseil Régional d'Auvergne ainsi que le Cemagref pour le financement de cette thèse.

La première personne que je voudrais évoquer est sans nulle doute Christophe Debain. Bien que j'ai souvent discuté ces directives, il m'aurait été impossible de réaliser un travail de cette qualité sans son sens de l'applicatif et son expérience. En effet, il fut toujours prêt à retrousser ses manches et sortir sa boite à outils lorsque la situation l'exigeait et pour le remercier comme il se doit, je tenais à passer une annonce. Ayant eu l'occasion de partager son bureau, je lui recommande d'embaucher une secrétaire vu le nombre de coups de fils reçus dans une journée.

Je souhaite remercier profondément Roland Chapuis mon directeur de thèse. Je me souviens des débuts difficiles, où à chaque fois que l'on se rencontrait je finissais par lui devoir plusieurs bountys. Malgré un emploi du temps digne d'un ministre, il fut toujours disponible lors des moments cruciaux de ma thèse. Ses conseils avisées et son idéologie ont été pour moi une source d'inspiration et un exemple à suivre. Encore une fois, Merci.

Je souhaite remercier tout le personnel du Cemagref pour leur accueil chaleureux dans cet établissement. Notamment, Emmanuel Hugo chef de l'unité TSCF qui a eu confiance en moi pour la réalisation de mes travaux. Mais aussi, les membres de l'équipe TEAM (anciennement MOBITECH) avec Roland et Nicolas que je n'ai pas réussi à battre à la pétanque ; Christophe avec qui j'ai partagé pas mal de galère sur Aroco ; Eliane mon indic dans le monde obscur de l'administration ; Michel, animateur de l'équipe, qui fut toujours présent dans les nombreuses manifestations réalisées ; ainsi que les autres : Philippe, Thierry, Bernard, Oliver, Mathieu, et Pierre.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Je remercie aussi tout le personnel du LASMEA avec qui j'ai eu l'occasion de travailler. Mais plus particulièrement Damien, Thomas, Guillaume et Maxime qui font tous partie du même bureau. Durant ma thèse, on aurait pu l'appeler le bureau des pleurs où l'on va pour vider son sac et faire un break. Je leurs souhaite profondément la réussite pour la suite de leurs travaux.

Il me serait impossible de ne pas remercier Florent mon partenaire de galère. Florent est le seul type que je connaisse capable de lire une image directement par la matrice sans la décoder. Je qualifierai Florent comme un modeleur de vide, un destructureur d'intemporalité tant sa recherche de la perfection d'un point de vue scientifique et technique est aboutie. Nos discussions scientifiques et humaines ont été très enrichissantes et ont révélé un atout indéniable pour la réalisation de ces travaux. Ce fut pour moi un véritable plaisir de travailler avec lui. Pour finir Florent, je reprendrais la célèbre réplique de Clint Eastwood : "Florent, tu vois le monde se divise en deux catégories ce qui ont fini leur thèse et ceux qui écrivent leur manuscrit toi tu écris". Courage, tu as bientôt fini.

Pour finir, je remercie mes amis qui m'ont permis de souffler un peu lors cette thèse et m'ont soutenu lors des moments épineux. Je remercie aussi ma famille a qui je n'ai pas pu rendre beaucoup de visites durant ces années mais qui m'ont toujours suivi dans les choix que j'ai réalisés. Je tenais à leur dire que : "Promis maintenant que je suis à Bac + 8, j'arrête les études". Lors de cette période, j'ai eu le malheur de perdre un oncle et une tante. Pour François et Françoise, je n'oublierais pas les moments passés avec vous.

Mes remerciements étant trop long et la vie étant trop courte, je conclurais donc en dédiant ces travaux à tout les moments heureux que j'ai passé avec chacun et espère en passer encore beaucoup d'autres.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Table des matières

1 Introduction Générale **1**

1.1 Présentation des systèmes de guidage automatique en monde ouvert 2

1.2 Contexte 5

1.2.1 Objectifs à atteindre pour le système 5

1.2.2 Contraintes du système 6

1.3 Contributions 7

1.4 Organisation du mémoire 7

2 Problématique - Comment assurer l'intégrité physique d'un véhicule ? **9**

2.1 Les différentes méthodes de préservation d'intégrité physique du véhicule 9

2.1.1 Les méthodes d'évitement réactif d'obstacles 9

2.1.2 Méthodes de prévention du renversement d'un véhicule 15

2.1.3 Méthodes basées sur la traversabilité du terrain 17

2.1.4 Bilan 19

2.2 Méthodologie proposée 19

2.2.1 Introduction 19

2.2.2 Vers une approche globale 20

2.3 Objectif des travaux 22

3 Méthode proposée pour préserver l'intégrité physique d'un véhicule évoluant dans un monde ouvert **23**

3.1 Espace des vitesses admissibles 23

3.2 Zone d'intérêt 26

3.2.1 Notion d'intégrité de navigation 27

3.2.2 Capacités de mobilité du véhicule 30

3.2.3 Zone d'intérêt finale 32

3.3 Génération de trajectoires 33

3.3.1 Motivations 33

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.3.2 Modélisation cinématique du véhicule 34
3.3.3 Commande quadratique optimale finie d'ordre N . . . 36
3.3.4 Générateur de trajectoires parallèles 40
3.3.5 Conclusions sur la génération de trajectoires 42
3.4 Profil de vitesse admissible 43
3.4.1 Grille d'élévation 44
3.4.2 Posé de robot 47
3.4.3 Filtrage des évolutions du tangage et du roulis grâce à la prise en compte des suspensions 47
3.4.4 Conditions de stabilité : Transfert de Charge 51
3.4.5 Détermination du profil de vitesse 52
3.4.6 Admissibilité du profil par rapport aux capacités du véhicule 53
3.4.7 Conclusion 55
3.5 Sélection de la stratégie de commande optimale 55
3.5.1 L'écart latéral : $A_{Ec_{LAT}}$ 56
3.5.2 L'écart vitesse : $A_{Ec_{VIT}}$ 56
3.5.3 Dépense Energétique : J_{effort} 56
3.6 Conclusion 58

4 Analyse du comportement du véhicule dans un environnement simulé 59
4.1 Présentation de notre simulateur 59
4.1.1 Motivations 59
4.1.2 Modélisation du véhicule 60
4.1.3 Limites du simulateur 63
4.2 Résultats avec une localisation du véhicule et une reconstruction du monde parfaites 63
4.2.1 Scénario n°1 : déplacement du véhicule sur un sol plat . 63
4.2.2 Scénario n°2 : Sol plat avec des obstacles infranchissables le long de la trajectoire de référence. 67
4.2.3 Scénario n°3 : Sol plat avec des obstacles franchissables à vitesse faible le long de la trajectoire de référence. . . 70
4.2.4 Bilan des scénarios présentés 72
4.3 Résultats avec une localisation et une reconstruction du monde réelles 74
4.3.1 Présentation du système de perception 74
4.3.2 Scénario 1 : sol plat 76
4.3.3 Scénario 2 : Un sol plat avec un obstacle infranchissable 79
4.4 Conclusion 82

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

5 Expérimentations avec un véhicule réel 83
5.1 Dispositif expérimental 83
5.1.1 Le véhicule AROCO 83
5.1.2 Les capteurs 83
5.1.3 Identification des paramètres utiles pour l'expérimentation 85
5.1.4 Protocoles d'expérimentation 89
5.2 Résultats obtenus 90
5.3 Conclusion 97

6 Travaux en cours - Perpectives 99
6.1 Représentation continue de l'environnement 99
6.2 Une loi de commande chainée exacte 101
6.3 Une génération de trajectoires basée sur un tirage aléatoire de la commande 104
6.4 Utilisation d'un véhicule virtuel 105

Conclusion 107

A Etude Dynamique Véhicule 111
A.1 Transfert de charge Latéral 111
A.1.1 Présentation du modèle et des repères associés 111
A.1.2 Etude dynamique pour le cas latéral 112
A.2 Transfert de charge Longitudinal 118
A.2.1 Présentation du modèle et des repères associés 118
A.2.2 Etude dynamique pour le cas longitudinal 119

Bibliographie 127

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Table des figures

1.1 Vue d'artiste d'un rover MER à la surface de Mars 3
1.2 Les deux véhicules vainqueurs du concours organisé par DARPA en 2005 et 2007. 4
1.3 Un des véhicules Overland qui a réalisé 13000km en totale autonomie 4
1.4 Le véhicule expérimental RobuFAST 5
1.5 Contexte de ce mémoire 6

2.1 Principe de la méthode de Champs de Potentiel 10
2.2 Principe de la méthode du Vector Field Histogram (VFH) . . 11
2.3 Principe de la méthode Curvature-Velocity 12
2.4 Principe de la méthode des diagrammes de proximité 13
2.5 Véhicule léger tout-terrain du Cemagref utilisé pour l'évaluation des risques de renversement (Quad Massey Fergusson MF400H) 16
2.6 Les deux approches 20
2.7 Gestion des ressources du système 21

3.1 Illustration de la caractérisation de l'environnement en vitesse admissible 24
3.2 Présentation des différentes étapes de notre système 25
3.3 Passage d'un contexte global vers un contexte local (avec le cap précis) selon trois hypothèses de localisation (H1, H2 et H3) . 28
3.4 Passage d'un contexte global vers un contexte local (position précise) selon trois hypothèses de localisation (H1, H2 et H3) . 29
3.5 Zone d'attention en fonction des capacités de mobilité du véhicule 32
3.6 Zone d'attention finale du système 33
3.7 Modèle Cinématique du véhicule 34
3.8 Détermination de la commande du véhicule 36
3.9 Différentes prédictions de la trajectoire parallèle à celle de référence d'écart latéral $\Gamma = 2m$ en fonction des valeurs de minimisation de l'écart angulaire S_θ 41

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

3.10 Différentes prédictions de la trajectoire pour un échelon de $\Gamma = 2m$ . . . 43
3.11 Evolution de l'angle de braquage δ pour différentes valeurs de R_c 44
3.12 Résultat obtenu pour la génération de 21 trajectoires parallèles à celle de référence . . . 45
3.13 Illustration du filtrage du MNT par rapport à la roue du véhicule 46
3.14 Schéma du véhicule et de ses suspensions pour établir le modèle du filtre en tangage . . . 48
3.15 Résultats du filtre pour différentes vitesses d'évolution du véhicule 52
3.16 Profil de vitesse pour franchir une marche et le calcul de la vitesse instantanée pour deux hypothèses de V_0 . . . 54
3.17 Illustration du terme $A_{Ec_{LAT}}$ pour trois trajectoires générées . 57
3.18 Illustration du terme $A_{Ec_{vit}}$ pour quatre trajectoires générées . 57

4.1 Détermination des angles des différentes roues . . . 61
4.2 Réponse à un échelon de la consigne V^c de la fonction d'évolution de V . . . 62
4.3 Détermination des vitesses des différentes roues . . . 62
4.4 Vue de dessus du circuit . . . 64
4.5 La trajectoire de référence ainsi que les différentes parties étudiées 64
4.6 Résultats obtenues sur la partie B du circuit . . . 65
4.7 Choix de la trajectoire optimale pour le système sur la partie A du circuit . . . 66
4.8 Capture d'image du simulateur au cours du scénario n°2 . . . 67
4.9 Situation et résultats par rapport à la navigation entre des éléments infranchissables . . . 68
4.10 Evolution des états des trajectoires générées et le choix sélectionné pour l'évitement du premier élément infranchissable . . 69
4.11 Evolution des états des trajectoires générées et le choix sélectionné pour l'évitement du cinquième élément infranchissable . 70
4.12 Evolution des états des trajectoires générées et le choix sélectionné pour l'évitement du dernier élément infranchissable . . 71
4.13 Situation et résultats par rapport à la navigation entre des éléments franchissables à faible vitesse . . . 72
4.14 Espace de vitesse admissible construites à partir des trajectoires générées pour l'itération 125 . . . 73
4.15 Taux des critères des différentes trajectoires pour l'itération 125 73
4.16 Présentation algorithme de perception utilisé . . . 74
4.17 Comparaison entre les profils de vitesse obtenus pour le franchissement d'une marche de $15cm$ . . . 75

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.18 Conséquence du bruit de la grille d'élévation sur le profil de vitesse sans les suspensions 77
4.19 Variation du tangage avec la prise en compte des suspensions pour différentes vitesse d'évolutions 78
4.20 Espace des vitesses admissibles obtenu avec la prise en compte des suspensions 79
4.21 Effet de la contrainte de la perception sur le lacet pour les profils de vitesse admissible 80
4.22 Vue locale du MNT fourni par la tâche de perception lors du contournement de l'obstacle 81
4.23 Trajectoire réalisée lors du contournement d'un obstacle 81

5.1 Le véhicule AROCO lors du symposium ROBOTICS 2010 . . 84
5.2 Le capteur caméra - télémètre 85
5.3 Réponse de l'angle de braquage ayant un échelon comme entrée 86
5.4 Réponse de la vitesse du véhicule par un échelon comme entrée 87
5.5 Calcul de l'admissibilité d'un profil de vitesse avec un retard pur de la commande en vitesse de 400ms 88
5.6 Comparaison des trajectoires générées entre notre logiciel de simulation et le cas réel 89
5.7 Présentation de l'expérimentation réelle sur le site du Cemagref (Aubière) 90
5.8 Grille d'élévation brute provenant de la tâche de perception avant le ralentisseur 92
5.9 Grille d'élévation filtrée provenant de la tâche de perception avant la bosse 92
5.10 Profils de vitesse pour la grille d'élévation de la figure 5.9 . . . 93
5.11 Taux des critères de la situation présentée 93
5.12 Trajectoire et vitesse réalisées lors du franchissement du ralentisseur 94
5.13 Grille d'élévation filtrée après le franchissement de le ralentisseur (morphologie + lissage par filtre moyenneur) 95
5.14 Espace de vitesse admissible obtenue pour la grille d'élévation de la figure 5.13 95
5.15 Grille d'élévation filtrée avant le contournement de l'élément infranchissable 96
5.16 Espace des vitesses admissibles par le véhicule avant le contournement de l'élément infranchissable 97
5.17 Trajectoire et vitesse réalisées lors du contournement de l'élément infranchissable 97

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

6.1 Exemple de la détermination de la fonction par morceaux . . . 100
6.2 Comparaison de la grille d'élévation et de la fonction paramétrable par morceaux . . . 101
6.3 Modèle bicyclette . . . 102
6.4 Exemple de génération de 15 trajectoires avec une commande aléatoire simple . . . 104

A.1 Modèle utilisé pour le calcul de transfert de charge latéral . . . 112
A.2 Modèle utilisé pour le calcul de transfert de charge longitudinal 119

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 1

Introduction Générale

Depuis de nombreuses années, on constate d'importantes avancées technologiques et scientifiques pour la réalisation de véhicules terrestres entièrement **autonomes**. Ceci passe par la recherche de solutions à un ensemble de challenges non encore tous résolus. En effet, la complexité est liée à la nécessité de considérer différents domaines dont les principaux axes peuvent s'exposer de la forme suivante. Le premier est directement lié au comportement du véhicule. En effet, quelle que soit la tâche à réaliser, il doit être en mesure de contrôler sa direction et sa vitesse pour réaliser en toute sécurité une tâche bien précise, comme par exemple suivre au mieux une trajectoire prédéfinie par un opérateur. Le deuxième grand axe consiste à localiser le véhicule par rapport à un référentiel précis. Ce référentiel peut être local, par rapport à son environnement proche, comme il peut être absolu en étant lié à un référentiel terrestre. Il permettra par exemple d'évaluer l'erreur du véhicule lors d'un suivi d'une trajectoire préalablement définie.

Ces deux grands axes forment une base pour le développement de systèmes de guidage automatique. Cependant, ils sont le plus souvent définis pour un contexte environnemental préalablement choisi (types de sols, environnements intérieurs, extérieurs, ...). Ils ne suffisent donc pas à prévenir de la totalité des situations que l'on peut rencontrer dans des milieux ouverts. C'est pourquoi l'interaction entre la nature de l'environnement et le véhicule est devenue un troisième axe important à considérer. Citons différents exemples comme la prise en compte du phénomène de glissement [Lenain 2003] ou l'étude d'éventuelles pertes de stabilité liée aux variations du type et de la géométrie du sol sur lequel évolue le véhicule [Bouton 2009]. Cela se traduit inévitablement par l'observation de ces perturbations et la modélisation des effets qu'elles entraînent afin d'établir une stratégie de navigation permettant de prévenir et/ou d'éviter des situations dangereuses.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans ce troisième axe et ont pour objectif la réalisation d'un système de guidage automatique intégrant les interactions du véhicule avec son environnement. Parmi ce vaste champ de recherche, nous considèrerons le maintien de l'intégrité physique d'un véhicule lié à l'absence de collisions et aux éventuelles pertes de stabilité afin de permettre une navigation rapide et sûre.

1.1 Présentation des systèmes de guidage automatique en monde ouvert

Les systèmes de guidage automatique en monde ouvert ont été majoritairement conçus à des fins militaires ou d'exploration. Prenons quelques exemples afin d'analyser brièvement leurs fonctionnalités.

Grâce aux avancées technologiques réalisées depuis ces dernières décennies, l'exploration d'autres planètes du système solaire est à portée de main. La fascination des découvertes que nous apporterait l'étude de ces planètes augmente l'intérêt du développement de véhicules autonomes. Les premiers véhicules d'explorations envoyés sur Mars étaient télé-opérés.

Cependant, la grande distance séparant le robot de l'opérateur entraînait des temps de latence importants (plus de vingt minutes) limitant ainsi la réactivité des véhicules. De plus, la dépense énergétique liée à la télé-opération entraîne des coûts non négligeables pour ces opérations d'exploration.

C'est pourquoi des recherches sont menées afin d'accroître leur capacité décisionnelle lors de leur déplacement. En effet, la réalisation d'un véhicule autonome permettrait d'améliorer la réactivité face à un potentiel danger, de focaliser les informations envoyées par le robot sur l'objet de leur expédition et ainsi d'augmenter la quantité de données utiles journalière.

Une des dernières missions que l'on peut citer à ce jour est Mars Exploration Rover (MER) de la NASA qui fut lancée en 2003 et composée de deux robots mobiles *Spirit* [Leger 2005] et *Opportunity* [Biesiadecki 2005] (voir figure 1.1) ayant pour objectif d'étudier la géologie de la planète Mars et en particulier le rôle joué par l'eau dans l'histoire de la planète. Ces véhicules sont toujours télé-opérés depuis la Terre mais sont munis de fonctionnalités leur permettant de se déplacer de manière autonome vers leur objectif. Pour la navigation, ils sont équipés de cameras stéréoscopiques qui leur permettent d'avoir la reconstruction 3D de leur environnement et ainsi évaluer la présence d'obstacles sur leur trajectoire.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Dans ce projet, du fait de la faible vitesse des véhicules, la perte de stabilité engendré par des phénomènes dynamiques n'est pas adressée.

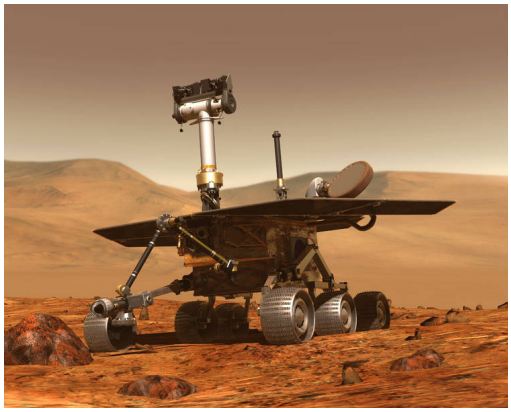


FIGURE 1.1 – Vue d'artiste d'un rover MER à la surface de Mars

Dans le domaine militaire, des véhicules autonomes sont également développés. Aux Etats-Unis, l'agence DARPA organisait en 2004 et en 2005 une compétition rassemblant de nombreuses équipes avec leur véhicule autonome (voir figure 1.2). Cette compétition consistait à parcourir un circuit d'environ 220 kilomètres à travers le désert de Mojave avec un véhicule évoluant sans intervention humaine. En 2007, cette agence organisa aussi le Urban Grand Challenge où des véhicules automatiques devaient évoluer dans un milieu urbain en s'arrêtant à des stops, en effectuant des manœuvres de parking ou en circulant au milieu d'un trafic routier important.

En Europe, on peut citer le challenge lancé par le laboratoire VisLab de l'université de Parme (Italie) où il était question de réaliser $13000km$ en trois mois entre la ville de Parme et de Shanghai (Chine) avec une intervention humaine minimale. Les véhicules (figure 1.3) équipés de télémètres lasers et de caméras devaient notamment évoluer dans la circulation des villes traversées, éviter d'éventuels piétons et ceci à une vitesse maximale allant de 50 à 60 $km.h^{-1}$. Pour cela, un véhicule de tête quasi automatique (piloté par une personne uniquement lors de changement de route et des situations critiques) servait de guide à un véhicule autonome ayant à son bord une personne en cas de défaillance du système. L'objectif de cette mission était de déterminer les situations de mise en défaut du véhicule (par exemple "queue de poisson") ainsi que les améliorations possibles à apporter pour aboutir à un système totalement autonome et fiable.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref



(a) Le véhicule Stanley (Université de Stanford) : vainqueur du DARPA Grand Challenge en 2005.



(b) Le véhicule Boss (Université Carnegie Mellon) : vainqueur du DARPA Urban Challenge en 2007.

FIGURE 1.2 – Les deux véhicules vainqueurs du concours organisé par DARPA en 2005 et 2007.



FIGURE 1.3 – Un des véhicules Overland qui a réalisé $13000km$ en totale autonomie

Le dernier exemple est le projet de recherche fondamental ANR FAST [1] (2007-2011). Il est question de concevoir un robot mobile terrestre autonome tout terrain (figure 1.4), capable de se mouvoir à haute vitesse ($10m.s^{-1}$) tout en assurant son intégrité physique. Pour cela, ce projet propose plusieurs développements ayant trait à différents axes de recherche. Le premier axe est centré sur la conception mécatronique qui consiste à proposer des dispositifs innovants permettant de modifier en ligne les caractéristiques dynamiques du robot afin de compenser les fortes perturbations auxquelles il est soumis. Le second axe concerne la synthèse de lois de commande du véhicule permettant

1. pour plus de détail voir site : https ://projetfast.cemagref.fr/

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

d'asservir les déplacements du robot dans le couloir de navigation en prenant en compte des conditions extérieures (adhérences, irrégularités du terrain, ...) tout en maintenant sa stabilité par la prédiction de situations de renversement. Le dernier axe est centré sur le développement des algorithmes de perception de l'environnement dans les conditions de déplacements à haute vitesse. Cet dernière partie a pour objectif de fournir les informations permettant la commande du robot : la posture dynamique, le transfert de charge, la détection et la caractérisation des obstacles à éviter, ainsi que la localisation.

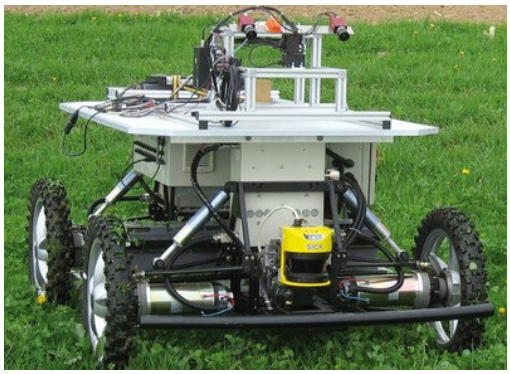


FIGURE 1.4 – Le véhicule expérimental RobuFAST

A travers ces exemples, on remarque que la problématique de la navigation sûre en milieu ouvert regroupe de nombreux domaines, et il est évident que tous les points cités auparavant ne peuvent pas être traités dans ce mémoire. C'est pourquoi il convient d'établir le contexte et les limites des travaux décrits dans ce mémoire.

1.2 Contexte

Le contexte de ces travaux concerne une partie des problématiques du projet FAST. Il s'agit de l'étude et de la conception d'un système de guidage automatique pour un véhicule terrestre évoluant dans un environnement ouvert statique en garantissant son intégrité physique (voir figure 1.5).

1.2.1 Objectifs à atteindre pour le système

Comme pour le projet FAST, il s'agit pour le véhicule de rejoindre un objectif le plus rapidement possible en suivant au mieux une trajectoire de référence tout en assurant son intégrité physique (absence de collision et de perte de stabilité). Pour cela, le véhicule a la possibilité de contourner les éléments trop dangereux, de modifier sa vitesse afin de traverser certaines

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

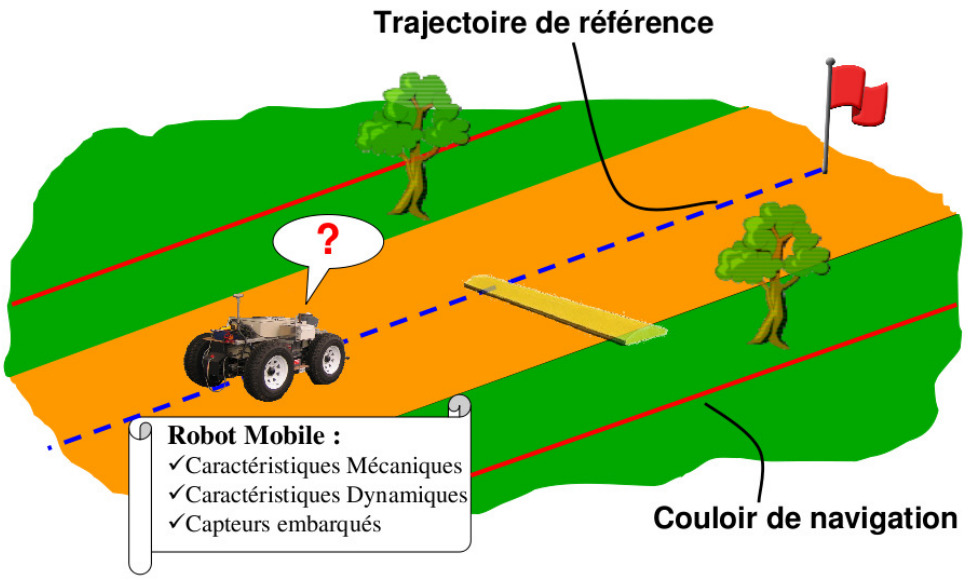


FIGURE 1.5 – Contexte de ce mémoire

irrégularités du terrain ou de s'arrêter totalement en l'absence de solutions. Afin de limiter l'écart entre le véhicule et la trajectoire, l'utilisateur délimite un couloir de navigation. Ce couloir représente la zone d'évolution possible du robot. Un exemple de notre vie de tous les jours qui illustre bien cette notion est celui de la circulation routière. En effet, un automobiliste doit normalement circuler sur la voie de droite mais il a la possibilité de dépasser un autre véhicule plus lent en se déplaçant sur la voie de gauche pour rejoindre ensuite sa voie principale de navigation (voie de droite). Le couloir de navigation est limité dans cette situation par les lignes blanches de la chaussée.

1.2.2 Contraintes du système

Le système doit établir la meilleure stratégie de commande lui permettant d'atteindre son objectif. Pour cela, il faudra considérer à la fois le véhicule avec l'ensemble de ses capacités et de ses limites mais aussi l'environnement dans lequel il évolue. Cet environnement aura une influence qu'il faut dans la mesure du possible anticiper. Nous aurons donc à établir une solution qui aura pour contraintes les caractéristiques mécaniques du véhicule (encombrement, diamètre des roues, entraxe, ...), les caractéristiques dynamiques comme la hauteur du centre de roulis, les suspensions et son inertie mais aussi ses moyens de localisation et de perception. Le véhicule sera équipé de capteurs proprioceptifs (odométrie), extéroceptifs (caméra, télémètre) et de localisa-

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

tion absolue (récepteur GPS). Grâce à ses capteurs, le système devra être en mesure de reconstruire son environnement proche et de se localiser assez précisément pour atteindre son objectif. Cette dernière partie n'est pas traitée dans cette thèse mais la prise en compte des capacités de perception et de localisation sera un élément important de ce manuscrit.

1.3 Contributions

Les contributions peuvent s'énumérer de la manière suivante :

- Une définition de la notion d'obstacle sera proposée. En effet, avant de pouvoir déterminer comment éviter un obstacle, il faut pouvoir le définir. Contrairement à des approches classiques de contournement d'obstacle où un obstacle est généralement un élément totalement infranchissable pour le véhicule, nous allons définir une notion de traversabilité : le franchissement de la zone de navigation est possible en fonction de la vitesse et de la pose du véhicule. Par exemple, un élément franchissable à faible vitesse peut devenir un obstacle à haute vitesse. Il s'agit de déterminer à quelle vitesse un élément de l'environnement devient dangereux pour le véhicule.
- Nous proposerons une méthode de génération de trajectoire basée sur des lois de commande déjà existantes. L'idée dans cette partie sera de prévoir la suite des commandes que devrait générer le système pour atteindre l'objectif. Ainsi, les trajectoires générées seront admissibles par le véhicule et permettront d'avoir directement la commande associée.
- Nous étudierons plus en détails la partie cognitive du système avec notamment les problèmes liés à la fiabilité du système de perception et de localisation. Il s'agira de déterminer le couplage existant entre la perception et le guidage en lui-même.

1.4 Organisation du mémoire

Afin de répondre à la problématique concernant la navigation sûre dans un milieu ouvert, nous proposons tout d'abord d'étudier les méthodes déjà existantes en analysant leurs avantages et inconvénients. Puis nous détaillerons la méthodologie adoptée dans ce manuscrit.

Dans le chapitre 3, nous présenterons la notion d'espace de vitesse admissible puis la structure de notre système de guidage automatique.

Le chapitre 4 sera porté sur l'analyse du comportement du système dans un environnement simulé. Il s'agira d'analyser les différents comportements

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

du véhicule face à divers scénarios simples considérés comme canoniques.

Dans le chapitre suivant, nous réaliserons l'étude du système à travers une expérimentation réelle avec notre véhicule AROCO. Nous étudierons les performances obtenues du système ainsi que ses limites.

Puis, nous consacrerons un chapitre sur les perpectives de ce travail et les améliorations possibles que l'on pourrait apporter.

Finalement, nous conclurons sur l'ensemble des travaux réalisées durant la durée de la thèse.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 2

Problématique - Comment assurer l'intégrité physique d'un véhicule ?

Dans la littérature, de nombreuses méthodes sont proposées afin de préserver l'intégrité physique d'un véhicule. La plupart de ces méthodes ne sont pas adaptées à la navigation en milieu naturel. Généralement, elles ont comme hypothèse un sol plat qui est parsemé d'éléments totalement infranchissables communément appelés obstacles. D'autres méthodes cherchent à estimer un critère définissant la perte de stabilité du véhicule. Ces méthodes sont basées sur une étude plus ou moins détaillée du comportement physique du véhicule. Aussi, dans ce chapitre, nous étudierons plus en détails ces différentes approches. Nous déterminerons leur aptitudes à être utilisées dans un système de guidage automatique. Puis, nous proposerons notre approche et la méthodologie associée pour aboutir à un système de guidage automatique plus optimal dans un environnement ouvert statique partiellement connu.

2.1 Les différentes méthodes de préservation d'intégrité physique du véhicule

2.1.1 Les méthodes d'évitement réactif d'obstacles

D'un point de vue chronologique, les premières méthodes à voir le jour ont été les méthodes d'évitement réactif d'obstacles. Elles consistent au contournement d'éléments infranchissables pour le véhicule en agissant directement sur la consigne de braquage du véhicule.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Champs de Potentiel

Introduite dans les années 80 (voir [Khatib 1980], [Khatib 1986]) pour un bras manipulateur, cette méthode consiste à construire une fonction de potentiel qui résume les objectifs de la navigation. Un obstacle représente un champ répulsif et le but à atteindre un champ attractif. Cela entraîne que pour chaque position du robot, il existe une « force » résultante des champs de potentiels qui correspond à la direction à suivre par le robot (figure 2.1). Bien que cette méthode soit purement réactive donc peu coûteuse en temps de calcul, elle est soumise au problème des minima locaux qui peuvent nécessiter une replanification globale. Un exemple du problème des minima locaux est donné par un obstacle en forme de U, une commande dépourvue d'un horizon global va se diriger vers le minimum local c'est-à-dire vers le creux de l'obstacle ce qui provoque l'arrêt inévitable du véhicule. Par ailleurs, elles peuvent entraîner un mouvement oscillatoire du robot dans certaines situations (des passages étroits par exemple).

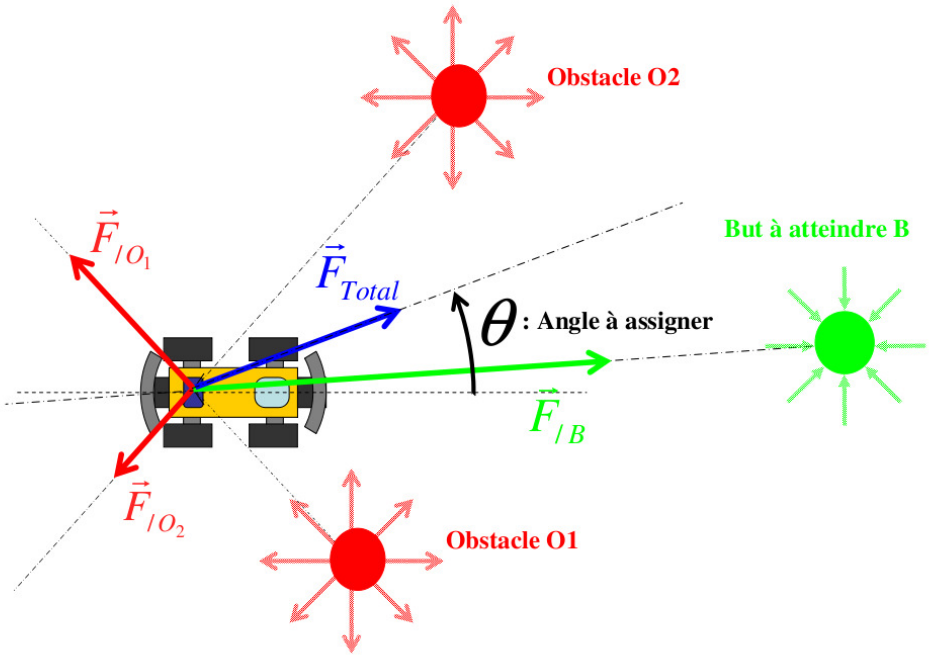


FIGURE 2.1 – Principe de la méthode de Champs de Potentiel

Vector Field Histogram (VFH)

Introduite dans [Koren 1991], il s'agit d'une méthode dérivée des champs de potentiel. Elle consiste à représenter l'espace d'évolution du robot par une

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

grille pondérée. Chaque cellule est affectée d'une valeur correspondant à la probabilité de rencontrer un obstacle. Cette valeur est appelée "certitude". Ensuite, la grille est traduite en un histogramme ayant comme abscisse la direction du robot et comme ordonnée la probabilité de percuter un obstacle en suivant cette direction. Par seuillage, il est ainsi possible d'identifier les directions libres du robot appelées passages. Une fonction de coût prenant en compte la direction du but, la direction précédemment suivie et l'orientation courante des roues permet de sélectionner un des passages et la direction correspondante (figure 2.2).

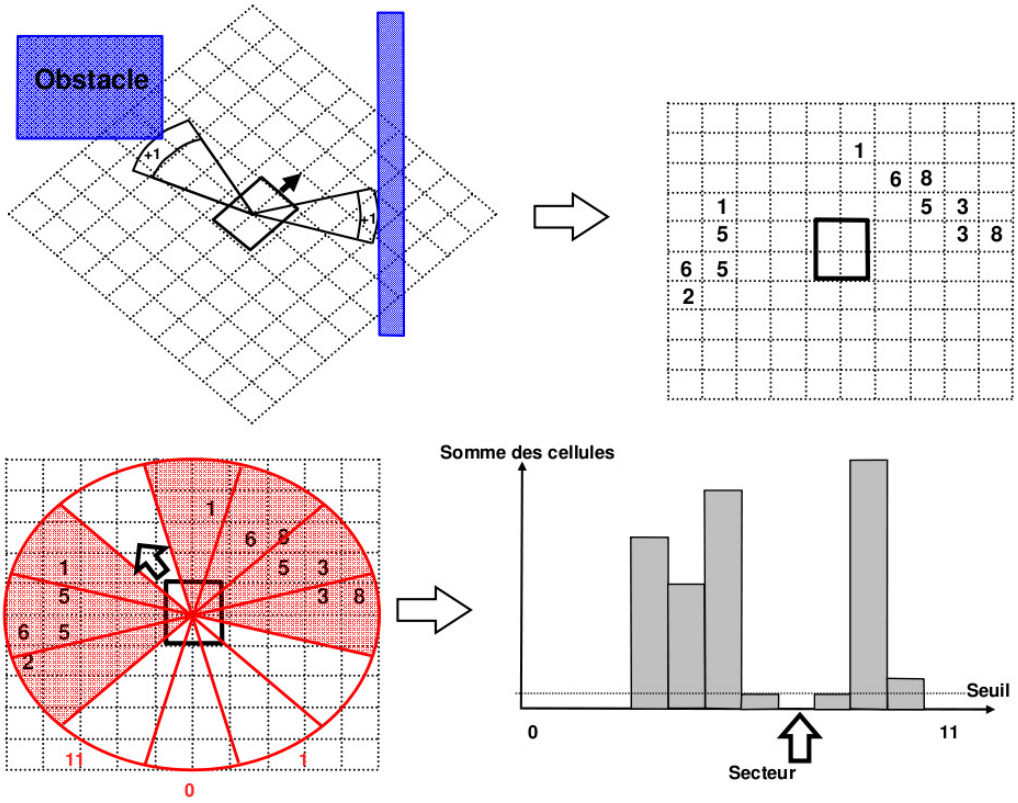


FIGURE 2.2 – Principe de la méthode du Vector Field Histogram (VFH) : *la grille d'occupation est construite dans le référentiel du robot ; un compteur est incrémenté pour chaque cellule appartenant au secteur angulaire dans lequel un obstacle a été détecté et les valeurs sont déplacées d'une cellule à l'autre en fonction des déplacements du robot. Ensuite, un histogramme des obstacles est utilisé pour déterminer la direction de déplacement du robot.*

Une version plus récente notée VFH+ [Ulrich 1998] prend en compte la largeur du robot et ses contraintes cinématiques. Un des inconvénients majeurs de l'approche est la difficulté à régler le seuil déterminant les « passages » et la difficulté à naviguer en milieu contraint (couloirs étroits). Pour remédier à

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

cela, une dernière version VFH* [Ulrich 2000] a été proposée. Elle a pour effet de limiter les situations de blocage et d'améliorer la convergence vers le but. Son principe est de calculer la trajectoire idéale en projetant la position et l'orientation du véhicule pour chaque trajectoire possible. En leur appliquant la méthode VFH+, on crée un "arbre" puis on choisit la meilleure branche grâce à une fonction de coût.

Curvature Velocity

Introduit par [Simmons 1996], la méthode de Curvature-Velocity consiste à projeter les obstacles dans l'espace de commande du véhicule c'est-à-dire du couple vitesse curviligne et vitesse de rotation du véhicule (V, ω). Ensuite, le couple de commande qui n'entraîne pas la collision du robot avec un obstacle est recherché. Pour cela, les rayons tangents aux obstacles sont calculés afin de déterminer la zone libre de commande permettant d'éviter l'obstacle à la prochaine itération (figure 2.3).

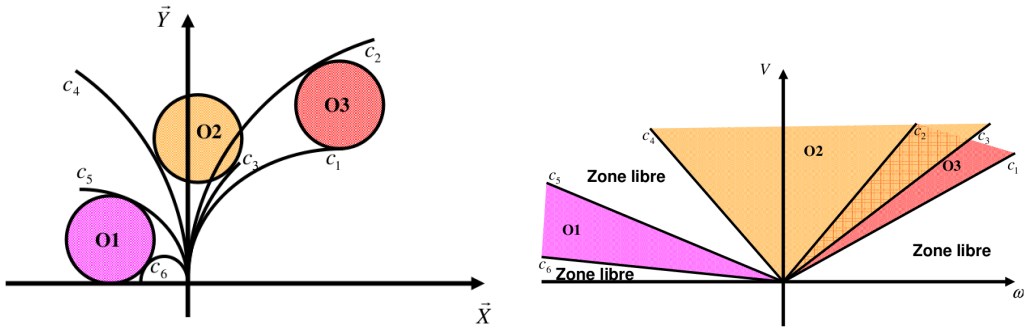


FIGURE 2.3 – Principe de la méthode Curvature-Velocity : *la première phase est la détermination des courbures qui englobent les différents obstacles ; ensuite, ces courbures sont traduites par les couples (V, ω) déterminant ainsi les zones libres.*

Fenêtre Dynamique (Dynamic Window Approach, DWA)

La méthode de la Fenêtre Dynamique [Fox 1997] permet, à partir de la perception locale de l'environnement, de sélectionner un couple (V, ω) qui correspond à la vitesse de translation et de rotation du robot. Les contraintes cinématiques et dynamiques du robot sont intégrées dans la recherche du couple (V, ω) qui permet d'éviter les obstacles. Un tel couple de vitesses, lorsqu'il est appliqué au robot, produit une trajectoire circulaire, pour laquelle la satisfaction des différentes contraintes peut être évaluée. Ces contraintes sont

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

exprimées par une fonction de coût $G(V, \omega)$. A l'issue de l'évaluation de toutes les contraintes pour tous les couples de vitesses possibles, la méthode de la Fenêtre Dynamique permet de sélectionner le couple le plus pertinent. La taille de la fenêtre des vitesses à analyser dépend des capacités d'accélération et de décélération du véhicule. Ainsi, cette méthode sera d'autant plus rapide avec un véhicule de faibles capacités. On peut remarquer que le choix de la discrétisation de l'espace des vitesses est un paramètre important. Il faut qu'il respecte les contraintes liées au temps-réel tout en étant assez fin pour déterminer un nombre suffisant de couples représentant les diverses possibilités du véhicule.

Diagrammes de Proximité (Nearness Diagram, ND)

Cette méthode introduite dans [Minguez 2000] consiste à établir deux diagrammes de proximité sous forme d'histogrammes (figure 2.4). Le premier appelé PND (Point Nearness Diagram) représente la distribution des obstacles autour du robot. Le second appelé RND (Robot Nearness Diagram) représente la même distribution mais par rapport à la zone de sécurité du robot.

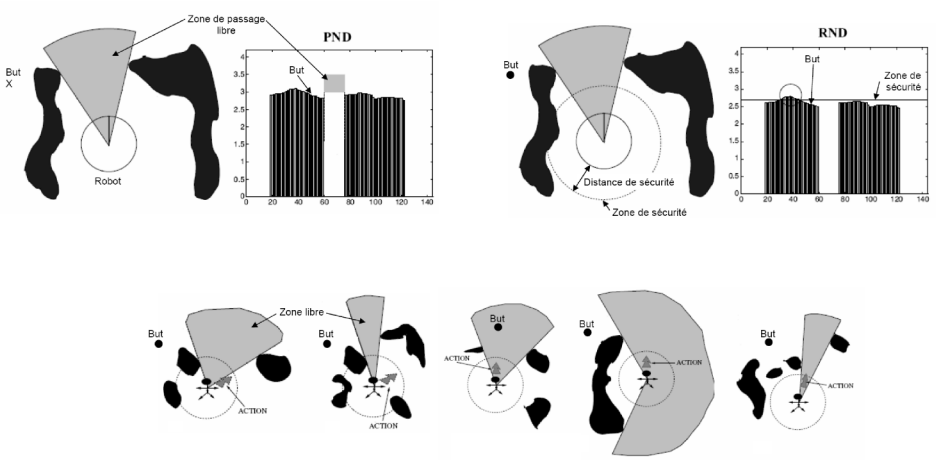


FIGURE 2.4 – Principe de la méthode des diagrammes de proximité. **Parties supérieures :** *construction des diagrammes PND et RND selon un environnement donné.* **Parties inférieures :** *types d'actions menées dans les cinq différentes situations.*

Grâce aux constructions de RND et de PND, la méthode peut analyser la situation dans laquelle il se trouve et la reconnaître parmi 5 prédéfinies. Pour chaque situation, il est défini une décision associée (illustration figure 2.4). Les 5 situations possibles sont :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

- LS1 (Low Safety 1) : au moins un obstacle est présent dans la zone de sécurité mais d'un seul coté de la région libre la plus orientée vers le but. Décision : éloigner le robot de l'obstacle mais dans la direction la plus orientée vers une région libre proche du but avec une vitesse proportionnellement inverse à la proximité de l'obstacle.
- LS2 (Low Safety 2) : plusieurs obstacles sont présents dans la zone de sécurité mais des deux cotés de la zone de passage. Décision : éloigner le robot des obstacles mais dans la direction la plus orientée vers une région libre proche du but avec la même gestion de la vitesse que dans LS1.
- HSGR (High Safety Goal in Region) : aucun obstacle n'est présent dans la zone de sécurité du robot et le but à atteindre est dans une zone de passage. Décision : diriger le robot en direction du but à la vitesse maximale.
- HSWR (Hight Safety Wide Region) : aucun obstacle n'est présent dans la zone de sécurité du robot mais le but n'est pas directement atteignable. Cependant, la zone de passage libre est large c'est-à-dire quelle représente plus d'un quart des secteurs du diagramme ($< 90^{\circ}$). Décision : choisir la direction de la zone libre appropriée qui longe l'obstacle.
- HSNR (Hight Safety Narrow Region) : Même situation que HSWR sauf que la zone de passage libre représente moins d'un quart des secteurs du diagramme ($> 90^{\circ}$). Décision : se diriger au centre de la région libre adéquate.

L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans le fait qu'il s'agit d'une méthode d'analyse de situation. Elle nécessite plus de temps de calcul, la rendant moins réactive que les précédentes.

Conclusion sur les méthodes de contournement réactives d'obstacles

Dans cette première partie de l'état de l'art, nous avons choisi de présenter seulement les grandes méthodes existantes dans ce domaine. Ces méthodes sont la base de nombreuses autres méthodes tel que [Ye 2004], [Gong 2007] par exemple. A travers ces exemples, nous avons pu appréhender la diversité existante dans le domaine des méthodes d'évitement réactif d'obstacles. Cependant, de telles techniques intègrent uniquement les aspects cinématiques des robots mobiles et considèrent bien souvent le terrain comme plat en faisant abstraction de toutes contraintes dynamiques. De plus, toutes ces méthodes décrivent les éléments détectés comme des éléments totalement infranchissables (nommés obstacles). Elles ne prennent pas en compte des éléments franchissables à des vitesses faibles comme par exemple un ralentisseur pour une

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

voiture. A ce stade de l'analyse, nous pouvons affirmer que l'inconvénient majeur de ces méthodes est leur caractère très heuristique. En effet, toutes ces méthodes recherchent à segmenter le comportement du robot pour répondre aux perturbations rencontrées. Bien que ce type de fonctionnement soit de ce fait plus rapide, il est incapable de traiter un cas en dehors du cadre rigide de la méthode. Il faut alors établir une nouvelle heuristique permettant d'y répondre. Hors pour de la navigation en milieu ouvert, il nous paraît presque inévitable d'avoir un grand nombre de cas à traiter reflétant la diversité des situations rencontrées. L'accumulation des heuristiques nécessaires rendrait ces approches vite très complexes et non optimales. Il nous semble donc nécessaire de proposer une solution qui soit plus générale afin de prévenir la totalité des situations liées à notre problématique. Nous nous sommes donc naturellement intéressé aux méthodes consistant à prédire l'influence de l'environnement sur le comportement du véhicule, en particulier sur sa stabilité. Différents travaux existent dans ce domaine et nous proposons d'en détailler les principales caractéristiques.

2.1.2 Méthodes de prévention du renversement d'un véhicule

Les méthodes de prévention de renversement de véhicules sont devenues des enjeux importants dans l'industrie de l'automobile (BMW, Renault Trucks). Ainsi, beaucoup de systèmes permettant le maintien de la stabilité de voitures ou de poids lourds ont récemment vu le jour. Ceux-ci sont en général basés sur une mesure permettant de détecter une situation propice au renversement. Cette détection peut s'appuyer sur diverses mesures.

La position du centre de gravité

La position du centre de gravité est une mesure fréquemment utilisée (par exemple [Diaz-Calderon 2006]). Il s'agit de vérifier si la projection du centre de gravité du véhicule sur le sol est comprise dans la zone délimitée par ses points de contacts appelée polygone de sustentation. Si c'est le cas alors le véhicule est considéré comme stable. Cette méthode est couramment utilisée pour les robots de type humanoïdes (voir par exemple Zero Moment Point (ZMP) [Sardain 2004]).

Le transfert de charge

Une mesure du risque renversement peut être donnée par le transfert de charge. Le principe consiste à calculer les forces résultantes entre le pneu

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

et le sol puis de déterminer leur variation. Le transfert de charge s'effectue durant les différentes manœuvres (freinage, virage, etc.) et est dû à des forces appliquées à la surface du pneu parallèlement au sol. On pourra citer [Odenthal 1999], [Peters 2006] pour les véhicules urbains, [Imine 2008] pour les poids lourds, ou encore [Bouton 2010] pour les véhicules légers tout-terrains (figure 2.5).



FIGURE 2.5 – Véhicule léger tout-terrain du Cemagref utilisé pour l'évaluation des risques de renversement (Quad Massey Fergusson MF400H)

Les variations d'énergie

Il existe des méthodes basées sur les variations d'énergie comme dans [Johansson 2004]. L'idée consiste à remarquer que lorsque le véhicule se rapproche d'une situation de renversement son énergie potentielle augmente. Par conséquent, le principe de cette méthode consiste à réaliser un bilan énergétique du véhicule (la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinématique) et de la comparer avec l'énergie potentielle critique de renversement. Si le bilan énergétique est plus grand que l'énergie potentielle critique alors le véhicule se renverse. Cependant, bien que son principe soit relativement simple, l'évaluation du bilan énergétique dans la pratique est difficile.

L'accélération latérale

Un dernier exemple est l'utilisation de l'accélération latérale comme par exemple dans [Bouteldja 2004]. On peut facilement mettre en évidence que

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

le phénomène de renversement latéral est étroitement lié à l'évolution et à la valeur de l'accélération latérale au centre de gravité du robot. Cependant, il est difficile de bien déterminer le seuil critique de renversement car il est fortement dépendant des paramètres des suspensions et de l'angle de braquage.

Conclusion sur les méthodes de prévention du renversement

La majorité de ces travaux exploite l'hypothèse de roulement sans glissement [Hac 2004] ou considère uniquement le domaine linéaire du pneumatique [Ryu 2004].

L'inclinaison du sol est parfois considérée en négligeant l'impact des irrégularités sur la dynamique du véhicule. Des mesures caractérisant le risque de renversement sont ensuite utilisées pour concevoir des systèmes actifs de sécurité agissant sur la stratégie de commande du véhicule. Cela se traduit par une modification de la commande que cela soit sur l'angle de braquage [Odenthal 1999] ou la répartition des couples de freinage dans [Schofield 2006].

Cependant, ces critères sont généralement calculés grâce à des données provenant de capteurs proprioceptifs (accéléromètres, capteurs de forces, ...). De ce fait, elles ne permettent pas d'anticiper les perturbations provenant de l'environnement comme par exemple un mur (collision possible). Afin d'éviter les collisions mais aussi de ralentir aux endroits dangereux, il faut que le système soit équipé de capteurs permettant de reconstruire l'environnement autour de lui c'est-à-dire que le véhicule soit équipé de capteurs extéroceptifs tels que des caméras, des télémètres voire des radars. Grâce à de tels capteurs, le système pourra évaluer la **traversabilité** de l'environnement. Cette notion de traversabilité se traduit par la capacité physique et dynamique du véhicule à évoluer dans son environnement. Il convient de présenter des travaux relatifs à cette notion.

2.1.3 Méthodes basées sur la traversabilité du terrain

La notion de traversabilité du terrain implique une représentation de l'environnement et une évaluation de la vitesse limite pour le traverser. Un exemple simple est le franchissement d'une marche. Il nous parait évident que le franchissement d'une marche doit se faire à une vitesse plus faible que pour un sol plat. Les travaux dans [Berkemeier 2008] recherchent cette vitesse limite pour un véhicule à trois roues. Les auteurs montrent la relation entre la vitesse maximum de franchissement et la hauteur de la marche. Cependant, l'étude du franchissement de la marche ne peut pas être utilisée dans un monde ouvert où la géométrie du sol est variée.

On retrouve également la notion de traversabilité dans [Ye 2004] qui

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

améliore une des méthodes d'évitement réactif d'obstacles (VFH). Contrairement à la méthode du VFH qui consiste à créer un histogramme représentant les zones libres autour du robot, cette nouvelle méthode nommée TFH (Traversability Field Histogram) crée un histogramme représentant les vitesses de franchissement admissible par le véhicule.

Nous pouvons aussi citer des méthodologies plus évoluées dans la littérature où la forme géométrique de l'environnement est prise en compte comme par exemple [Shiller 1999]. L'auteur représente l'environnement par une fonction (B-Spline) sur laquelle il va appliquer la trajectoire du robot pour déterminer un profil de vitesse. Le principe est très intéressant car il laisse entrevoir la possibilité de prédire le comportement du véhicule le long d'une trajectoire et de déterminer comment doit évoluer le véhicule en terme de vitesse pour respecter des conditions telles que l'adhérence ou le non-renversement du véhicule. Cependant, l'étude n'est réalisée que sur la trajectoire de référence ; de plus l'environnement doit être connu et modélisé par une B-Spline. Ceci laisse des doutes pour une implémentation temps-réel sur un véhicule.

Ce sont les travaux dans [Kelly 1997a] et [Kelly 1997b] qui ont été les premiers à envisager la forme géométrique de l'environnement pour évaluer la traversabilité dans un monde ouvert. De façon plus générique, les auteurs proposent d'étudier un système de guidage automatique en énumérant toutes les contraintes que le système doit respecter. Cela se traduit par la prise en compte des temps de retard des actionneurs, la géométrie du véhicule ainsi que les limites du système de perception. Cependant bien qu'ils décrivent précisément les contraintes et proposent des concepts théoriques pour aboutir à un système fiable, aucun système réel n'est présenté. La représentation de l'environnement ou les problèmes liés aux ressources disponibles ne sont pas traités.

Il faudra attendre quelques années supplémentaires et les concours organisés par le DARPA [Cremean 2006] ou [Howard 2008] pour arriver à une présentation de systèmes de guidage automatique entier prenant en compte la traversabilité du terrain et intégrés dans un véhicule. Généralement, l'architecture du système se compose d'un générateur de trajectoires ou de la déformation de la trajectoire nominale, d'une évaluation de profil de vitesse puis de la sélection de la meilleure stratégie de commande à adopter. Cependant, pour arriver à de tels systèmes de navigation, il faut avoir des moyens de perception et de commande importants ce qui constitue un véritable défi technologique dans la gestion des données reçues.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

2.1.4 Bilan

Les différents travaux présentés précédemment montrent qu'il est possible de préserver l'intégrité physique d'un robot mobile soit par une stratégie d'évitement d'éléments dangereux (méthode d'évitement réactif d'obstacles), soit par une stratégie de franchissement à vitesse restreinte (critère de renversement du véhicule). Pour fusionner ces deux méthodes, il nous semble nécessaire de remplacer la notion d'obstacle qui est naturellement décrite comme une notion binaire (élément infranchissable) par une plus riche comme celle de la traversabilité (élément franchissable à une certaine vitesse). La notion de traversabilité va être dépendante de l'environnement, et des capacités du véhicule. Nos travaux s'inspireront donc des remarques établies dans [Kelly 1997a] et [Kelly 1997b]. Cependant, bien qu'elles soient une bonne base pour établir notre système, la méthodologie employée dans ces travaux d'un point de vue gestion des données peut laisser perplexe. En effet, la quantité d'information nécessaire (dépend du nombre de capteurs utilisés et de leur flot de données) ainsi que les temps de calculs des différents algorithmes et leur fiabilité ne sont pas précisés. Pourtant, ces informations sont des données vitales dans l'élaboration d'un système temps-réel efficace.

2.2 Méthodologie proposée

2.2.1 Introduction

Les travaux présentés dans ce mémoire utilisent le principe de traversabilité. Il s'agit de réaliser un système de guidage automatique performant face aux problématiques liées à des applications réelles. Cependant, nos développements seront motivés par la recherche d'une stratégie en adéquation avec les besoins de l'application (précision, fiabilité, ...). Contrairement aux approches consistant à identifier les informations utiles parmi toutes les données issues d'un système de perception, nous proposons au contraire de focaliser son fonctionnement sur les zones utiles au bon déroulement de l'application. On peut citer comme exemple les travaux [Tessier 2007] qui consistent à réaliser un système de localisation fiable et suffisamment précis pour les besoins de l'application. Il se compose d'un organe de localisation du véhicule et d'un estimateur du niveau de confiance de l'hypothèse de positionnement. Ce dernier est calculé au moyen d'un réseau bayésien et la stratégie qui en découle est gérée par un modèle de décision markovien. L'idée originale développée dans ces travaux réside dans la sollicitation des capteurs en fonction des besoins de l'application. Autrement dit, il ne s'agit plus d'un système piloté par des données capteurs (complexité croissante avec le nombre de capteurs) mais au

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

contraire d'un système dont le fonctionnement s'optimise avec l'augmentation du nombre des capteurs et des algorithmes de traitement de l'information. Le système de localisation devient intelligent car d'après sa connaissance a priori de la capacité des triplets capteurs-algorithmes-amers, il est capable d'estimer quel triplet sera le meilleur pour améliorer significativement sa localisation. Plus précisément, il s'agit de la conception d'un système de perception piloté par les besoins et les contraintes de l'application.

2.2.2 Vers une approche globale

Comme nous l'avons évoqué précédemment, nous proposons un système de guidage automatique ayant une stratégie différente de celle que nous pouvons voir dans les approches classiques. Effectivement, les approches que l'on nomme "classiques" proposent la conception de machines autonomes en trois grandes parties. Une partie est dédiée à la perception de l'environnement et à la localisation du véhicule. Ensuite, il vient un organe de décision qui consiste à analyser les données de la partie perception pour déterminer la stratégie à adopter afin d'atteindre l'objectif. Au final, la partie action calcule et envoie les commandes aux actionneurs. Dans cette logique, chacune des parties dépend uniquement de la précédente. De plus, la partie décision est la seule à prendre en compte l'objectif à atteindre. Bien que cette organisation permette de réaliser des systèmes de guidage automatique, elle est insuffisante et non optimale dans le cadre de notre objectif. Généralement, les algorithmes les plus performants pour chacune de ces parties sont complexes et coûteux en temps de calcul. Si par exemple, la tâche de perception permet de reconstruire tout l'environnement autour du véhicule avec une très grande précision mais utilise toutes les ressources disponibles, il est possible que les autres tâches n'aient plus suffisamment de ressources pour s'exécuter correctement.

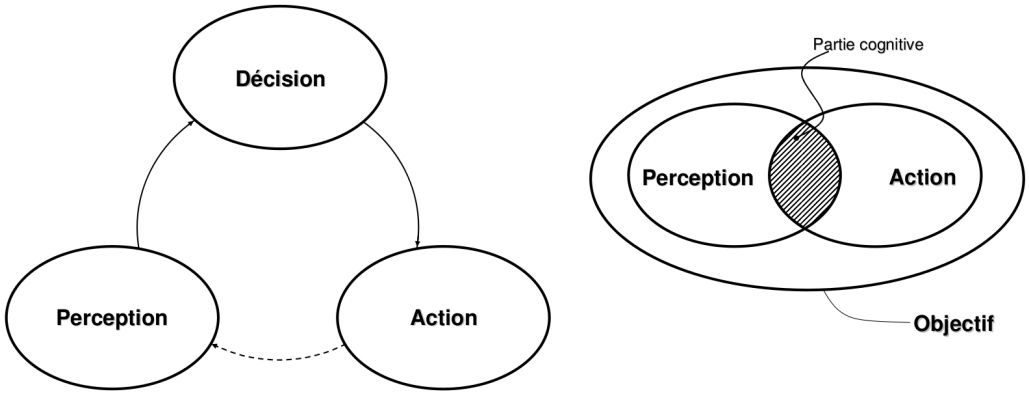


FIGURE 2.6 – Les deux approches

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

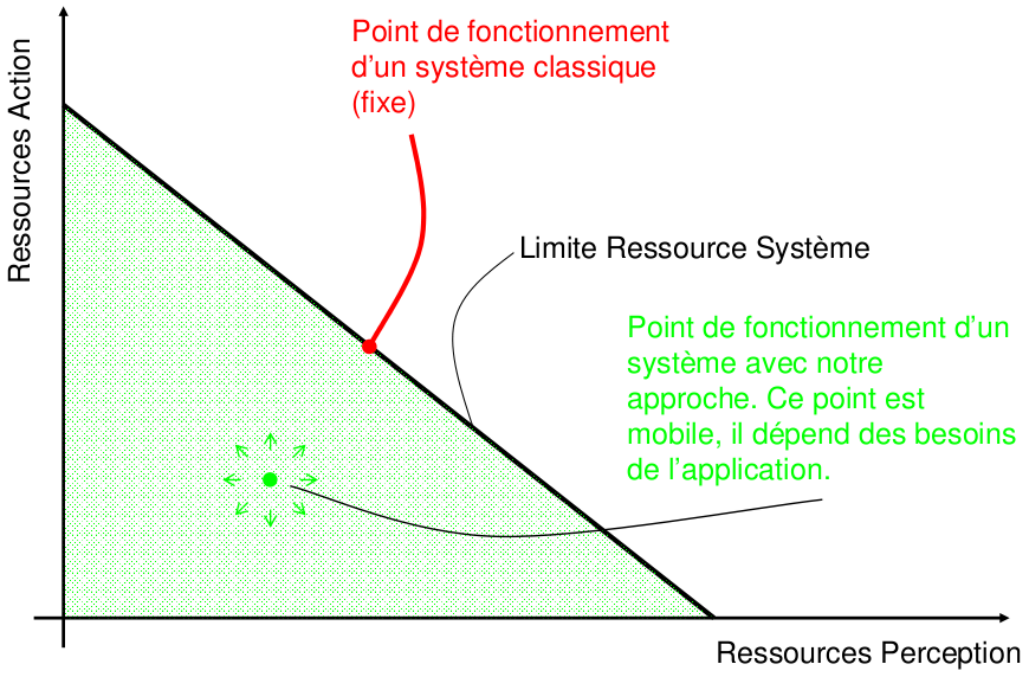


FIGURE 2.7 – Gestion des ressources du système

C'est pourquoi nous proposons une méthodologie concernant la conception de système de guidage automatique qui s'inscrit dans le cadre des travaux de notre équipe. Il s'agit d'optimiser les tâches de perception et de commande en intégrant leurs dépendances et leurs contraintes au regard des besoins de l'application. Considérant la forte et naturelle interaction entre les tâches de perception et de commande, elles sont difficilement séparables.

Par exemple, la tâche action ne devra pas autoriser le déplacement du véhicule si la tâche de perception ne donne aucune information sur son environnement. De même, la tâche de perception ne devra pas retourner d'informations inutiles aux déplacements du véhicule. **Notre système doit converger vers une stratégie de navigation intégrant les relations perception action.**

La figure 2.7 décrit ce vers quoi notre système devrait aboutir. Les ressources du système sont limitées et doivent être partagées entre les besoins de la tâche de perception et celle de guidage. Dans un système "classique", la distribution des ressources est réalisée lors de la conception du système, du coup son point de fonctionnement est fixe. Nous voulons aboutir à un système qui puisse naturellement modifier son point de fonctionnement en fonction des besoins de l'application. Plus précisément, si le véhicule est à l'arrêt, il n'a pas besoin de percevoir l'environnement ni de commander le véhicule, le point de fonctionnement est à l'origine du graphe. A contrario, si le but de l'application

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

est de rouler à des hautes vitesses le point de fonctionnement se rapprochera de la limite physique du système et si les besoins deviennent plus importants que les ressources disponibles, alors le système sera naturellement limité.

2.3 Objectif des travaux

L'objectif de la thèse est de proposer des solutions permettant d'aboutir à un système **global** de guidage automatique de véhicule mobile intégrant les moyens de perception et de contrôle. La tâche de perception qui se compose de la reconstruction 3D de l'environnement et de la localisation du véhicule ne sera pas traitée dans ce mémoire mais est en cours de développement par un autre étudiant. Elle sera donc considérée comme acquise. Cette tâche aura pour mission de fournir un Modèle Numérique de Terrain (MNT) permettant d'évaluer la franchissabilité de l'environnement proche du véhicule. La prise en compte de l'incertitude de la localisation fournie et des besoins de cette tâche notamment en termes de vitesses maximales admissibles sera bien traitée dans ce manuscrit.

Notre système sera composé d'un module de génération de trajectoires dont le principe sera d'établir uniquement des trajectoires réalisables par le véhicule. C'est-à-dire qu'il prendra en compte les caractéristiques cinématiques du robot. Ensuite, le système calculera les poses successives du robot sur le Modèle Numérique de Terrain pour déterminer l'évolution de son tangage et de son roulis. Ces données serviront à l'évaluation de la vitesse admissible des trajectoires.

Lorsque le système aura toutes ces informations, il devra choisir la meilleure trajectoire parmi celles qu'il aura générées. Pour cela, il faudra définir un critère lié au comportement du véhicule souhaité par l'opérateur. Ce critère intègrera l'écart entre la position du véhicule et la trajectoire de référence mais également des contraintes de l'application tels que la vitesse moyenne et la consommation d'énergie.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 3

Méthode proposée pour préserver l'intégrité physique d'un véhicule évoluant dans un monde ouvert

Comme déjà évoqué précédemment, ces travaux ont pour but d'établir la meilleure stratégie de navigation pour aller le plus vite possible d'un point A à B tout en préservant l'intégrité physique du véhicule. Ce chapitre a pour objectif de présenter le système dans son intégralité d'un point de vue guidage (la tâche de perception étant supposée acquise). Mais avant de décrire en détails le système de guidage, il paraît nécessaire de parler de l'idée générale sur laquelle le système est basé : la notion de l'**espace des vitesses admissibles**.

3.1 Espace des vitesses admissibles

Comme vu précédemment, pour garantir l'intégrité physique d'un véhicule, nous avons deux solutions qui consistent à éviter les éléments dangereux ou dans la mesure du possible à les franchir à vitesse restreinte. Une idée serait de fusionner ces deux stratégies afin d'avoir un système totalement autonome quel que soit l'environnement à traverser. Grâce à la fusion de ces deux types de méthodes, nous parviendrons à avoir une nouvelle méthode plus générale. Cependant, le concept d'obstacle est souvent compris comme un concept binaire. De plus, dans un environnement ouvert, à part les éléments comme des arbres ou un mur, il est difficile de caractériser les éléments qui soient totalement infranchissables. Par exemple, un trottoir est franchissable à faible vitesse et devient un obstacle à haute vitesse pour un véhicule urbain. Mais, ce même trottoir peut être franchissable à toutes les vitesses pour un char d'assaut. Alors peut-on considérer le trottoir comme un obstacle puisque cela dépend du véhicule et de la vitesse de franchissement ?

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Nous allons par la suite de ce manuscrit remplacer la notion d'obstacle par la caractérisation de la surface de navigation en terme de vitesse admissible de franchissement en fonction des caractéristiques intrinsèques du véhicule étudié (voir figure 3.1). Ainsi par exemple un trottoir a une vitesse de franchissement faible, un sol plat a une vitesse de franchissement très élevé, un arbre et un mur ont une vitesse de franchissement nulle pour le véhicule.

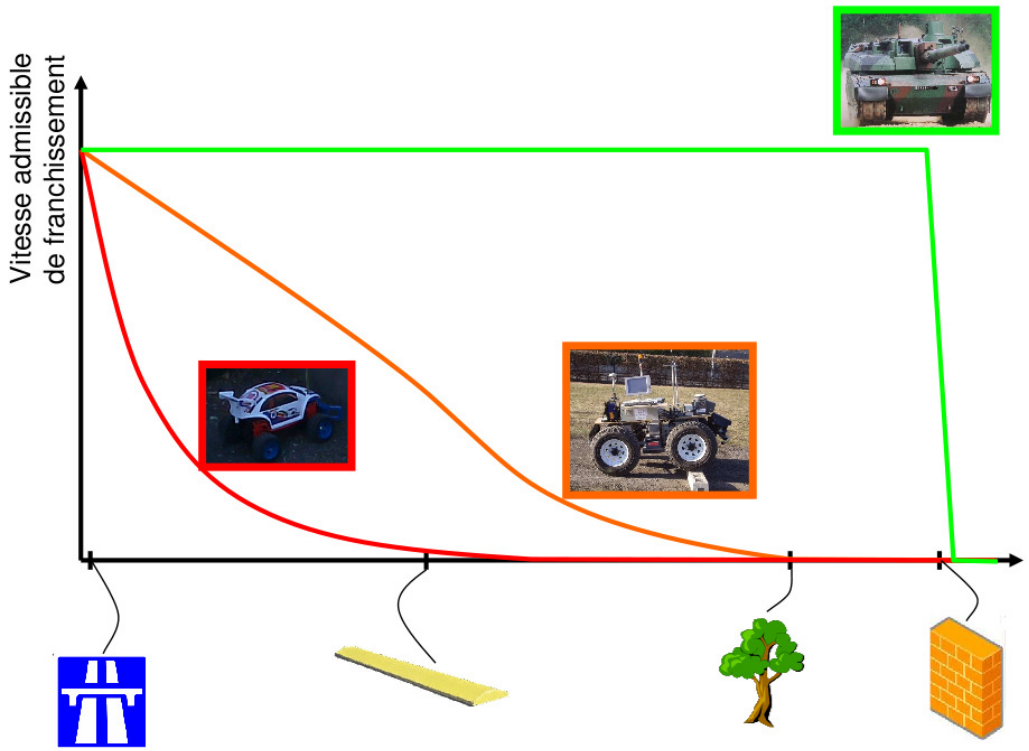


FIGURE 3.1 – Illustration de la caractérisation de l'environnement en vitesse admissible

Cette caractérisation de la surface de navigation peut être nommée comme l'**espace des vitesses admissibles** par le véhicule. Cependant, l'analyse de la surface de navigation est complexe. En effet, le but de cette analyse étant de déterminer la vitesse admissible du véhicule pour franchir l'environnement sans risque de renversement ou de collision, il est nécessaire de prédire le tangage, le roulis et le lacet sur toute la surface potentiellement parcourue. Si le roulis et le tangage sont une cause évidente d'instabilité, l'influence du lacet est moins claire. Une illustration peut être donnée avec le cas d'un véhicule franchissant un trottoir. Le véhicule franchit le trottoir presque perpendiculairement à celui-ci, il aura du tangage mais pas de roulis. Par contre, si le véhicule franchit le trottoir parallèlement, il aura dans ce cas beaucoup

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

de roulis et peu de tangage. Par conséquent, pour déterminer un espace de vitesse admissible sur une surface, nous avons besoin de trois paramètres rendant l'analyse complexe et le temps de calcul difficilement compatible avec une application temps-réel.
Nous proposons de simplifier la problématique en étudiant "seulement" un sous-ensemble de trajectoires possibles ayant comme support la surface considérée ([Debain 2010a], [Delmas 2009]). Cela permet l'estimation de la vitesse admissible le long d'une trajectoire décrite en fonction de son abscisse curviligne. **La gestion de toutes les trajectoires utiles dans la surface de navigation est réalisée en évaluant le profil de vitesse admissible de chaque trajectoire et finalement en choisissant la meilleure.**

Plus précisément, notre système de guidage est décrit par le schéma de la figure 3.2 qui montre les différentes étapes nécessaires au choix de la meilleure trajectoire.

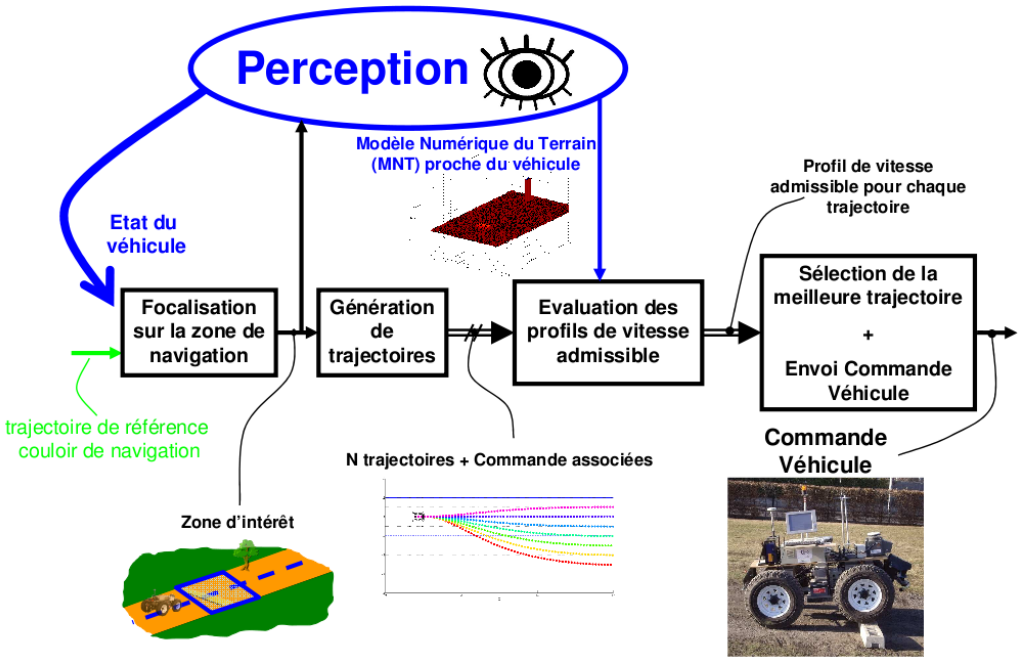


FIGURE 3.2 – Présentation des différentes étapes de notre système

A chaque itération du système, celui-ci doit :

- **Focaliser sur la zone de navigation** : en effet pour être compatible avec une application temps-réel une première idée est de ne traiter que les informations utiles au bon fonctionnement de chaque tâche. Par conséquent, le système devient plus optimal d'un point de vue de la gestion des ressources. Le système doit solliciter la partie responsable de la perception de l'environnement pour ne cibler que la partie utile

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

au bon déroulement de l'application. Pour l'être humain, il s'agirait de regarder où il marche. Cette zone d'attention dépend de la trajectoire de référence, du couloir de navigation, de l'état du système (position absolue + incertitude associée) et des capacités de mobilité du véhicule.

- **Génération de trajectoires** : comme nous l'avons expliqué auparavant, la vitesse admissible pour franchir l'environnement (rappelons que cette vitesse peut-être nulle) sera estimée le long de trajectoires générées par le système. Ces trajectoires doivent être en accord avec les capacités cinématiques du véhicule et doivent se trouver dans la zone de navigation.
- **Evaluation des profils de vitesse admissible** : grâce au Modèle Numérique de Terrain (MNT) fourni par la tâche de perception, nous allons déterminer les poses successives du robot sur ces trajectoires générées et ainsi déterminer le profil de vitesse admissible pour chacune d'entre elles. C'est-à-dire déterminer le profil de vitesse qui respecte les conditions de stabilité du véhicule.
- **Sélection de la meilleure trajectoire** : ayant toutes les trajectoires et leur profil de vitesse admissible associé, il faut choisir la meilleure grâce à la minimisation d'un critère que l'on a défini et qui dépend de l'application souhaitée par l'opérateur.
- **Commande du véhicule** : ensuite, nous devons commander le véhicule que cela soit sur l'angle de braquage ou sur la vitesse afin qu'il suive la trajectoire préalablement sélectionnée et respecte l'intégrité physique du véhicule.

3.2 Zone d'intérêt

Pour réaliser son objectif, la première action que doit exécuter le système est de définir sa zone d'attention. Contrairement à la notion d'état de collision inévitable (Inevitable Collision State, ICS) décrit dans [Fraichard 2004] qui désigne l'état du système pour lequel quelle que soit la commande du véhicule appliquée il y aura une collision, nous avons choisi de délimiter la zone minimale à observer par rapport à l'état du véhicule. En effet, un des grands inconvénients du ICS est qu'il faut connaître la totalité de l'environnement pour déterminer l'ensemble des états amenant une collision, entraînant un temps de calcul long. Alors que définir la zone où le véhicule pourra évoluer quelle que soit la stratégie de commande choisie sera plus efficace en terme de temps de calcul et permettra de focaliser l'attention du système sur là où sont les informations utiles. Cela permet de rendre le système plus optimal. Un autre avantage de la focalisation de l'attention du système est l'augmentation

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

de rapport signal sur bruit et la diminution de l'ambiguïté des données d'un point de vue perceptif.
La zone d'intérêt est transmise à la tâche de perception de l'environnement. Cela n'est pas différent du comportement humain. En effet, nous regardons là où nous allons. Par exemple, lorsque nous conduisons sur l'autoroute à $130km.h^{-1}$, il est naturel de regarder la route et non le paysage. Nous focalisons notre attention sur la zone de navigation afin de mieux anticiper d'éventuelles collisions avec d'autres automobilistes. Dans ce cas, notre regard s'adapte à notre objectif. Il doit en être de même pour notre système. Cette zone dépend de son état (position, incertitude associée et vitesse), de l'objectif (trajectoire de référence et couloir de navigation) et des capacités de mobilité du véhicule.
Dans la suite, nous présenterons la construction de cette zone d'intérêt en fonction de ces divers paramètres. Nous commencerons par la prise en compte de l'état du système et de son objectif à atteindre puis par la prise en compte des capacités du véhicule.

3.2.1 Notion d'intégrité de navigation

Pour définir la zone de navigation un des premiers facteurs à prendre en compte est l'objectif à atteindre. Pour cela, il faut considérer la zone de navigation possible dans le monde (repère global), la localisation du véhicule dans ce repère ainsi que la covariance associée. En prenant comme hypothèse l'**intégrité de la localisation** (position vraie comprise dans l'ellipse d'incertitude), nous sommes en mesure de déterminer la zone de navigation locale du véhicule garantissant que le robot reste toujours dans le couloir de navigation.

Afin de simplifier le calcul de cette zone, nous considérons que le véhicule évolue sur un monde plan. L'état du système est donné à l'instant k par $S_k = (x_k, y_k, \theta_k)$ avec (x_k, y_k) la position du véhicule et θ_k son orientation ou lacet. La covariance associée à cet état sera nommée P_k (matrice de taille 3×3). Afin de bien définir la zone où le véhicule pourra évoluer sans sortir du couloir de navigation, nous allons étudier deux cas.

Dans le premier cas, on considère que le cap du véhicule est très précis ($P_k(\theta) = 0$) mais avec une incertitude sur la position (figure 3.3). Sur cette figure, nous avons d'un côté la vue globale de la situation et sur l'autre côté le point de vue local. A travers trois hypothèses vraisemblables de localisation, on remarque que la position relative de la trajectoire et du couloir de navigation par rapport au véhicule est différente. Aussi pour assurer que le

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

véhicule reste dans le couloir de navigation, il faut être en mesure de respecter le couloir pour toutes les hypothèses de positions données par l'incertitude de localisation. Ainsi, nous pouvons en déduire que la zone locale de navigation où le véhicule reste toujours dans le couloir autorisé est l'intersection des projections du couloir initial de navigation à partir des différentes positions possibles du véhicule. En prenant l_{CN} la largeur du couloir de navigation, l_V la largeur du véhicule et σ_x l'écart-type de la position relative entre le véhicule et la trajectoire, nous en déduisons l'expression de la largeur de la zone d'attention (l_{ZI}) par l'expression 3.1.

$$l_{ZI} = l_{CN} - 2.\sigma_x - l_V \tag{3.1}$$

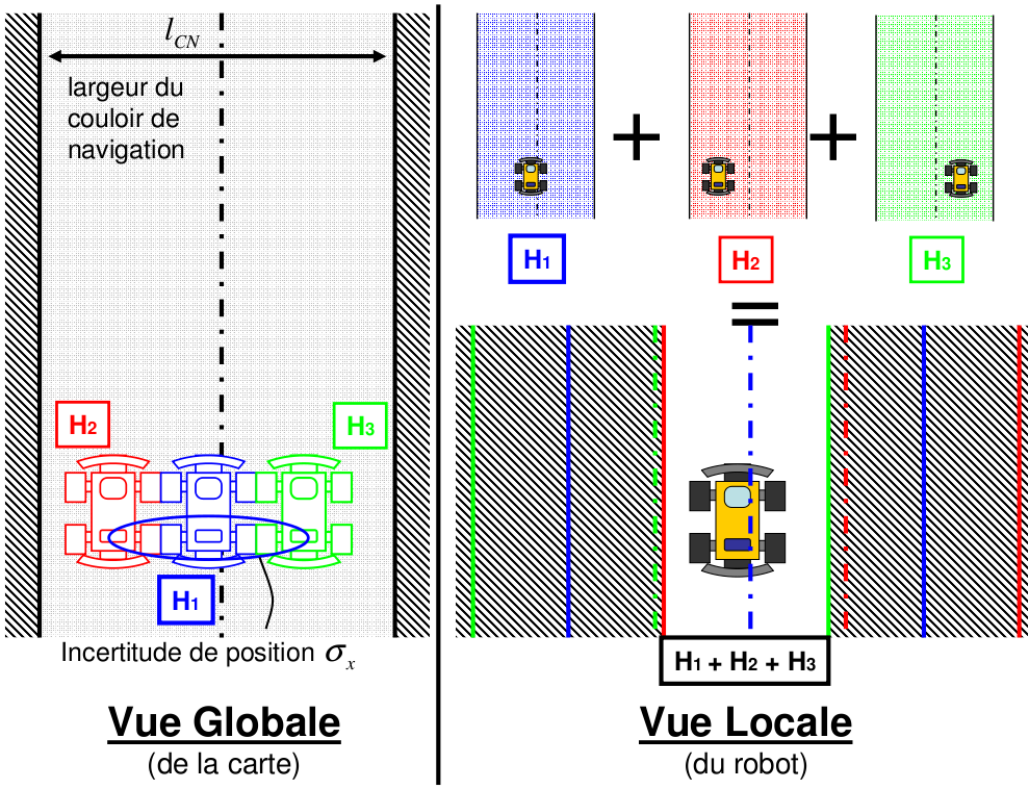


FIGURE 3.3 – Passage d'un contexte global vers un contexte local (avec le cap précis) selon trois hypothèses de localisation (H1, H2 et H3)

Dans un deuxième cas, nous considérons que le véhicule a une position très précise mais avec une imprécision sur le cap. Le système doit suivre le même cheminement que dans le cas précédent (figure 3.4). Nous obtenons une zone d'attention qui s'étrécit avec la distance de prédiction D_p. Cette diminution

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

est exprimée dans l'équation 3.2 avec σ_θ l'écart-type du cap relatif entre le véhicule et la trajectoire de référence.

$$l_{ZI}(D_p) = l_{CN} - 2.tan(\sigma_\theta).D_p - l_V \tag{3.2}$$

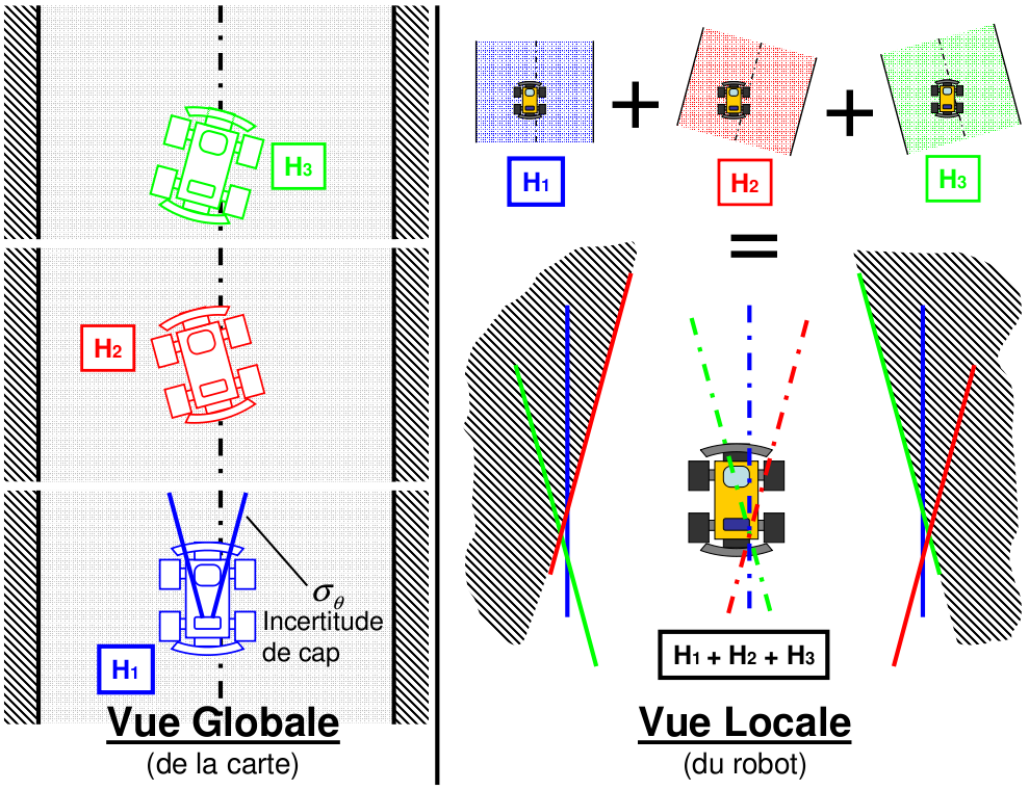


FIGURE 3.4 – Passage d'un contexte global vers un contexte local (position précise) selon trois hypothèses de localisation (H1, H2 et H3)

Remarques :

- Dans le cas particulier où l'écart-type $\sigma_\theta = \pi$ ce qui signifie que nous ne connaissons pas du tout l'orientation du véhicule, la zone de navigation position est un cercle de rayon égal à la distance entre le véhicule et la limite du couloir de navigation.

- Si l'aire de la zone d'intérêt est nulle cela signifie que la localisation donnée par la partie perception n'est pas assez précise pour respecter l'intégrité de navigation (véhicule dans le couloir de navigation), le système ordonne l'arrêt du véhicule. Cet état ne pourra changer que lorsque la localisation sera améliorée ou que le couloir sera élargi.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

A travers la notion d'intégrité de navigation, nous avons allégé la tâche de perception en supprimant une grande partie de la reconstruction de l'environnement. Cependant, si le couloir de navigation est très grand et/ou les incertitudes de localisation sont petites, il peut encore rester une trop grande quantité d'information à traiter. Afin de limiter cette zone, nous proposons de prendre en compte les capacités intrinsèques du véhicule ainsi que sa cinématique.

3.2.2 Capacités de mobilité du véhicule

Capacité d'accélération

En analysant le lien entre le couloir de navigation et la localisation du robot, nous avons pu soustraire une grande partie de l'environnement de la zone d'attention du véhicule. Cependant, dans le cas où le véhicule est à l'arrêt, la zone d'attention doit être très proche du véhicule et relativement réduite. Au contraire si le véhicule avance très vite, cette zone doit être d'une plus grande superficie. A travers ces exemples, nous constatons que la zone d'intérêt dépend de la vitesse du véhicule. Plus précisément, pour chaque itération du système, la distance minimale de prédiction doit permettre au véhicule de s'arrêter. Cette distance notée $D_{A_{min}}$ est calculée tout d'abord en déterminant le temps nécessaire t_{arret} pour permettre au véhicule de passer de sa vitesse actuelle notée V_i à la vitesse finale $V_f = 0$ (arrêt du véhicule). Nous obtenons l'expression (3.4) avec d_{ec} la capacité de décélération du véhicule ($d_{ec} > 0$, d_{ec} constant).

$$t_{arret} = -\frac{V_f - V_i}{d_{ec}} \tag{3.3}$$

$$= \frac{V_i}{d_{ec}} \tag{3.4}$$

En considérant une décélération constante, nous obtiendrons les abscisses curviligne s_i et s_f (exprimées dans l'équation (3.7)).

$$s_f = -\frac{1}{2}.d_{ec}.t_{arret}^2 + V_i.t_{arret} + s_i \tag{3.5}$$

$$s_f = -\frac{1}{2}.d_{ec}.\left(\frac{V_i}{d_{ec}}\right)^2 + V_i.\left(\frac{V_i}{d_{ec}}\right) + s_i \tag{3.6}$$

$$s_f = \frac{V_i^2}{2.d_{ec}} + s_i \tag{3.7}$$

Nous obtenons l'expression de $D_{A_{min}}$ (3.8).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$D_{A_{min}} = s_f - s_i = \frac{V_i^2}{2.d_{ec}} \tag{3.8}$$

Cependant, le système doit être en mesure de voir un peu plus loin que $D_{A_{min}}$. Pour être plus exact, il doit intégrer à la distance d'arrêt les conséquences des décisions précédentes en particulier les ordres d'accélérations (notée $D_{A_{max}}$). En effet, il existe une probabilité qu'un élément totalement infranchissable apparaisse lors de l'itération suivante du système. Or si on ne prend pas en compte la décision prise précédemment (notamment si le véhicule a accéléré), la distance d'arrêt sera plus grande que celle d'observation, par conséquent le véhicule sera dans l'incapacité physique de s'arrêter à temps. La détermination de la distance d'arrêt $D_{A_{max}}$ est calculée en deux phases. Pendant la première phase, le véhicule accélère durant une itération du système c'est-à-dire pour une durée égale au temps d'échantillonnage Te. En notant $V_{i,1}$, $V_{f,1}$, $s_{i,1}$ et $s_{f,1}$ respectivement les vitesses et abscisses initiales et finales durant la phase d'accélération et a_{cc} la capacité d'accélération du véhicule ($a_{cc} > 0$, a_{cc} constant) nous obtenons les équations (3.9) et (3.10).

$$V_{f,1} = a_{cc}.Te + V_{i,1} \tag{3.9}$$

$$s_{f,1} = \frac{1}{2}.a_{cc}.Te^2 + V_{i,1}.Te + s_{i,1} \tag{3.10}$$

Puis pour la seconde phase nous utilisons la même méthodologie que lors de la détermination de $D_{A_{min}}$. Nous avons donc l'équation suivante.

$$s_{f,2} = \frac{V_{i,2}^2}{2.d_{ec}} + s_{i,2} \tag{3.11}$$

Or $s_{i,2} = s_{f,1}$ et $V_{i,2} = V_{f,1}$. Nous obtenons l'expression de la distance d'arrêt $D_{A_{max}}$ par les équations suivantes.

$$\begin{aligned}
D_{A_{max}} &= s_{f,2} - s_{i,1} && (3.12)\\
&= \frac{V_{i,2}^2}{2.d_{ec}} + s_{i,2} - s_{i,1} && (3.13)\\
&= \frac{V_{f,1}^2}{2.d_{ec}} + s_{f,1} - s_{i,1} && (3.14)\\
&= \frac{(a_{cc}.Te + V_{i,1})^2}{2.d_{ec}} + \frac{1}{2}.a_{cc}.Te^2 + V_{i,1}.Te + s_{i,1} - s_{i,1} && (3.15)\\
&= \frac{(a_{cc}.Te + V_{i,1})^2}{2.d_{ec}} + \frac{1}{2}.a_{cc}.Te^2 + V_{i,1}.Te && (3.16)
\end{aligned}$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Modèle Cinématique

Le type de véhicule utilisé dans ces travaux peut être représenté par un modèle tricycle qui par nature est non-holonome (voir partie 3.3.2). Aussi une grande partie du voisinage du véhicule ne lui est pas directement accessible. Le débattement de l'angle de braquage des roues avant est limité à $[-\delta_{max}; \delta_{max}]$. Ceci entraîne pour le véhicule une trajectoire dont les bornes sont données par le cercle de rayon $R_{max} = \frac{L}{tan(\delta_{max})}$ avec L l'entraxe du véhicule (figure 3.5).

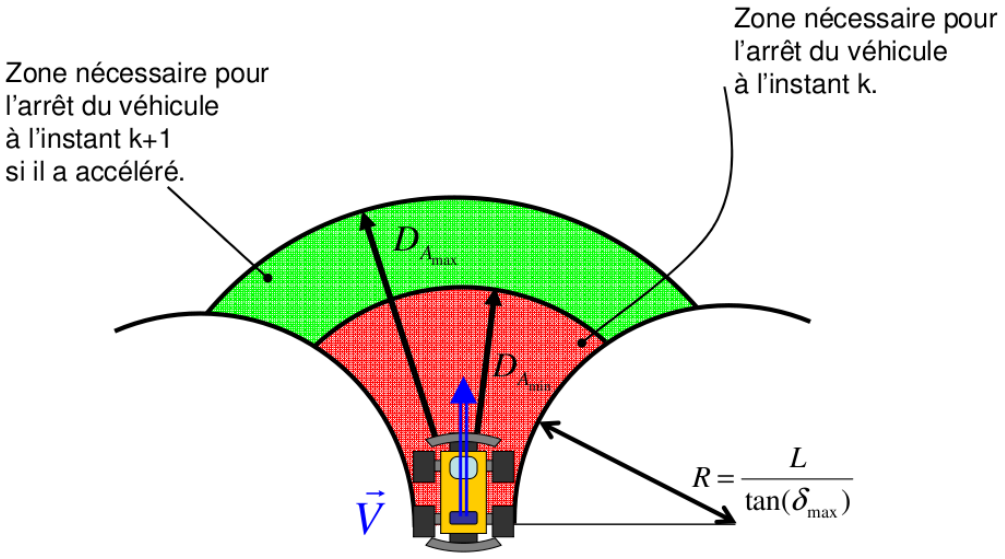


FIGURE 3.5 – Zone d'attention en fonction des capacités de mobilité du véhicule

3.2.3 Zone d'intérêt finale

Nous avons défini une zone d'intérêt afin de focaliser les ressources de perception du système sur les informations utiles à l'application. Cette zone d'intérêt finale est la fusion entre les deux zones préalablement délimitées (figure 3.6). Nous obtenons donc une zone d'attention fortement dépendante de l'état du système ainsi que des capacités de mobilité du véhicule. Grâce à cela, nous avons pu constater que si la tâche de localisation ou la tâche de reconstruction de l'environnement est défaillante, le système ordonne l'arrêt du véhicule. On constate donc que la tâche de perception de l'environnement a une très forte incidence sur le comportement du robot et vice et versa. Cet aspect fait partie intégrante du fonctionnement cognitif du système.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

La zone d'attention étant fixée, il faut maintenant déterminer un ensemble de trajectoires permettant de la traverser pour ensuite déterminer le profil de vitesse associé à chacune d'entre elles et choisir la plus adéquate au regard de l'application.

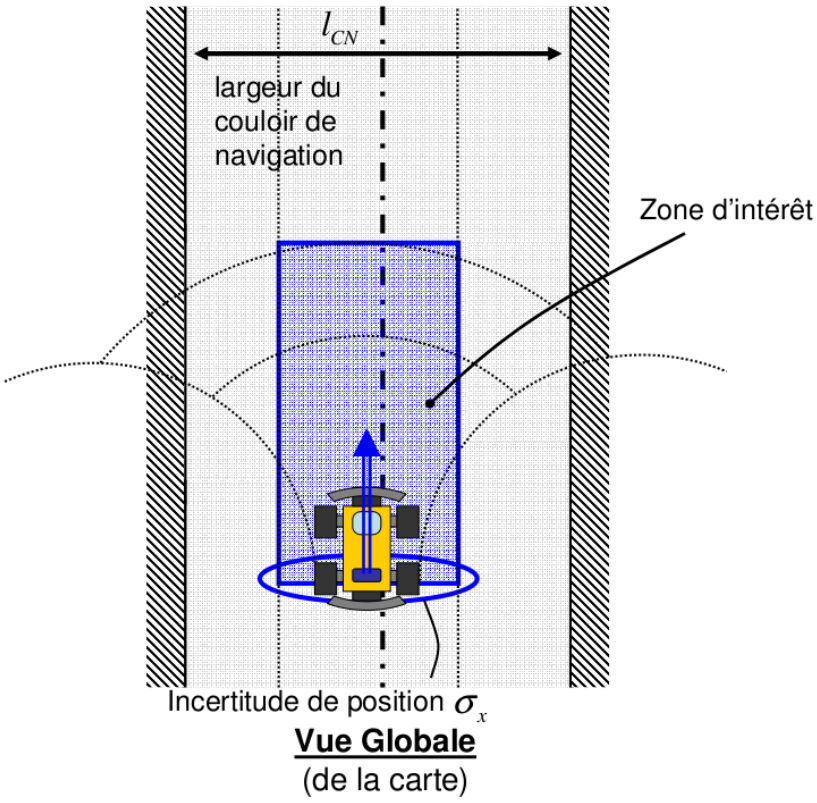


FIGURE 3.6 – Zone d'attention finale du système

3.3 Génération de trajectoires

3.3.1 Motivations

Analyser une zone de l'environnement en espace de vitesse admissible est difficile à cause de sa représentation et de la dimension élevée de paramètres à prendre en compte. En effet pour une même surface délimitant une zone à traverser, il existe une infinité de trajectoires possibles ainsi que de profils de vitesse admissibles pour le véhicule. Cependant, parmi cet ensemble de trajectoires, certaines ne sont pas réalisables par le véhicule, d'autres ne respecteront pas les contraintes liées à l'application. Nous allons donc essayer d'en trouver un sous-ensemble (adéquat à l'application temps-réel) qui soit

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

représentatif des possibilités offertes au véhicule. Ainsi à chaque itération du processus, nous calculons le profil de vitesse de chacune de ces trajectoires et nous déterminons la plus optimale par rapport à un critère préalablement défini.

Dans une première étape, nous proposons une méthode permettant de générer des trajectoires admissibles par un robot en s'appuyant sur les équations de son modèle cinématique.

3.3.2 Modélisation cinématique du véhicule

Afin de générer des trajectoires réalisables par le véhicule, il convient de connaître son modèle d'évolution ($S_{k+1} = f(S_k, U_k)$) avec S_k l'état du système à l'instant k. La figure 3.7 montre le passage de l'état k à $k+1$ sous l'hypothèse de roulement sans glissement.

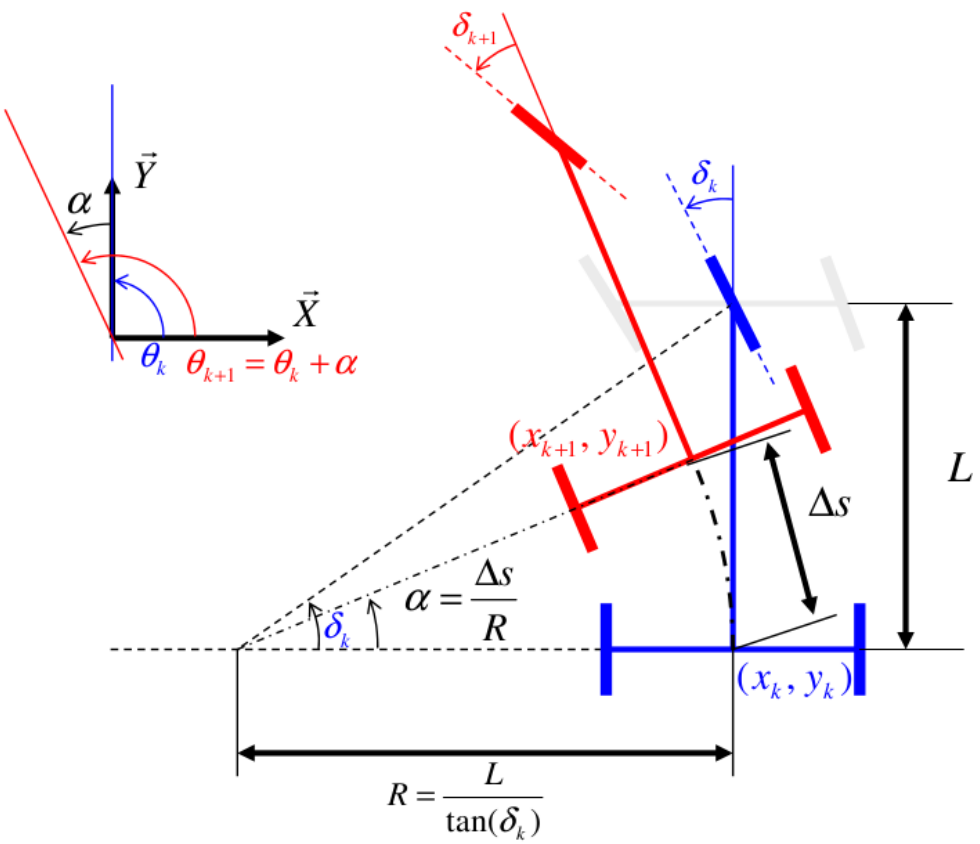


FIGURE 3.7 – Modèle Cinématique du véhicule

Soit (x_k, y_k, θ_k) la position et le lacet du véhicule dans le repère global et δ_k l'angle de braquage avant du robot à l'instant k, avec comme hypothèse que

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

l'échantillonnage de l'abscisse curviligne Δs est négligeable devant l'entraxe du véhicule L ($\Delta s << L$), nous obtenons l'équation (3.17). Nous utilisons le populaire modèle d'Ackermann (utilisé par exemple dans [Hiroaki 1998], [Taylor 1999], [Thuilot 2004], ...). Dans cette équation, nous avons modélisé l'angle de braquage par un système du 1er ordre de constante de temps τ que nous identifierons sur le véhicule réel, avec la constante a tel que $a = exp(-\frac{Te}{\tau})$ et δ_k^c la consigne appliquée sur l'angle de braquage à l'instant k.

$$X_{k+1} = \begin{pmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ \theta_{k+1} \\ \delta_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_k + \Delta s.cos(\theta_k) \\ y_k + \Delta s.sin(\theta_k) \\ \theta_k + \frac{\Delta s}{L}.tan(\delta_k) \\ a.\delta_k + (1-a).\delta_k^c \end{pmatrix} \tag{3.17}$$

On remarque que la fonction d'évolution du véhicule est non linéaire. En effet, l'hypothèse de roulement sans glissement entraîne une modélisation cinématique du véhicule à roues non holonome. Un robot non holonome possède moins de capacités de commande que de degrés de liberté. L'exemple couramment cité est la manœuvre du créneau en voiture. Lorsque l'on souhaite se garer entre deux voitures dans une file, le conducteur est obligé de réaliser un créneau, il lui est impossible de se décaler directement dans la place de parking vide en se déplaçant latéralement par rapport au cap de son véhicule. Cette caractéristique du robot rend l'élaboration de loi de commande plus difficile que celle de véhicules holonomes.

Les trajectoires générées devront donc respecter cette condition de non-holonomie. Cette condition permet de filtrer un grand nombre de trajectoires qui ne seraient pas réalisables par le véhicule.

A ce moment de l'analyse, deux possibilités nous sont offertes.

La première consiste à modéliser des trajectoires respectant cette condition généralement utilisée dans des méthodes de déformation de trajectoire telles que [Lefebvre 2005], [Quinlan 1993] ou [Lau 2009] ; ou des méthodes de génération de trajectoires comme par exemple [Wilde 2009] avec une génération de clothoïdes. Après création des trajectoires et la sélection de la meilleure, le système devra utiliser un algorithme de suivi de trajectoire.

La deuxième idée consiste à générer directement les commandes à appliquer au véhicule pour suivre un ensemble de trajectoires nominales. Puis il faut calculer les positions correspondantes du véhicule par le biais de sa fonction d'évolution. L'ensemble des positions obtenues définissant les trajectoires admissibles par le véhicule. On a choisi d'utiliser cette deuxième possibilité car elle permet d'estimer simultanément les trajectoires et les commandes associées.

Dans ce cadre, nos développements utilisent une loi de commande quadratique optimale finie d'ordre N qui génère des suites de commandes pour le

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

robot définissant ainsi un ensemble de trajectoires admissibles.

3.3.3 Commande quadratique optimale finie d'ordre N

Le principe de la prédiction de la trajectoire que le véhicule va suivre est d'utiliser une loi de commande afin de déterminer la consigne à appliquer au véhicule qui minimise l'erreur relative entre une trajectoire nominale et le véhicule. Avec cette consigne, nous calculons la position suivante du véhicule grâce à la fonction d'évolution établie précédemment et nous recommençons l'estimation de la prochaine consigne du véhicule. Cette boucle sera valide jusqu'à avoir atteint la distance de prédiction donnée par la focalisation. Pour cela, nous avons fait le choix d'utiliser une loi de commande quadratique optimale finie d'ordre N (N correspond à l'horizon de la loi de commande) car nous recherchons la consigne qui minimise l'erreur latérale et angulaire entre la trajectoire nominale (définie par l'application) et la position du véhicule.

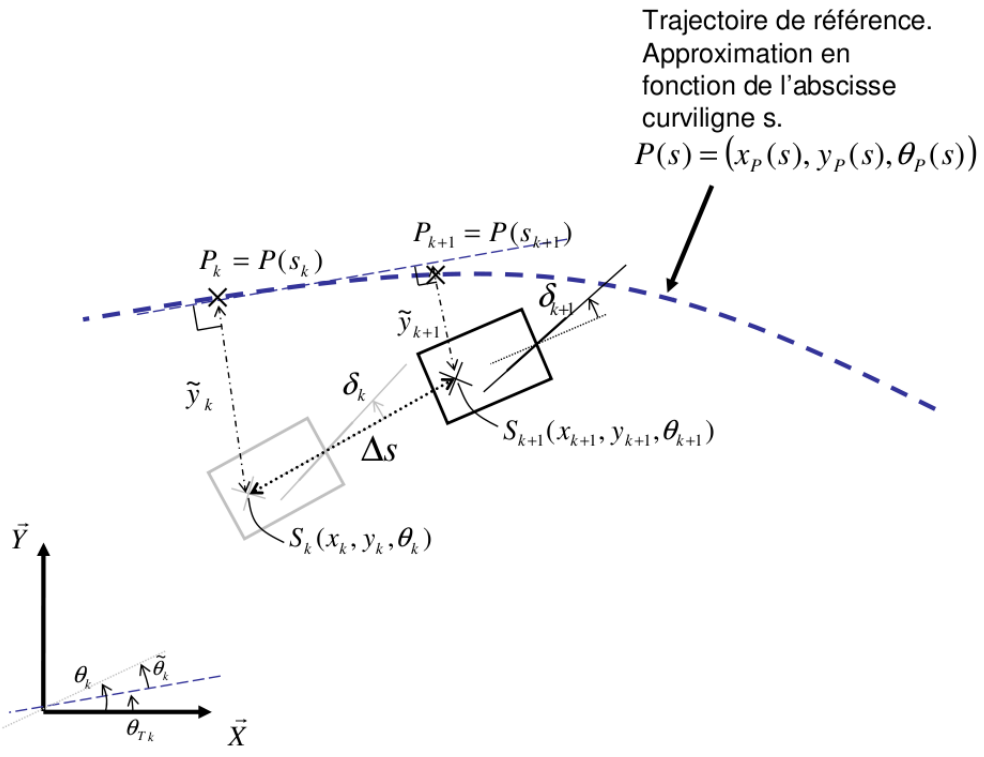


FIGURE 3.8 – Détermination de la commande du véhicule

Dans un premier temps, nous devons rechercher la commande (angle de braquage avant noté $U_n = \delta_n^c$) qui permet de suivre la trajectoire de

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

référence P. Pour cela, nous avons préalablement approximé P en fonction de l'abscisse curviligne s. Nous obtenons l'équation (3.18).

$$P(s) = (x_P(s), y_P(s), \theta_P(s))^T \tag{3.18}$$

$x_P(s)$, $y_P(s)$ et $\theta_P(s)$ sont des fonctions continues et dérivables dans $\mathbb{R}^+$. Dans ce cas, l'objectif est de minimiser l'écart latéral (noté $\tilde{y}$) et l'écart angulaire (noté $\tilde{\theta}$) entre le véhicule et la trajectoire de référence P pour tout l'horizon N. Soit $Y_k = (\tilde{y}_k, \tilde{\theta}_k, \delta_k)^T$ le vecteur d'état de la loi de commande. Le critère de commande (noté J_c) à minimiser s'écrit par la formule (3.19).

$$J_c = Y_N^T.S_c.Y_N + \sum_{k=0}^{N-1} Y_k^T.Q_c.Y_k + U_k^T.R_c.U_k \tag{3.19}$$

Cette formule se compose de trois termes correspondant aux contraintes de la minimisation. Le premier terme correspond à la contrainte terminale correspondant à l'état final. La matrice S_c est une matrice carrée semi définie positive d'ordre égal à la taille du vecteur Y (dans notre cas, S_c est d'ordre 3). Les éléments diagonaux de cette matrice correspondent aux termes de pondération de chaque élément du vecteur Y. Le deuxième terme correspond à la contrainte dynamique. De même que pour la matrice S_c, la matrice Q_c représente la pondération de chaque élément de Y. Dans notre cas, nous avons fait le choix de prendre $Q_c = S_c$. Le dernier terme correspond à la contrainte énergétique. R_c est une matrice carrée semi définie positive d'ordre égal à la taille du vecteur de commande U (dans notre cas d'ordre 1). En effet, dans ce cas on recherche qu'à contrôler l'angle de braquage. L'objectif maintenant est donc de trouver la commande U_k en fonction de l'état Y_k. Lorsque $k = N$, le critère à minimiser est :

$$J_{c_N} = Y_N^T.S_c.Y_N \tag{3.20}$$

Or ce critère ne dépend pas de U_N. Nous allons prendre $k = N - 1$, alors il faut minimiser l'équation (3.21) en fonction de U_{N-1}.

$$J_{c_{N-1}} = Y_N^T.S_c.Y_N + Y_{N-1}^T.Q_c.Y_{N-1} + U_{N-1}^T.R_c.U_{N-1} \tag{3.21}$$

A ce moment, il nous faut connaître la fonction d'évolution entre les états Y_N et Y_{N-1}. La figure 3.8 représente le passage entre deux états successifs. Sous l'hypothèse que $\Delta s << L$, nous obtenons la relation suivante pour l'instant k :

$$\tilde{y}_{k+1} = \tilde{y}_k - \Delta s.sin(\tilde{\theta}_k) \tag{3.22}$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

La relation liant $\tilde{\theta}_{k+1}$ et l'état Y_k est plus difficile à obtenir. Nous savons que $\tilde{\theta}_{k+1}$ représente l'écart angulaire entre le cap du véhicule θ_{k+1} et celui de la trajectoire de référence $\theta_{P,k+1} = \theta_P(s_{k+1})$ d'où nous avons :

$$\tilde{\theta}_{k+1} = \theta_{k+1} - \theta_{P,k+1} \tag{3.23}$$

D'après le modèle cinématique du véhicule précédemment illustré, nous avons :

$$\theta_{k+1} = \theta_{k+1} + \frac{\Delta s}{L}.tan(\delta_k) \tag{3.24}$$

Il nous faut à présent trouver la relation entre $\theta_{P,k+1} = \theta_P(s_{k+1})$ et $\theta_{P,k} = \theta_P(s_k)$. En négligeant la courbure de la trajectoire de référence, on obtient :

$$s_{k+1} = s_k + \Delta s.cos(\tilde{\theta}_k) \tag{3.25}$$

Comme la fonction θ_P est une fonction continue et dérivable et l'échantillonnage Δs est petit, on peut écrire la relation suivante.

$$\begin{aligned}
\theta_{P,k+1} &= \theta_P(s_{k+1}) && (3.26)\\
&\approx \theta_P\left(s_k + \Delta s.cos(\tilde{\theta}_k)\right) && (3.27)\\
&\approx \theta_P(s_k) + \frac{d\theta_P(s_k)}{ds}.\Delta s.cos(\tilde{\theta}_k) && (3.28)\\
&= \theta_{P,k} + \frac{d\theta_{P,k}}{ds}.\Delta s.cos(\tilde{\theta}_k) && (3.29)
\end{aligned}$$

En rapportant les équations (3.24) et (3.29) dans (3.23), nous obtenons :

$$\begin{aligned}
\tilde{\theta}_{k+1} &= \theta_k + \frac{\Delta s}{L}.tan(\delta_k) - \theta_{P,k} - \frac{d\theta_{P,k}}{ds}.\Delta s.cos(\tilde{\theta}_k) && (3.30)\\
&= \tilde{\theta}_k + \frac{\Delta s}{L}.tan(\delta_k) - \frac{d\theta_{P,k}}{ds}.\Delta s.cos(\tilde{\theta}_k) && (3.31)
\end{aligned}$$

Pour δ_{k+1}, nous utilisons un système du premier ordre avec $a = exp(-Te/\tau)$.

$$\delta_{k+1} = a.\delta_k + (1-a).\delta_k^c \tag{3.32}$$

Finalement, nous obtenons :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$Y_{k+1} = \begin{pmatrix} \tilde{y}_{k+1} \\ \tilde{\theta}_{k+1} \\ \delta_{k+1} \end{pmatrix} \tag{3.33}$$

$$= \begin{pmatrix} g_1(Y_k, U_k) \\ g_2(Y_k, U_k) \\ g_3(Y_k, U_k) \end{pmatrix} \tag{3.34}$$

$$= \begin{pmatrix} \tilde{y}_k - \Delta s.sin(\tilde{\theta}_k) \\ \tilde{\theta}_k + \frac{\Delta s}{L}.tan(\delta_k) - \frac{d\theta_{P,k}}{ds}.\Delta s.cos(\tilde{\theta}_k) \\ a.\delta_k + (1-a).\delta_k^c \end{pmatrix} = g(Y_k, U_k) \tag{3.35}$$

Cependant, la fonction g est non-linéaire. C'est la raison pour laquelle nous utilisons une approximation de Taylor d'ordre 1 pour obtenir la relation suivante.

$$Y_{k+1} = A.Y_k + B.U_k \tag{3.36}$$

avec A la jacobienne de la fonction g par rapport à l'état Y et B la jacobienne de la fonction g par rapport à la commande U.

Les équations 3.36 et 3.21 nous permettent d'avoir :

$$J_{c_{N-1}} = (A.Y_{N-1} + B.U_{N-1})^T .S_c.\,(A.Y_{N-1} + B.U_{N-1}) + Y_{N-1}^T.Q_c.Y_{N-1} + U_{N-1}^T.R_c.U_{N-1} \tag{3.37}$$

Nous cherchons à minimiser $J_{c_{N-1}}$ par rapport à U_{N-1} c'est-à-dire trouver U_{N-1} tel que $\frac{dJ_{c_{N-1}}}{dU_{N-1}} = 0$. On trouve la relation suivante :

$$U_{N-1} = -(R_c + B^T.S_c.B)^{-1}.B^T.S_c.A.Y_{N-1} \tag{3.38}$$

Par récurrence, on aura :

$$U_{k-1} = -(R_c + B^T.S_c.B)^{-1}.B^T.T_k.A.Y_{k-1} \tag{3.39}$$

avec :

$$T_k = A^T.T_{k+1}.A - A^T.T_{k+1}.B.(R + B^T.T_{k+1}.B)^{-1}.B^T.T_{k+1}.A + Q_c \tag{3.40}$$

La commande U_{k-1} dépend de T_k qui dépend de T_{k+1}. On calcule donc les T_k par récurrence en partant de $T_N = S_c$. Ce résultat est l'expression classique de la consigne calculée à partir d'une commande quadratique optimale à horizon fini.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Ainsi, nous obtenons la succession de commande $(U_n, U_{n+1}, ..., U_{n+N})$. Nous utilisons la commande U_n correspondant à la consigne à appliquer au véhicule pour prédire la position suivante du véhicule grâce à sa fonction d'évolution (la fonction $f : S_{k+1} = f(S_k, U_k)$ dans la section 3.3.2). Puis, nous déterminons la série de N commandes à la position prédite pour déterminer les états suivants. Ainsi de suite, le système calculera ces commandes jusqu'à avoir atteint la distance de prédiction recommandée par l'application.

Influence de N

L'indice de prédiction N est important. En effet comme la fonction g (équation 3.35) est non linéaire, nous avons linéarisé autour d'un point de fonctionnement. Or le principe de cette linéarisation est d'autant plus juste que l'on reste proche de l'état où nous avons linéarisé. En supposant que l'on ne change pas les jacobiennes, cela entraîne que le déplacement doit être relativement petit. Or notre pas d'échantillonnage correspond à la densité de la grille d'élévation ($20cm$) donc il faut que l'indice N soit petit aussi. Cependant, au regard de notre fonction d'évolution g, la commande U aura une influence sur l'écart latéral après trois itérations successives du système c'est pourquoi on a choisi de prendre comme horizon de temps de la loi de commande $N = 3$ c'est-à-dire $60cm$ dans notre cas.

3.3.4 Générateur de trajectoires parallèles

Principe

Nous avons vu comment générer une trajectoire compatible avec le modèle cinématique du véhicule. Cette trajectoire est formée par une succession de commandes calculées pour asservir le véhicule sur une trajectoire. Maintenant, il faut que le système soit en mesure de générer d'autres trajectoires afin d'avoir le choix parmi un ensemble significatif. Il nous faut trouver un ensemble de trajectoires assez restreint pour être temps-réel mais en accord avec notre application. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser des trajectoires parallèles à celle de référence en adaptant la loi de commande précédemment expliquée. En effet, une trajectoire parallèle correspond à un écart latéral constant non nul. La trajectoire qui rallie la trajectoire de référence fait aussi partie de cet ensemble (écart latéral nul). Par conséquent, si nous voulons générer une trajectoire parallèle avec un écart latéral Γ en utilisant la même loi de commande que présenté précédemment, il suffit de remplacer $\tilde{y}_k$ par $\tilde{y}_k - \Gamma$ dans le vecteur d'état Y_k.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Influence des matrices S_c, Q_c, et R_c

Lors de l'analyse de la loi de commande quadratique optimale à horizon fini, nous avons utilisé les matrices S_c, Q_c et R_c. Maintenant, nous allons voir l'influence que donnent ces matrices. Nous allons tout d'abord nous intéresser à Q_c et S_c. Ces matrices correspondent à la pondération à effectuer sur les termes à minimiser. S_c correspond à l'état final, tandis que Q_c correspond aux états transitoires. Dans notre cas, nous avons fait le choix de prendre $S_c = Q_c$. Les éléments diagonaux correspondent aux termes de pondération de l'écart latéral ($S_{\tilde{y}}$) et de l'écart angulaire ($S_{\tilde{\theta}}$) entre le véhicule et la trajectoire de référence. L'influence de l'angle de braquage n'est pas pris en compte ($S_{\tilde{\delta}} = 0$). Nous avons :

$$S = Q = \begin{pmatrix} S_{\tilde{y}} & 0 & 0 \\ 0 & S_{\tilde{\theta}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{3.41}$$

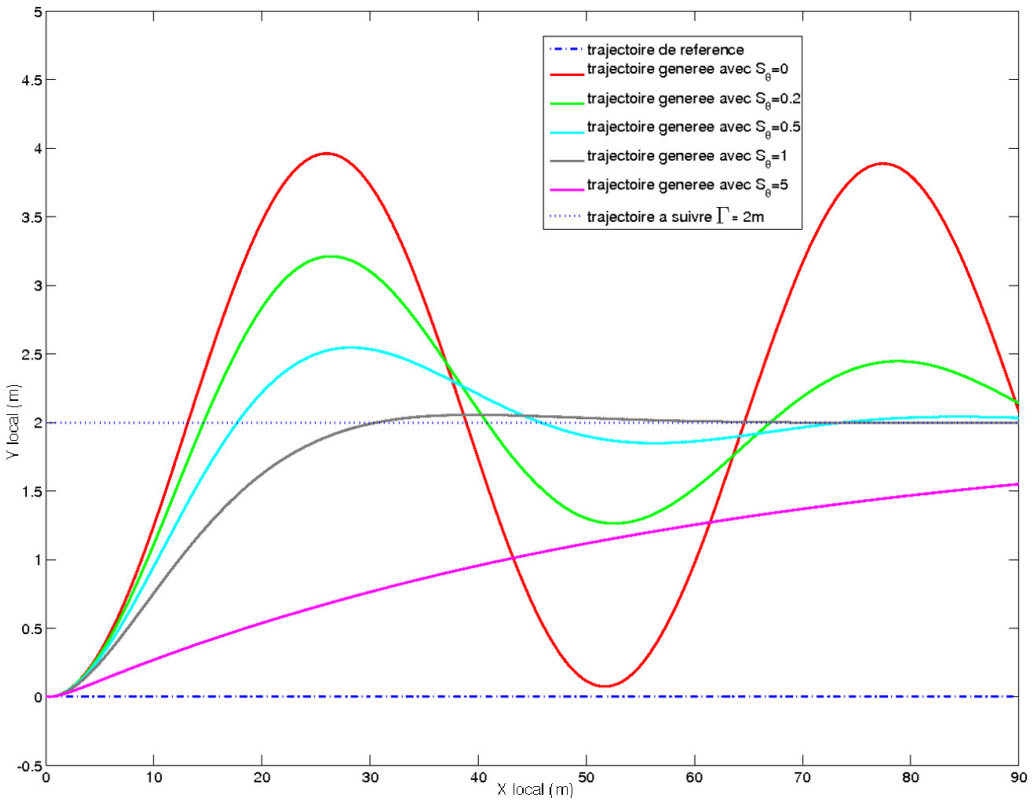


FIGURE 3.9 – Différentes prédictions de la trajectoire parallèle à celle de référence d'écart latéral $\Gamma = 2m$ en fonction des valeurs de minimisation de l'écart angulaire S_θ

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Sur la figure 3.9, nous montrons la prédiction de la trajectoire générée pour atteindre la trajectoire parallèle de distance $\Gamma = 2m$ pour différents termes de pondération de l'écart angulaire $S_{\tilde{\theta}}$ (avec $S_{\tilde{y}} = 1$).

On remarque que l'effet du terme de pondération a une importance sur la stabilité du système. Cela s'explique par le fait que le véhicule est non holonome. Si l'on ne prend pas en compte l'écart angulaire, la consigne de commande va très rapidement atteindre la valeur de consigne mais ne va pas pouvoir se stabiliser. Cela provoque un dépassement important et le véhicule se met à osciller autour de la consigne. La trajectoire devient alors instable. On peut remarquer que plus on prend en compte le terme de pondération de l'écart latéral plus le dépassement est faible. On remarque que le comportement ressemble à un système du deuxième ordre pour lequel le terme de pondération de l'écart angulaire correspondrait au coefficient d'amortissement du système.

La matrice R_c a aussi une importance dans l'élaboration de la loi de commande (figure 3.10). Cette matrice correspond à un terme d'effort par rapport à la commande. L'angle des roues avant est compris entre un certain intervalle $[\delta_{MIN}; \delta_{MAX}]$. Or la loi de commande peut tout à fait trouver la solution optimale en dehors de cet intervalle. Le terme R_c va donc limiter l'évolution de l'angle directeur pour réduire les oscillations mais aussi pour diminuer l'angle de braquage maximum. La figure 3.11 montre des trajectoires pour différentes valeurs de R_c. On remarque que même pour une réponse rapide et stable du système, nous pouvons obtenir un angle de braquage dépassant les limites autorisées par la mécanique du véhicule. C'est la raison pour laquelle, nous règlons le paramètre R_c pour que cet angle de braquage reste dans son domaine d'évolution possible.

Grâce à ces matrices, l'opérateur pourra générer des trajectoires qui prennent en compte les capacités cinématiques du véhicule tout en ayant les commandes du robot associées à ces trajectoires. La figure 3.12 montre les résultats obtenus pour 21 trajectoires générées parallèlement à la trajectoire de référence.

3.3.5 Conclusions sur la génération de trajectoires

Dans cette partie, nous avons montré une méthode pour générer des trajectoires parallèles à la trajectoire de référence mais couvrant la partie du couloir de navigation que le véhicule peut traverser. Nous avons privilégié de générer des trajectoires parallèles à celle de référence pour assurer une stabilité de commande et avoir un ensemble restreint de trajectoires (30 maximum) que l'on peut considérer comme canonique. La méthode proposée, basée sur le calcul d'une loi de commande du véhicule, permet à la fois de déterminer

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

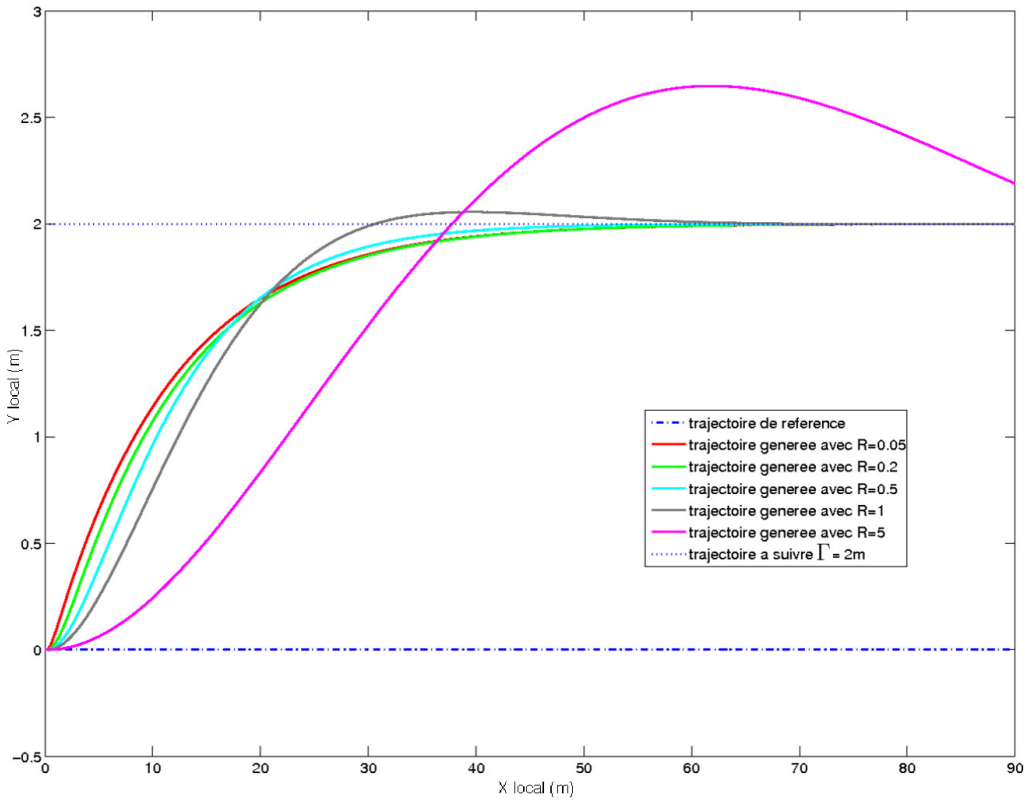


FIGURE 3.10 – Différentes prédictions de la trajectoire pour un échelon de $\Gamma = 2m$

des trajectoires "alternatives" à celle de référence et les commandes du robot associées. Ainsi une fois les trajectoires générées et la sélection de la plus optimale faite, le système aura directement accès à sa commande associée pour la suivre sans réaliser une étape supplémentaire de suivi de trajectoire.

A cette étape du processus, nous avons déterminé la zone d'analyse nécessaire pour assurer l'intégrité physique du véhicule lors de son déplacement. Dans cette zone, nous avons généré des trajectoires compatibles avec le modèle cinématique du robot. Pour chacune d'entre elles nous devons à présent estimer le profil de vitesse garantissant l'intégrité du véhicule.

3.4 Profil de vitesse admissible

Nous recherchons à déterminer l'espace des vitesses admissibles pour un environnement donné. Pour cela, nous avons choisi de générer des trajectoires réalisables par le véhicule par le biais d'une loi de commande. Cette étape nous a permis d'avoir un ensemble de trajectoires représentatif de l'objectif.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

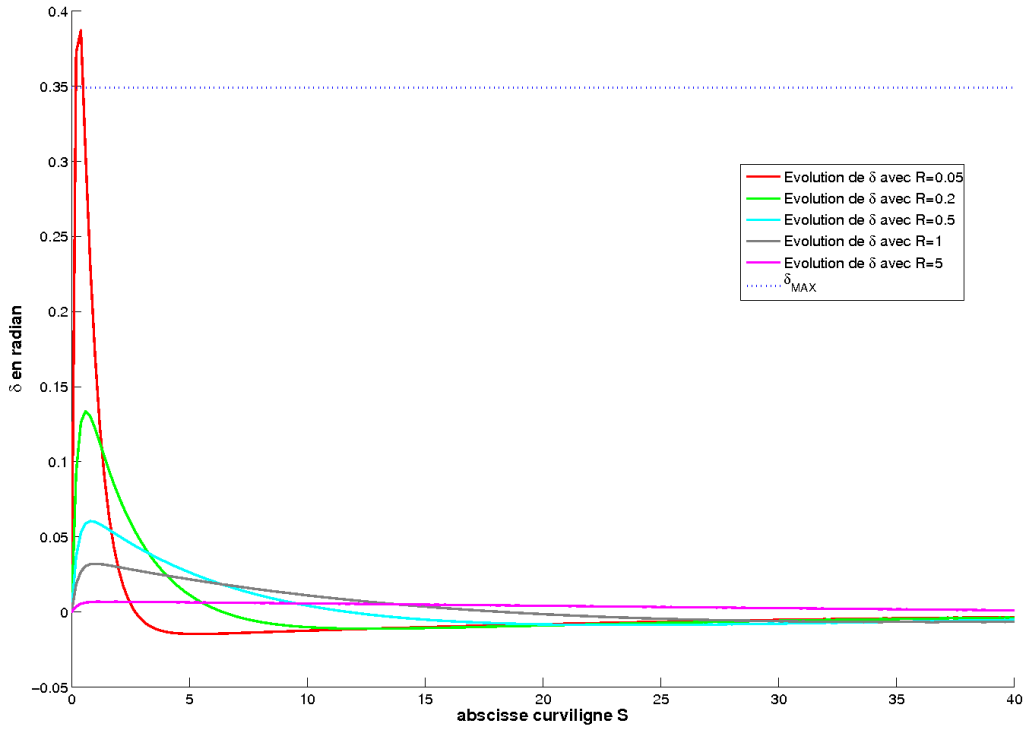


FIGURE 3.11 – Evolution de l'angle de braquage δ pour différentes valeurs de R_c

Maintenant, il nous faut déterminer le profil de vitesses admissible pour chacune d'entre-elles. L'ensemble des trajectoires générées et leur profil de vitesses associés forment l'espace des vitesses admissibles présenté dans la partie 3.1.

Durant cette étape, le système utilise la reconstruction de son environnement proche. Puis, il détermine les poses successives du robot afin d'estimer l'évolution du tangage et du roulis pour le véhicule évoluant le long de ces trajectoires. Au final, il détermine à quelle vitesse le véhicule doit avancer pour préserver son intégrité physique.

3.4.1 Grille d'élévation

Durant cette phase, la tâche de perception du système renvoie les points 3D de la zone d'attention définie auparavant. Ces points sont directement intégrés dans une grille d'élévation qui correspond à la variation d'altitude de l'environnement par rapport au véhicule. Il s'agit d'une carte locale. Sa densité sera au maximum de l'ordre d'un tiers du diamètre de la roue correspondant à la limite maximum pour laquelle le véhicule pourra franchir une marche. Le système de perception remplit cette grille. Or il peut survenir que cette

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

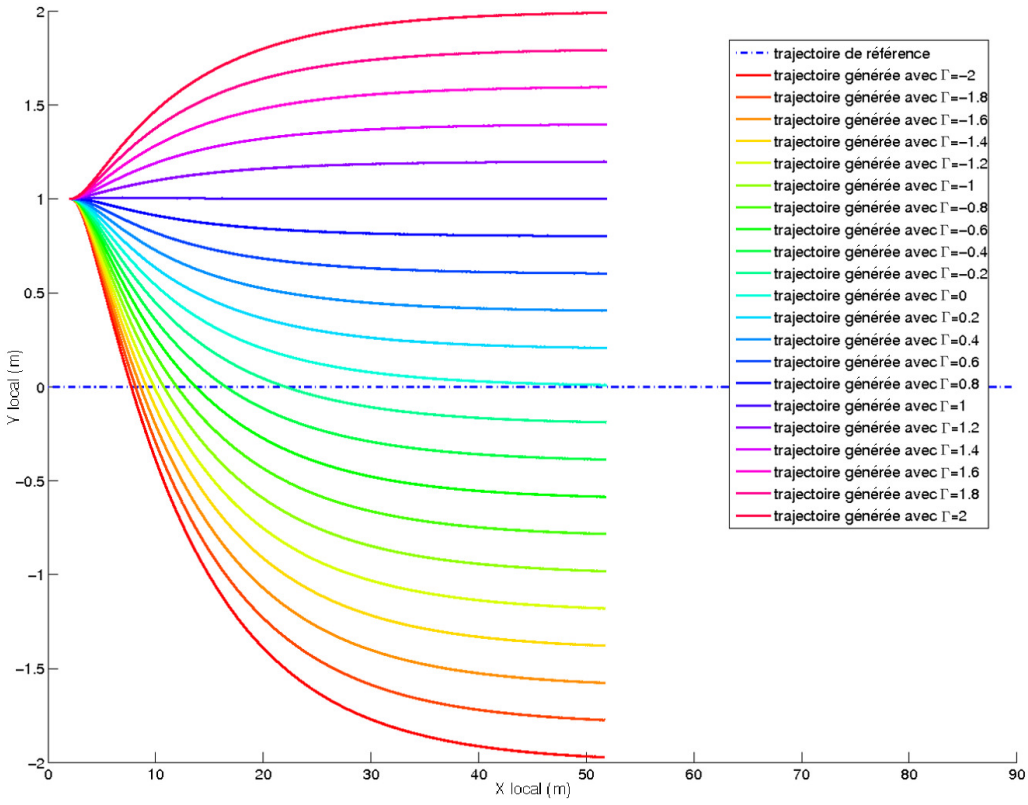


FIGURE 3.12 – Résultat obtenu pour la génération de 21 trajectoires parallèles à celle de référence

grille ait des cases non renseignées à cause de données abérantes ou masquage de la zone. Dans ce cas, le système considère que la profondeur est $-\infty$. Ces cases peuvent être trop nombreuses et rendre le système inefficace. C'est pourquoi nous utilisons la forme géométrique de la roue afin de combler ces vides. Cela consiste à appliquer une méthode de morphologie mathématique fréquemment utilisée dans le traitement d'image ([Schmitt 1993]). Nous avons donc un élément structurant (dans notre cas ici la roue du véhicule) et nous l'appliquons à notre grille. Pour cela, nous déterminons la courbure entre trois cases successives et comparons le résultat obtenu avec le rayon de la roue. Un exemple est exposé sur la figure 3.13. Il s'agit donc de déterminer la courbure de trois cases successives de la grille d'élévation dans la direction du véhicule.

Afin de déterminer cette courbure, nous utilisons la fonction r passant par les trois valeurs des cases grâce à une parabole ($r(s) = a_r.s^2 + b_r.s + c_r$). Le choix d'utilisation de la parabole est dû à la facilité de déterminer sa courbure en zéro. De plus, il est très facile de déterminer les termes a_r, b_r et c_r. En effet, le système à résoudre est exprimé dans l'expression 3.42.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

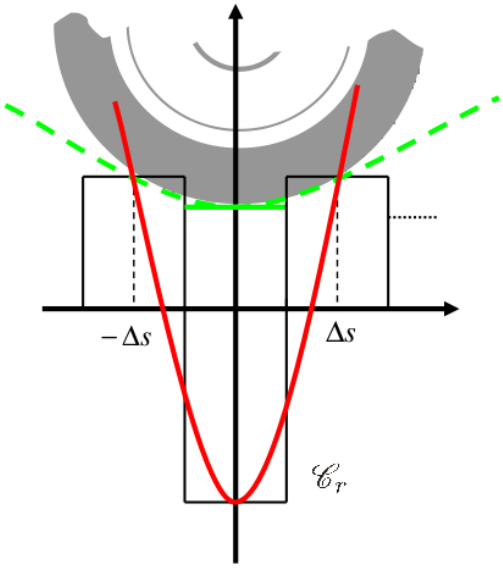


FIGURE 3.13 – Illustration du filtrage du MNT par rapport à la roue du véhicule

$$\left\{\begin{array}{rcccl} r(-\Delta s) & = & a_r.(-\Delta s)^2 + b_r.(-\Delta s) + c_r & = & h_{i-1} \\ r(0) & = & c_r & = & h_i \\ r(\Delta s) & = & a_r.(\Delta s)^2 + b_r.(\Delta s) + c_r & = & h_{i+1} \end{array}\right. \tag{3.42}$$

On en déduit la solution :

$$\left\{\begin{array}{rcc} a_r & = & \frac{h_{i+1}-2.h_i+h_{i-1}}{2.\Delta s^2} \\ b_r & = & \frac{h_{i+1}-h_{i-1}}{2.\Delta s} \\ c_r & = & h_i \end{array}\right. \tag{3.43}$$

Pour une fonction y de classe C^2 dans $\mathbb{R}$, on peut facilement trouver l'expression de sa courbure $\mathscr{C}_y$ qui est donnée par l'expression 3.44.

$$\mathscr{C}_y(s) = \frac{y''(s)}{(1+y'(s)^2)^{\frac{3}{2}}} \tag{3.44}$$

Soit dans notre cas, nous avons $\mathscr{C}_r$ exprimée par l'équation 3.45.

$$\mathscr{C}_r = \frac{r''(0)}{(1+r'(0)^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{2.a_r}{(1+b_r^2)^{\frac{3}{2}}} \tag{3.45}$$

Si la courbure $\mathscr{C}_r > \frac{1}{R_{roue}}$ alors cela signifie que la courbure du MNT n'épouse pas la roue donc nous pouvons le filtrer en posant $\mathscr{C}_r = \frac{1}{R_{roue}}$. La hauteur de la case étudiée $\hat{h}_i$ est alors déterminée par l'expression 3.46.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$\hat{h}_i = \frac{1}{2}.\left(h_{i+1} + h_{i-1} - \frac{(1+b_r^2)^{\frac{3}{2}}}{R_{roue}}.\Delta s^2\right) \tag{3.46}$$

Au final, nous obtenons une grille d'élévation lissée par rapport au rayon de la roue dans la direction du véhicule.

3.4.2 Posé de robot

Grâce au MNT que nous venons de filtrer, il est possible de déterminer pour chaque trajectoire générée les courbes de tangage et de roulis du véhicule. Pour cela, nous proposons de calculer la pose du robot de la manière suivante :

1. projections orthogonales des positions des quatre roues du véhicule sur le MNT ;
2. calcul du plan médian des points obtenus ;
3. filtrage des poses abérantes (différence entre un point de projection et le plan médian supérieur aux débattements des suspensions). En effet, si l'erreur commise est supérieure à ce débattement, alors la trajectoire calculée est impraticable et le système ne suivra en aucun cas ce chemin.

Nous obtenons à la fin de cette étape les évolutions du tangage et du roulis pour chaque trajectoire générée. Nous allons maintenant filtrer ces valeurs grâce à un élément présent sur quasiment tous les véhicules terrestres, nous parlons des suspensions.

3.4.3 Filtrage des évolutions du tangage et du roulis grâce à la prise en compte des suspensions

Motivation

A cette étape, nous avons obtenu les évolutions du tangage et du roulis pour toutes les trajectoires générées. Ces évolutions sont calculées avec l'hypothèse d'un véhicule indéformable c'est-à-dire sans les suspensions. Cette hypothèse entraîne un profil de vitesse plus sensible aux irrégularités du terrain. Or, des études (par exemple [Cui 2010] ou [Lu 2007]) ont montré que les suspensions apportaient une diminution des variations du tangage et par conséquent une augmentation significative du confort. C'est pourquoi nous utilisons l'effet filtrant des suspensions sur les évolutions du tangage et du roulis.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Modélisation des suspensions

Nous étudions les effets des suspensions uniquement sur le tangage du véhicule noté ψ_f. Dans cette étude, nous avons donc ψ_e comme entrée du filtre qui correspond à l'évolution du tangage à la sortie du posé de robot. Soit k le coefficient de raideur, λ le coefficient visqueux des suspensions et Z_0 la longueur libre du ressort. Le schéma du modèle est donnée à la figure 3.14.

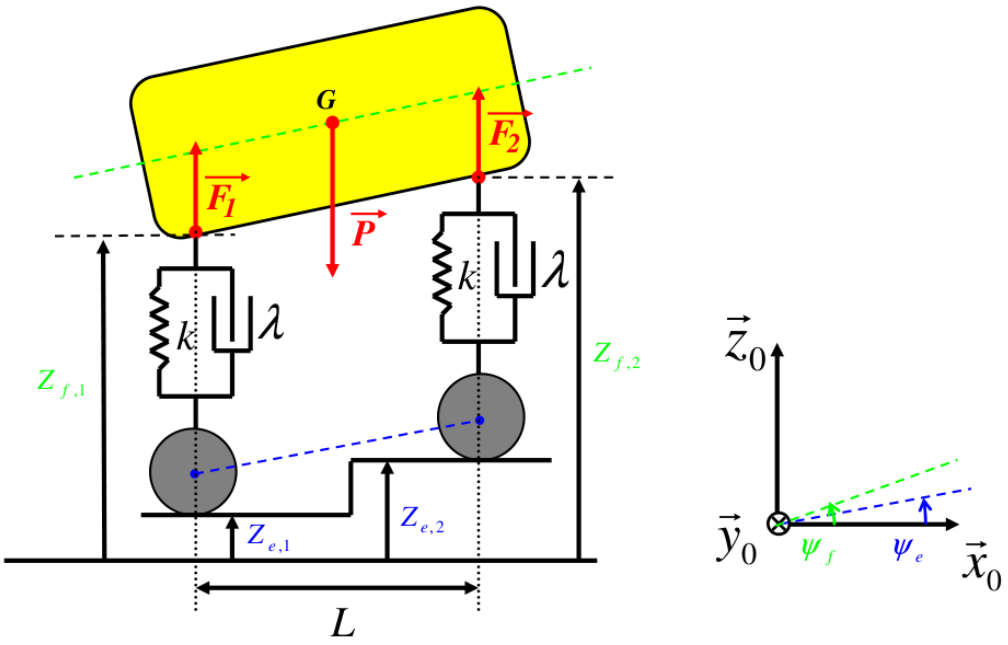


FIGURE 3.14 – Schéma du véhicule et de ses suspensions pour établir le modèle du filtre en tangage

Le bilan des forces nous donne :

- $\vec{P} = m.\vec{g} = -m.g.\vec{z_0}$ le poids du véhicule ;
- $\vec{F_1} = \left(-k.(Z_{f,1} - Z_{e,1} - Z_0) - \lambda.\frac{d(Z_{f,1}-Z_{e,1})}{dt}\right).\vec{z_0}$ l'action de la suspension arrière sur le véhicule ;
- $\vec{F_2} = \left(-k.(Z_{f,2} - Z_{e,2} - Z_0) - \lambda.\frac{d(Z_{f,2}-Z_{e,2})}{dt}\right).\vec{z_0}$ l'action de la suspension avant sur le véhicule.

Durant un échantillon de Δs, nous appliquons le principe fondamental de la dynamique sur les moments au centre d'inertie G. Nous obtenons :

$$\sum \vec{M}_{G/Vehicule} = \frac{d\vec{\sigma}}{dt} \tag{3.47}$$

Dans notre cas, nous avons sur l'axe $\vec{y_0}$:

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$\begin{array}{c} -\frac{L}{2}.\left(-k.(Z_{f,1}-Z_{e,1}-Z_0)-\lambda.\frac{d(Z_{f,1}-Z_{e,1})}{dt}\right)+0.\left\|\vec{P}\right\|+... \\ \frac{L}{2}.\left(-k.(Z_{f,2}-Z_{e,2}-Z_0)-\lambda.\frac{d(Z_{f,2}-Z_{e,2})}{dt}\right)=I_y.\ddot{\psi}_f \end{array} \quad (3.48)$$

Or durant l'intervalle d'échantillonnage les paramètres d'entrée sont constants, donc nous avons :

$$\frac{dZ_{e,2}}{dt} = 0 \quad (3.49)$$

$$\frac{dZ_{e,1}}{dt} = 0 \quad (3.50)$$

De plus, nous pouvons facilement déterminer que :

$$tan(\psi_e) = \frac{Z_{e,2}-Z_{e,1}}{L} \quad (3.51)$$

$$tan(\psi_s) = \frac{Z_{s,2}-Z_{s,1}}{L} \quad (3.52)$$

Cependant, comme le débattement des suspensions est faible (environ $10cm$), nous pouvons affirmer que les valeurs de ψ_e et ψ_s seront faibles ($\psi_{e_{max}} = atan(0.1/1.2) = 0.08$). Nous pouvons considérer la fonction tangente comme une fonction linéaire dans la plage possible de ces valeurs, cela entraîne :

$$\psi_e = \frac{Z_{e,2}-Z_{e,1}}{L} \quad (3.53)$$

$$\psi_s = \frac{Z_{s,2}-Z_{s,1}}{L} \quad (3.54)$$

Grâce à ces hypothèses simplificatrices, nous obtenons finalement l'équation différentielle suivante :

$$I_y.\ddot{\psi}_f + \frac{\lambda}{2}.\dot{\psi}_f + \frac{k}{2}.\psi_f = \frac{k}{2}.\psi_e \quad (3.55)$$

Ceci équivaut à :

$$\frac{1}{\omega^2}.\frac{d^2\psi_f}{dt^2} + \frac{2.\varepsilon}{\omega}.\frac{d\psi_f}{dt} + \psi_f = \psi_e(t) \quad (3.56)$$

avec : $\omega = \sqrt{\frac{k}{2.I_y}}$ et $\varepsilon = \frac{\lambda}{2.\sqrt{2.k.I_y}}$

A ce moment de l'analyse, il faut résoudre cette équation différentielle d'ordre 2. Nous utilisons une méthode classique de résolution. Tout d'abord, on recherche la solution de l'équation homogène (H) donnée par :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$\frac{1}{\omega^2}.\frac{d^2\psi_f}{dt^2} + \frac{2.\varepsilon}{\omega}.\frac{d\psi_f}{dt} + \psi_f = 0 \tag{3.57}$$

Cela se résout par le calcul du polynôme p d'ordre 2 tel que :

$$p(r) = \frac{1}{\omega^2}.r^2 + \frac{2.\varepsilon}{\omega}.r + \psi_f = 0 \tag{3.58}$$

Le discriminant du polynôme Δ_p est exprimé par :

$$\Delta_p = \left(\frac{2.\varepsilon}{\omega}\right)^2 - 4.\frac{1}{\omega^2} \tag{3.59}$$

$$= \frac{4}{\omega^2}.(\varepsilon^2 - 1) \tag{3.60}$$

Comme $\varepsilon > 1$ nous avons $\Delta_p > 0$. Nous sommes dans le cas d'un régime apériodique d'où le polynôme p a deux solutions qui sont :

$$r_1 = -\omega.(\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 - 1}) \tag{3.61}$$

$$r_2 = -\omega.(\varepsilon - \sqrt{\varepsilon^2 - 1}) \tag{3.62}$$

La solution de l'équation homogène ψ_{f_H} est donnée par :

$$\psi_{f_H} = A.e^{r_1.t} + B.e^{r_2.t} \tag{3.63}$$

avec A et B constantes. Nous devons déterminer une solution particulière de l'équation différentielle ψ_{f_P}, cette solution est de la même forme que $\psi_e(t)$ or durant l'intervalle d'échantillonnage $\psi_e(t) = cst$ cela entraîne que $\psi_{f_P} = psi_e(t)$.

Nous obtenons donc au final la solution suivante :

$$\psi_f(t) = A.e^{r_1.t} + B.e^{r_2.t} + \psi_e(t) \tag{3.64}$$

Afin de déterminer les constantes A et B, nous utilisons les conditions initiales $\psi_f(0)$ et $\dot{\psi_f}(0)$.

Principe du filtre

Nous avons à la sortie du posé de robot les évolutions du tangage échantillonnée ψ_e sur un pas d'abscisse curviligne Δs sur un horizon de N pas. Nous connaissons grâce à la tâche de perception le tangage du véhicule et sa dérivée ψ_{f_0} et $\dot{\psi_{f_0}}$. Pour déterminer les valeurs de ψ_f suivantes, nous devons faire :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

- le calcul des constantes A_k et B_k qui sont données par les conditions précédentes $\psi_{f_{k-1}}$ et $\dot{\psi}_{f_{k-1}}$ et le tangage calculé par le posé de robot ψ_{ek}. Le calcul de ces constantes est obtenu par :

$$A_k = \frac{r_2.\psi_{f_{k-1}} - \dot{\psi}_{f_{k-1}} - r_2.\psi_{ek-1}}{r_2 - r_1} \tag{3.65}$$

$$B_k = \frac{-r_1.\psi_{f_{k-1}} - \dot{\psi}_{f_{k-1}} + r_2.\psi_{ek-1}}{r_2 - r_1} \tag{3.66}$$

- le calcul de ψ_{f_k} et $\dot{\psi}_{f_k}$ grâce à A_k et B_k, le pas d'échantillonnage Δs et pour une vitesse V. On obtient les équations suivantes :

$$\psi_{f_k} = A_k.e^{r_1.\frac{\Delta s}{V}} + B_k.e^{r_2.\frac{\Delta s}{V}} + \psi_{ek} \tag{3.67}$$

$$\dot{\psi}_{f_k} = r_1.A_k.e^{r_1.\frac{\Delta s}{V}} + r_2.B_k.e^{r_2.\frac{\Delta s}{V}} \tag{3.68}$$

Puis, il faut recommencer l'opération jusqu'à avoir réalisé les N valeurs de l'horizon de l'estimation. Nous analyserons les résultats obtenus lors du chapitre 4. Nous pouvons tout de même faire une remarque importante. La réponse du filtre dépendra de la vitesse curviligne du véhicule. Prenons un exemple simple, le véhicule évolue sur un sol plat et doit franchir une marche. Cette marche va entraîner une variation du tangage estimée par le posé de robot. En fonction de la vitesse, l'attitude du véhicule ne sera pas identique. Pour une vitesse relativement faible, la variable d'entrée et de sortie du filtre sont quasiment identiques. Mais lorsque la vitesse devient importante, le tangage du véhicule devient très faible, c'est-à-dire que l'effet de la marche sur le véhicule devient négligeable. La figure 3.15 montre les différents résultats obtenus par rapport à l'effet du modèle des suspensions en fonction de la vitesse curviligne du véhicule.

3.4.4 Conditions de stabilité : Transfert de Charge

Pour déterminer le profil de vitesse admissible pour une trajectoire, nous devons choisir un critère évaluant la perte de l'intégrité physique du véhicule. Nous avons choisi d'utiliser le transfert de charge comme indicateur de risque (comme [Bouton 2010]). Le transfert de charge représente la variation des forces exercées sur les pneus. Il s'effectue durant les différentes manœuvres (freinage, virage, etc.) et est dû à des forces appliquées à la surface du pneu parallèlement au revêtement. Nous avons choisi d'utiliser ce critère dans le

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

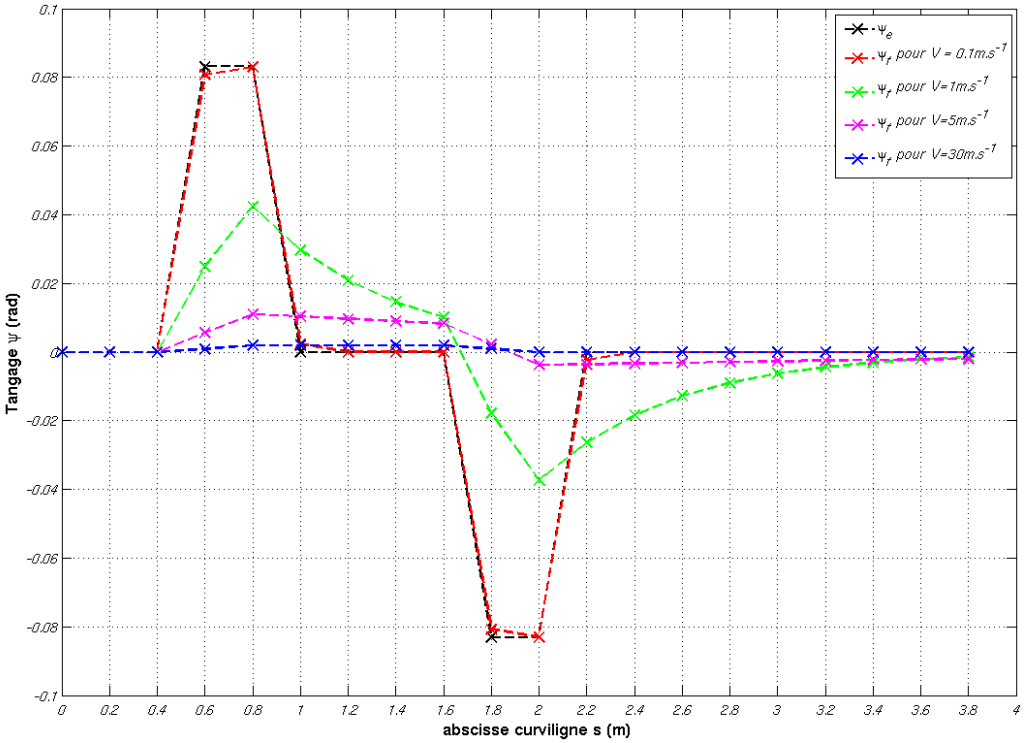


FIGURE 3.15 – Résultats du filtre pour différentes vitesses d'évolution du véhicule : *la courbe noire correspond à l'entrée du filtre, les autres courbes sont les réponses du filtre pour différentes vitesses*

cas latéral et longitudinal. Afin de simplifier les calculs, nous faisons l'hypothèse que le véhicule est indéformable. Le détail des calculs est donné dans l'ANNEXE A.

Au final, le système doit garantir que le transfert de charge dans les cas latéral et longitudinal soit inférieur à un seuil afin de prévenir de toute possibilité de renversement.

3.4.5 Détermination du profil de vitesse

Nous devons déterminer le profil de vitesse pour lequel le véhicule respecte les conditions de stabilité précédemment définies. Toutefois, les différentes évolutions de l'état du robot en fonction de la trajectoire étudiée sont exprimées par rapport à l'abscisse curviligne s. Or les termes exprimés dans les expressions du transfert de charge sont des termes dépendant du temps. Il nous faut donc effectuer un changement de variable entre l'abscisse curviligne et le temps. Soit h une fonction d'évolution exprimée dans l'abscisse curviligne, définie et dérivable deux fois dans $\mathbb{R}$ et l'abscisse curviligne une fonction du

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

temps définie et dérivable deux fois dans $\mathbb{R}^+$. Nous pouvons écrire $h(s(t))$. Grâce à la règle de dérivations des fonctions composées généralisée (formule de Faà di Bruno [Hardy 2006]), on obtient les relations suivantes :

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{dh(s)}{ds}.\frac{ds}{dt} = \frac{dh(s)}{ds}.\dot{s} \tag{3.69}$$

$$\frac{d^2h(t)}{dt^2} = \frac{d^2h(s)}{ds^2}.\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 + \frac{dh(s)}{ds}.\frac{d^2s}{dt^2} = \frac{d^2h(s)}{ds^2}.\dot{s}^2 + \frac{dh(s)}{ds}.\ddot{s} \tag{3.70}$$

Cependant afin de simplifier les calculs et comme l'accélération curviligne $\ddot{s}$ du véhicule est faible (compris entre $-0.7m.s^{-2}$ et $0.7m.s^{-2}$ voir 5.1.3), nous négligeons ce terme. Par conséquent, grâce aux expressions du transfert de charge et aux équations 3.69 et 3.70, nous obtenons le profil de vitesse du véhicule. Ce profil correspond à la vitesse maximale à respecter pour que le véhicule ne se renverse pas.
Ainsi grâce aux expressions du transfert de charge latéral et longitudinal temporelles (exprimées en ANNEXE A), nous pouvons déterminer la vitesse admissible pour chaque pas d'échantillonnage de l'abscisse curviligne.

A fin de cette étape, nous obtenons un profil de vitesses admissible pour chaque trajectoire générée. La commande de vitesse associée à ce profil correspond à la vitesse minimum obtenue.

3.4.6 Admissibilité du profil par rapport aux capacités du véhicule

Nous obtenons le profil de vitesse pour chacune des trajectoires générées. Cependant, bien qu'à cet instant le système soit en mesure de prédire l'évolution de la vitesse pour respecter sa condition d'intégrité physique, il doit aussi respecter ces profils. Pour cela, le système va calculer les accélérations instantanées nécessaires pour atteindre les différentes valeurs constituant le profil. Si V_0 est la vitesse actuelle du véhicule et Vp_k celle correspondante au profil pour le kième pas d'échantillonnage. Nous pouvons en déduire l'accélération instantanée Ap_k pour atteindre Vp_k par la formule :

$$Ap_k = \frac{Vp_k^2 - V_0^2}{k.\Delta S} \tag{3.71}$$

Après avoir calculé Ap_k pour tous les $k \in [1; N]$ (N horizon de prédiction), le système doit les comparer par rapport à la capacité de décélération du véhicule d_{ec}. Si $\forall k \in [1; N], Ap_k > -d_{ec}$, alors le profil de vitesse calculé est admissible par le véhicule. Par contre, si $\exists k$ tel que $Ap_k < -d_{ec}$ alors cela signifie que le véhicule doit freiner plus qu'il ne le peut. Le système ne

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

peut donc pas respecter le profil de vitesse. La trajectoire est alors considérée comme impossible par le système et est donc abandonnée. Elle ne fait donc pas partie de celles possibles lors de la sélection de la trajectoire optimale.

Prenons l'exemple suivant, nous avons calculé le profil de vitesse pour une trajectoire. Cette trajectoire doit être en mesure de franchir une marche dont le système a estimé la vitesse de franchissement de $0.3m.s^{-1}$. Nous calculons les accélérations instantanées pour une vitesse $V_0 = 1m.s^{-1}$ et $V_0 = 2m.s^{-1}$. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 3.16.

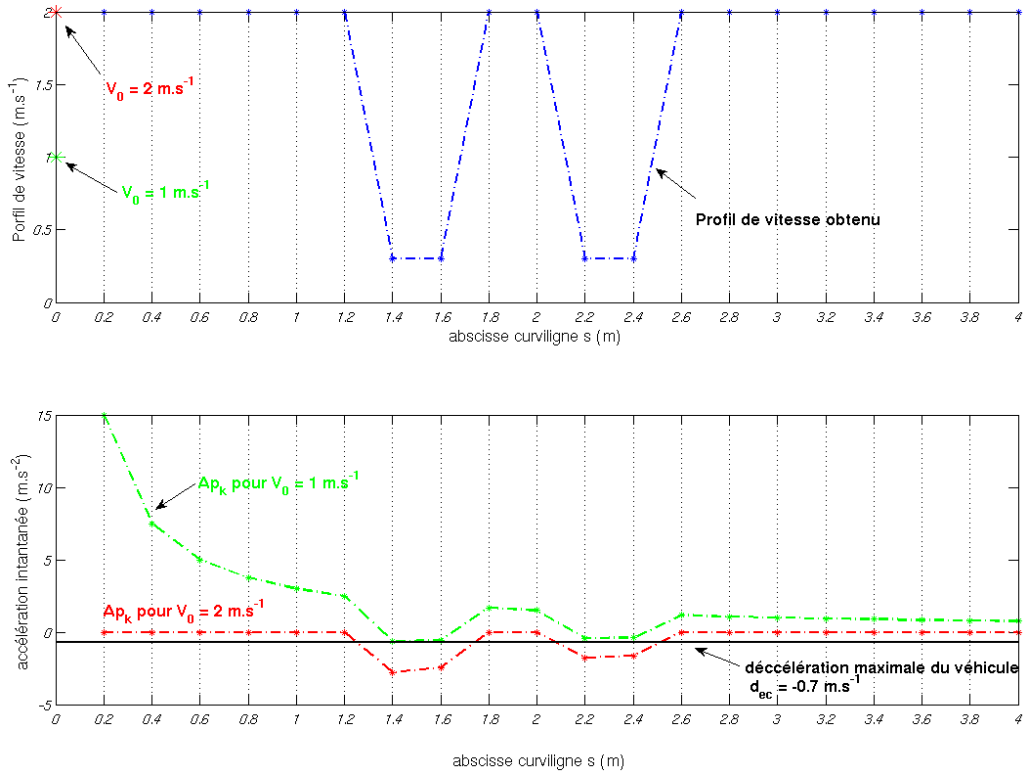


FIGURE 3.16 – Profil de vitesse pour franchir une marche et le calcul de la vitesse instantanée pour deux hypothèses de V_0

Au travers des courbes obtenues, nous apercevons que si le véhicule a une vitesse actuelle de $2m.s^{-1}$, pour respecter le profil il devra freiner de $2.8m.s^{-2}$ ce qui est nettement inférieur à la capacité maximale de décélération du véhicule. Par contre, pour le cas où la vitesse actuelle du véhicule est de $1m.s^{-1}$, la décélération maximale pour atteindre le profil est de $0.67m.s^{-2}$. Dans ce cas, la trajectoire est donc praticable par le véhicule car elle respecte bien ses capacités de décélération tandis que dans l'autre situation la trajectoire n'est pas praticable.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Remarque : Dans cette partie, nous pouvons en déduire une remarque intéressante concernant la tâche cognitive existante entre les tâches de guidage et de perception. Nous remarquons que le système de perception guide indirectement le véhicule. En effet, si la tâche de perception à une distance maximale Do_{max} au-delà de laquelle elle ne peut plus fournir de reconstruction de l'environnement, alors le système limitera naturellement sa vitesse d'évolution. On peut même en déduire une équation liant la vitesse maximum et la distance de perception maximum $V_{max}(Do_{max})$ donnée par l'équation 3.72.

$$V_{max}(Do_{max}) = -d_{ec}.Te.\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.Do_{max}}{d_{ec}.Te^2}}\right) \tag{3.72}$$

Cette remarque peut être corrélée avec l'exemple d'une personne non voyante qui ne peut percevoir son environnement qu'avec sa canne sur une distance d'environ un mètre. En admettant qu'elle puisse passer de la marche à l'arrêt en une seconde et qu'elle mette une demi seconde pour sonder l'environnement avec sa canne, elle peut marcher à une cadence d'environ 4 $km.h^{-1}$ soit à peu près l'allure de la marche normale.

3.4.7 Conclusion

A la fin de cette étape, nous obtenons un profil de vitesse admissible pour chaque trajectoire générée. Afin de simplifier la commande en vitesse et pour une implémentation temps-réelle, la commande de vitesse associée au profil correspondra à la vitesse minimum obtenue dans celui-ci.

3.5 Sélection de la stratégie de commande optimale

Après avoir généré un ensemble de trajectoires parallèles à la trajectoire de référence et évalué leur profil de vitesse admissible, il faut maintenant sélectionner la plus optimale. Pour cela, on a besoin de définir un critère permettant de caractériser notre objectif. Cet objectif est d'aller le plus vite possible d'un point A à un point B en assurant l'intégrité physique du véhicule. Il paraît donc logique que le profil de vitesse ainsi que l'aire entre chaque trajectoire et celle de référence soit un critère important. Nous proposons d'utiliser le critère $J_{selection}$ suivant permettant de minimiser différentes grandeurs liées au fonctionnement de l'application :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$J_{selection} = \alpha.A_{Ec_{LAT}} + \beta.A_{Ec_{VIT}} + \gamma.J_{effort} \tag{3.73}$$

Les termes α,β et γ sont des termes de pondération qui définissent le comportement du véhicule. Ces termes sont à définir par l'opérateur. Les termes $A_{Ec_{LAT}}$, $A_{Ec_{VIT}}$ et J_{effort} sont respectivement l'écart latéral, l'écart vitesse et la dépense énergétique des trajectoires générées.

Etudions plus en détails les différents termes de cette équation.

3.5.1 L'écart latéral : $A_{Ec_{LAT}}$

Ce terme correspond à l'aire géométrique entre la trajectoire de référence et la trajectoire générée. Pour uniformiser le critère, nous avons choisi de la diviser par l'aire entre la trajectoire de référence et la demie largeur du couloir de navigation. L'expression de ce critère est :

$$A_{Ec_{LAT}} = \int_{D_{A_{Max}}} \frac{2}{L_{CN}}.dist(M(s), P(s)).ds \tag{3.74}$$

avec M position du véhicule dans le répère global.

Sur la figure 3.17, nous montrons un exemple de cette composante du critère avec trois trajectoires.

3.5.2 L'écart vitesse : $A_{Ec_{VIT}}$

Un des objectifs du système est de permettre au véhicule d'aller le plus vite possible. Donc, il est essentiel que la vitesse soit un des critères entrant en jeu lors de la sélection. Pour cela, nous utilisons l'aire entre la vitesse maximale du véhicule et le profil de vitesse de la trajectoire. L'illustration de ce critère est donnée sur la figure 3.18.

$$A_{Ec_{VIT}} = \int_{D_{A_{Max}}} (V_{Nom} - P_{vit}(s)).ds \tag{3.75}$$

avec V_{Nom} la vitesse nominale de l'application et P_{vit} le profil de vitesse de la trajectoire générée.

3.5.3 Dépense Energétique : J_{effort}

Il arrive fréquemment que plusieurs trajectoires aient à peu prés la même valeur de critère. Afin d'éviter un comportement oscillant sur la sélection de la meilleure trajectoire, on choisit de prendre en compte un critère énergétique. Il s'agit de la somme des variations de l'angle de braquage au carré durant la distance de prédiction.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

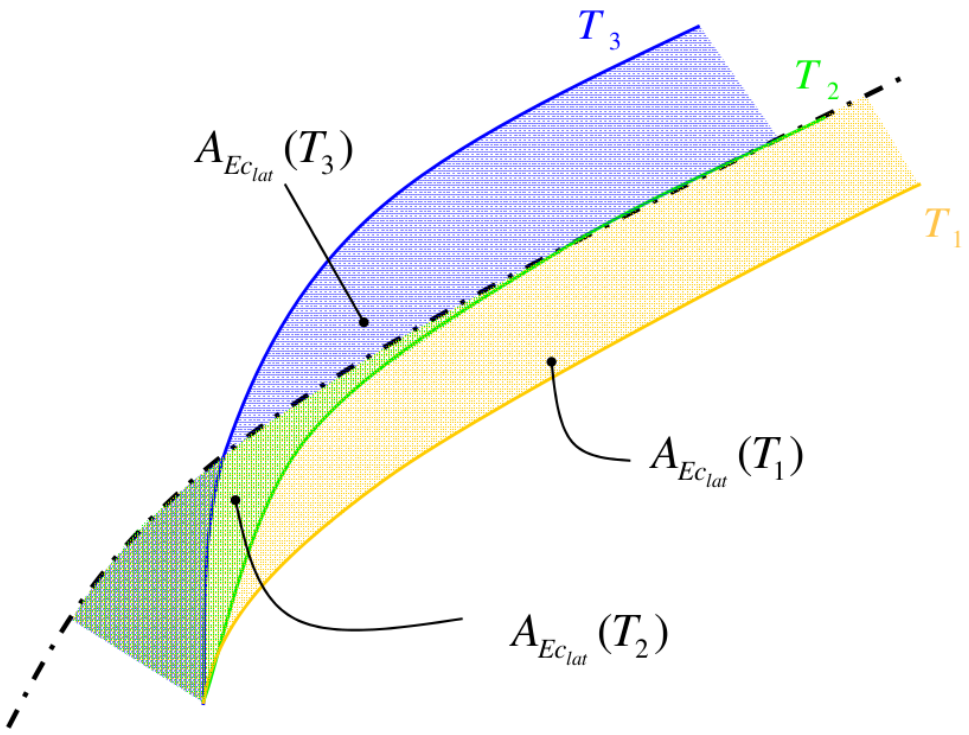


FIGURE 3.17 – Illustration du terme $A_{Ec_{LAT}}$ pour trois trajectoires générées : *dans ce cas la trajectoire optimale est la trajectoire* T_2

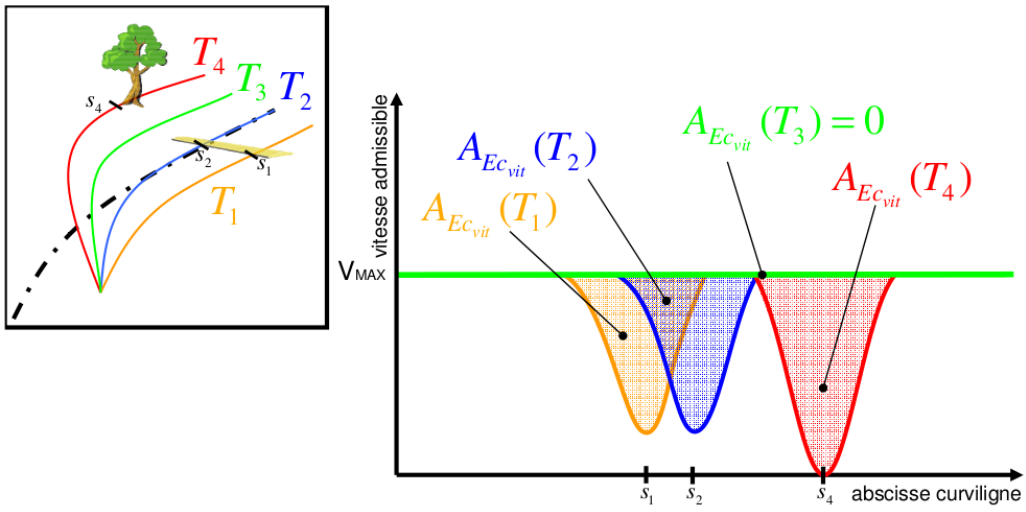


FIGURE 3.18 – Illustration du terme $A_{Ec_{vit}}$ pour quatre trajectoires générées : *la trajectoire optimale dans ce cas est la trajectoire* T_3

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$J_{effort} = \int_{D_{A_{Max}}} \dot{\delta}^2(s).ds \tag{3.76}$$

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail les différentes étapes de la stratégie de navigation permettant de préserver l'intégrité physique du véhicule.

Pour chaque période d'échantillonnage, le système cherche à focaliser son attention afin déterminer la surface de navigation utile pour son application. Sur cette surface, il génère les trajectoires les plus intéressantes. Après le posé de robot et une étape de filtrage dépendant des suspensions du véhicule, il détermine le profil de vitesse admissible pour respecter les différentes contraintes dynamiques (dans notre cas les transferts de charge latéral et longitudinal). Puis, il sélectionne la meilleure trajectoire par la minimisation d'un critère définissant le comportement souhaité du robot.

Nous proposons maintenant de tester ces développements sur notre véhicule AROCO. Afin de considérer un grand nombre de scénarios et d'avoir des situations totalement reproductibles, nous commencerons nos tests dans un cadre donné par un simulateur robotique.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 4

Analyse du comportement du véhicule dans un environnement simulé

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le concept d'espace de vitesse admissible par le véhicule ainsi que la méthodologie adoptée pour le caractériser. Nous présentons maintenant les résultats obtenus en analysant plus en détails la réaction du système aux perturbations liées à l'environnement. Cependant, avant de réaliser une expérimentation sur un véhicule réel, il nous a paru opportun d'utiliser un environnement simulé. Nous allons donc tout d'abord présenter le simulateur développé puis analyser le comportement du véhicule dans cet environnement à travers divers scénarios.

4.1 Présentation de notre simulateur

Il existe de nombreux simulateurs developpés à des fins scientifiques comme par exemple le trio Player-Stage-Gazebo (Université de Californie du Sud) ou encore Cycab-TK (INRIA Rhones-Alpes). Cependant, l'ensemble des simulateurs existants ne correspondait pas ou seulement en partie à nos attentes. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi de dévélopper notre propre logiciel de simulation. Nous proposons de montrer ses principales caractéristiques.

4.1.1 Motivations

Pour estimer la traversabilité du terrain, le système a besoin d'une grille d'élévation représentant l'environnement proche du véhicule. Or, cette tâche est en elle-même une problématique de recherche non encore résolue et

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

adressée dans notre équipe dans d'autres travaux [Malartre 2010]. Aussi, afin d'évaluer les résultats sur le calcul de la traversabilité, nous avons utilisé un environnement simulé permettant d'adresser différents exemples représentatifs de situations rencontrées. Ce simulateur nous permet de changer facilement d'environnement de test et ainsi de pouvoir analyser le comportement du véhicule dans des scénarios divers et variés. Ces scénarios peuvent être longs et difficiles à mettre en place en situation réelle.

Dans ce simulateur, nous avons besoin d'avoir une modélisation du véhicule réaliste et une modélisation de capteurs tels qu'un récepteur GPS, une caméra, un télémètre mais aussi des informations proprioceptives telles que l'odométrie et l'angle de braquage. L'ensemble de ces informations permet finalement de pouvoir tester différents algorithmes de guidage mais aussi de reconstruction du monde sans avoir les difficultés des expérimentations réelles. Ce logiciel regroupe trois technologies :

- Un moteur de rendu graphique 3D (fondé sur OGRE3D [1]).
- Un moteur physique (fondé sur ODE [2]).
- Un système d'architecture de données temps réel.

Un autre avantage de notre simulateur est de permettre d'utiliser le même programme que sur le véhicule réel AROCO.
Avant de montrer les résultats obtenus, nous proposons de détailler la modélisation du véhicule choisie dans le simulateur.

4.1.2 Modélisation du véhicule

Afin d'avoir un comportement réaliste du véhicule, nous avons modélisé l'angle de chaque roue en fonction de l'angle de braquage du train directeur δ ainsi que leurs vitesses de rotation. Pour cela, nous avons utilisé la modélisation de type tricyclique et recherché les différents angles des roues en fonction de l'angle de braquage du véhicule. Nous avons comme entrée du modèle la consigne de l'angle de braquage du train avant δ^c et la consigne de vitesse du milieu de l'entraxe arrière V^c envoyés par le système de guidage. Pour déterminer l'angle de braquage du véhicule du système δ, nous utilisons un système du premier ordre tel que :

$$\delta_{k+1} = a.\delta_k + (1-a).\delta^c_{k-r} \tag{4.1}$$

avec $a = exp(\frac{Te_s}{\tau})$ constante, Te_s le période d'échantillonnage du logiciel et τ la constante de temps du véhicule paramétrable et r correspond au retard pur que le système peut avoir ($r = \frac{T_{retard}}{Te_s}$) lui aussi paramétrable.

1. voir site : http ://www.ogre3d.org/
2. voir site : http ://www.ode.org/

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Il faut donc que chaque angle des roues respecte la condition du centre de rotation instantanée. Soit δ_{AvG} et δ_{AvD} respectivement l'angle des roues avant gauche et droite du véhicule et soit c , L respectivement sa voie et son entraxe. A l'aide de la figure 4.1, nous avons les relations suivantes.

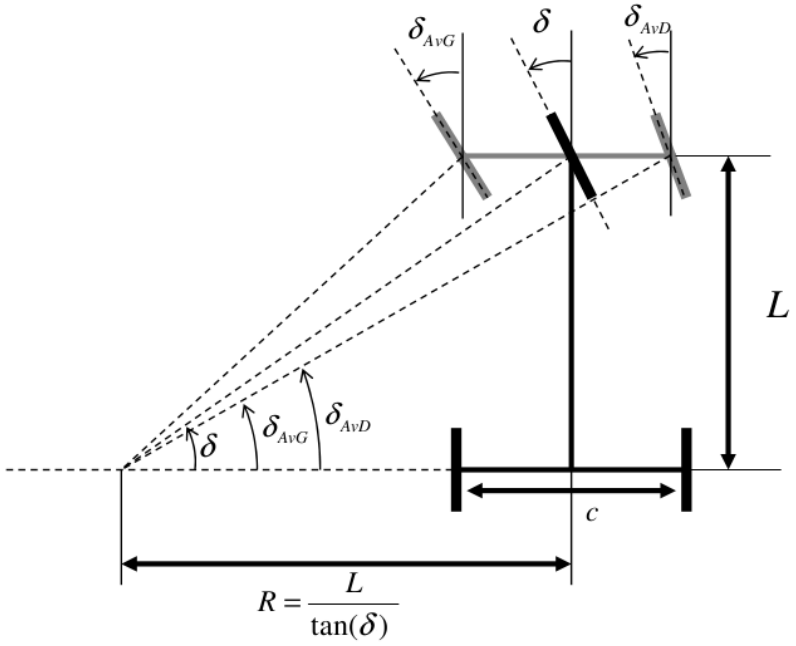


FIGURE 4.1 – Détermination des angles des différentes roues

$$\delta_{AvG} = arctan\left(\frac{L}{\frac{L}{tan(\delta)} - \frac{c}{2}}\right) \tag{4.2}$$

$$\delta_{AvD} = arctan\left(\frac{L}{\frac{L}{tan(\delta)} + \frac{c}{2}}\right) \tag{4.3}$$

De plus, nous devons déterminer les vitesses de rotation des différentes roues. Tout d'abord comme pour le véhicule, nous avons établi la fonction d'évolution de la vitesse en fonction de la consigne V^c. Cette fonction est une rampe dont les capacités d'accélération et de décélération sont paramétrables, il existe aussi un temps de retard pur paramétrable (voir figure 4.2).

Comme nous avons la vitesse du milieu de l'essieu arrière V comme paramètre, en supposant que chaque roue respecte la condition de roulement sans glissement, la vitesse de chaque roue est donnée par les équations suivantes (voir figure 4.3) :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

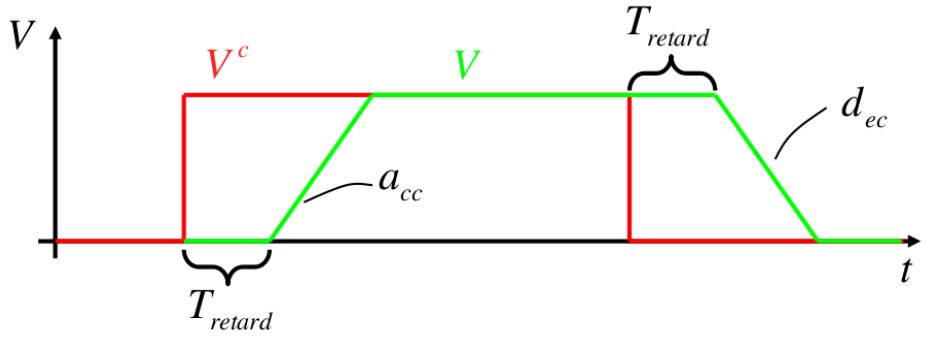


FIGURE 4.2 – Réponse à un échelon de la consigne V^c de la fonction d'évolution de V (conforme au modèle du véhicule voir figure 5.4 dans la section 5.1.3)

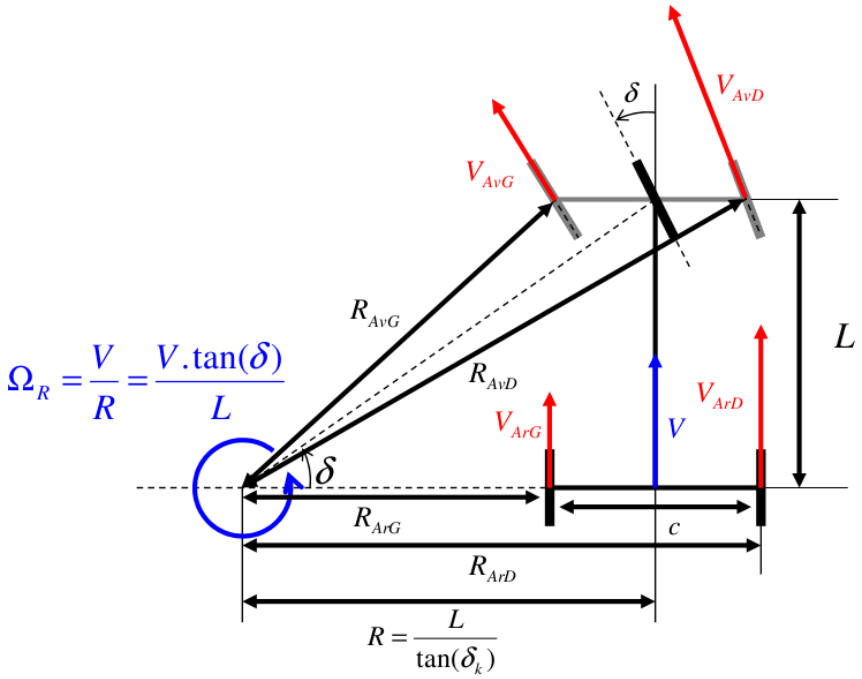


FIGURE 4.3 – Détermination des vitesses des différentes roues

$$V_{ArG} = \Omega_R.R_{ArG} = \frac{V.tan(\delta)}{L}.\left(\frac{L}{tan(\delta)} - \frac{c}{2}\right) \quad (4.4)$$

$$V_{ArD} = \Omega_R.R_{ArD} = \frac{V.tan(\delta)}{L}.\left(\frac{L}{tan(\delta)} + \frac{c}{2}\right) \quad (4.5)$$

$$V_{AvG} = \Omega_R.R_{AvG} = \frac{V.tan(\delta)}{L}.\sqrt{\left(\frac{L}{tan(\delta)} - \frac{c}{2}\right)^2 + L^2} \quad (4.6)$$

$$V_{AvD} = \Omega_R.R_{AvD} = \frac{V.tan(\delta)}{L}.\sqrt{\left(\frac{L}{tan(\delta)} + \frac{c}{2}\right)^2 + L^2} \quad (4.7)$$

(4.8)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.1.3 Limites du simulateur

Actuellement, notre simulateur utilise le moteur physique ODE qui comporte certaines limites en particulier au niveau du contact roue sol ou des paramètres d'inertie. Néanmoins, le comportement général du véhicule est suffisamment réaliste pour nous permettre d'obtenir des premiers tests relativement représentatifs.

4.2 Résultats avec une localisation du véhicule et une reconstruction du monde parfaites

Dans cette section, nous allons présenter les différents résultats obtenus par rapport au système de guidage automatique proposé. Pour mieux analyser en détails les différentes étapes du système, nous avons fait les choix de confronter le système à différents scénarios allant du cas d'un sol plat jusqu'à un environnement réaliste. Nous considèrerons la partie localisation et perception parfaite puisqu'elles nous sont directement accessibles par le logiciel de simulation.

4.2.1 Scénario n°1 : déplacement du véhicule sur un sol plat

Présentation du scénario

Afin d'analyser le système, nous avons tout d'abord fait le choix d'une situation simple c'est-à-dire naviguer sur un sol quasiment plat tel qu'une route. A travers ce scénario, nous testons la loi de commande utilisée. Il s'agit d'estimer les erreurs d'imprécision de la loi de commande lors du suivi d'une seule trajectoire de référence. La figure 4.4 montre une vue de dessus du circuit utilisé pour ce scénario. Cependant, la longueur de ce circuit est d'environ $1700m$ dont une majeure partie est une ligne droite c'est la raison pour laquelle nous focalisons l'étude de l'erreur commise sur les parties du circuit jugées intéressantes notamment lors de courbures importantes.

Résultats obtenus

La figure 4.5 montre la trajectoire de référence ainsi que les parties étudiées plus principalement. La figure 4.6 représente les erreurs obtenues en écart latéral entre les trajectoires réalisées et celle de référence pour la partie B du circuit. A travers ces résultats, nous pouvons déduire deux remarques intéressantes.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

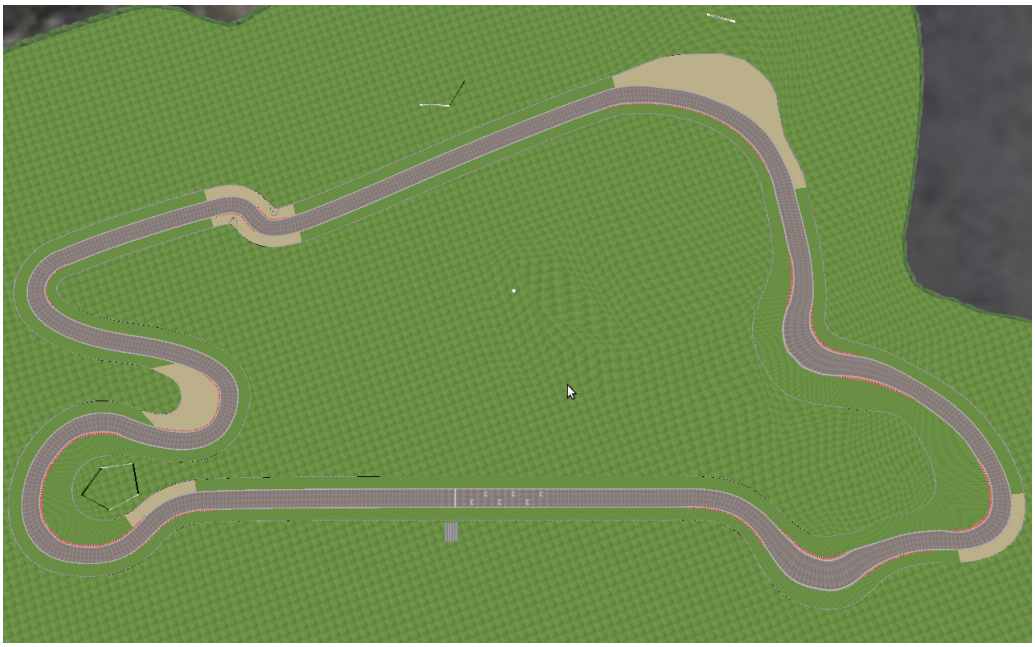


FIGURE 4.4 – Vue de dessus du circuit : *le véhicule roule sur la route (partie grise), le reste est interdit*

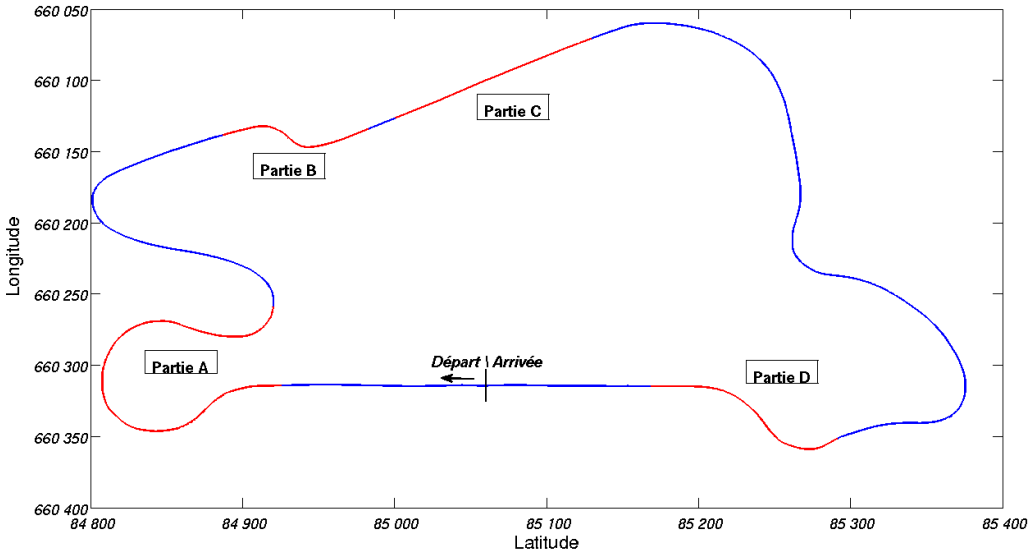


FIGURE 4.5 – La trajectoire de référence ainsi que les différentes parties étudiées

La première est que les trajectoires suivies pour une vitesse de $0.5m.s^{-1}$ et $2m.s^{-1}$ sont quasiment identiques. Si on analyse de plus prés les erreurs commises pour l'écart latéral entre les deux trajectoires, nous obtenons le tableau 4.1.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

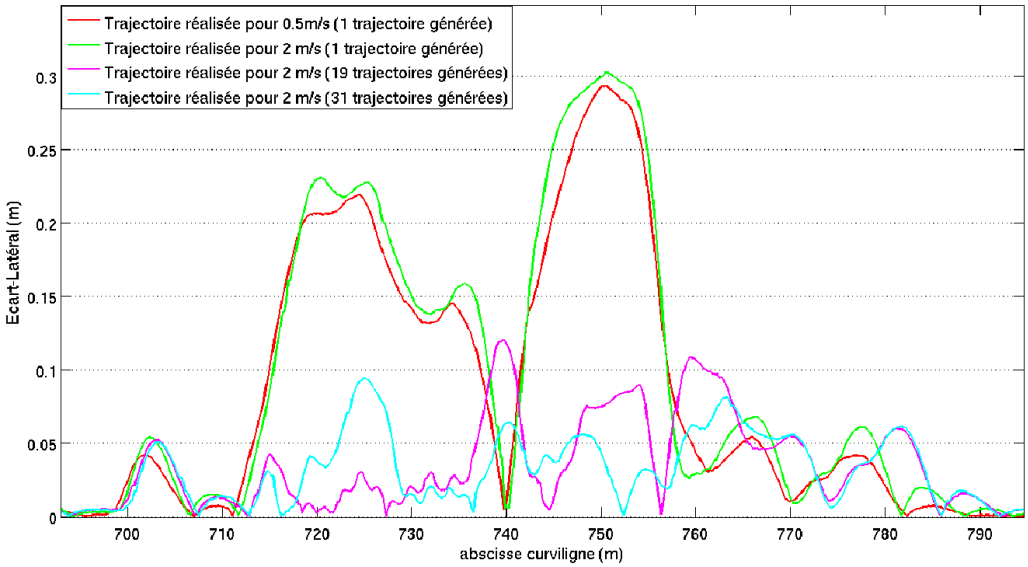


FIGURE 4.6 – Résultats obtenues sur la partie B du circuit

	Partie A		Partie B		Partie C		Partie D		Total	
Vitesse	Ecart Type	Max	Ecart Type	Max	Ecart Type	Max	Ecart Type	Max	Ecart Type	Max
0.5 m.s^{-1}	9.1	20.8	3.1	29.4	0.5	3.5	3.7	19.4	5.7	29.4
2 m.s^{-1}	9.8	24.4	9.3	30.2	0.6	4.5	8.5	25.6	6.2	30.4

TABLE 4.1 – Tableau répertoriant les caractéristiques de l'erreur (en cm) latérale commise en fonction de la vitesse d'évolution du véhicule

L'explication vient du fait que la loi de commande choisie ne dépend pas de la vitesse mais seulement de l'écart latéral et de l'écart angulaire. Plus précisément, la loi de commande est cinématique. Nous observons aussi que l'erreur vient lorsque la courbure du circuit est importante. En effet, l'erreur commise dans la partie C (ligne droite) est très faible devant les autres parties (courbure importante).

A cette étape, il nous a paru intéressant de voir les résultats obtenus avec le module de génération de trajectoire. Nous avons donc réalisé le même circuit à $2m.s^{-1}$ pour une seule trajectoire générée ($\Gamma = 0$) et le choix entre 19 puis 31 trajectoires générées possibles ($\Gamma \in [-2, 2]$). Le tableau 4.2 représente les caractéristiques des erreurs.

La deuxième remarque est que l'on constate que la trajectoire réalisée grâce à la sélection parmi les 19 ou 31 trajectoires générées est bien meilleure que la loi de commande seule. On peut expliquer ce phénomène par l'approximation faite lors de la conception de la loi de commande. L'approximation

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

	Partie A		Partie B		Partie C		Partie D		Total	
Nbr traj Générées	Ecart Type	Max	Ecart Type	Max	Ecart Type	Max	Ecart Type	Max	Ecart Type	Max
1	9.8	24.4	9.3	30.2	0.6	4.5	8.5	25.6	6.2	30.4
19	4.1	13.0	3.4	12.0	0.6	4.7	4.7	11.4	3.2	13.0
31	4.1	13.0	3.1	9.4	0.6	4.9	3.7	9.4	2.6	10.0

TABLE 4.2 – Tableau répertoriant les caractéristiques de l'erreur latérale commise (en cm) en fonction du nombre de trajectoires générées

réalisée ne prend pas en compte la courbure de la trajectoire à suivre. Or, la génération des trajectoires étant basée sur cette loi de commande et la trajectoire optimale étant dans ce cas celle qui est la plus proche de la trajectoire de référence entraînent que la commande utilisée ne sera pas forcément celle qui suit la trajectoire de référence (trajectoire générée pour un écart latéral $\Gamma = 0$). La figure 4.7 montre d'ailleurs les choix de trajectoires parmi les 19 trajectoires. On remarque que le choix diffère de $\Gamma = 0$ lorsque la courbure de la trajectoire de référence devient importante ce qui a pour effet d'améliorer les performances de la loi de commande initiale.

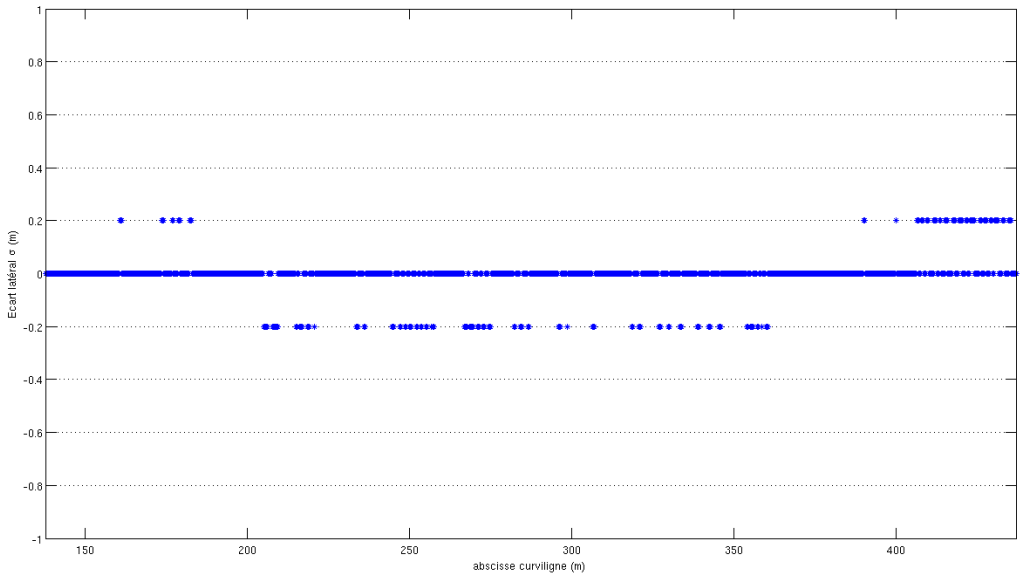


FIGURE 4.7 – Choix de la trajectoire optimale pour le système sur la partie A du circuit

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.2.2 Scénario n°2 : Sol plat avec des obstacles infranchissables le long de la trajectoire de référence.

Présentation du scénario

Pour ce scénario, nous avons utilisé l'environnement de test du scénario 1 en ajoutant des obstacles totalement infranchissables (hauteur de 1m, voir figure 4.8) et facilement repérables pour le système. Ce scénario a pour but de comparer notre système aux méthodes classiques d'évitement réactif d'obstacles. Pour ce scénario, nous avons choisi de générer 21 trajectoires écartées de $0.4m$ l'une de l'autre et de mettre tous les termes de pondération du critère de sélection égaux (voir 3.5).

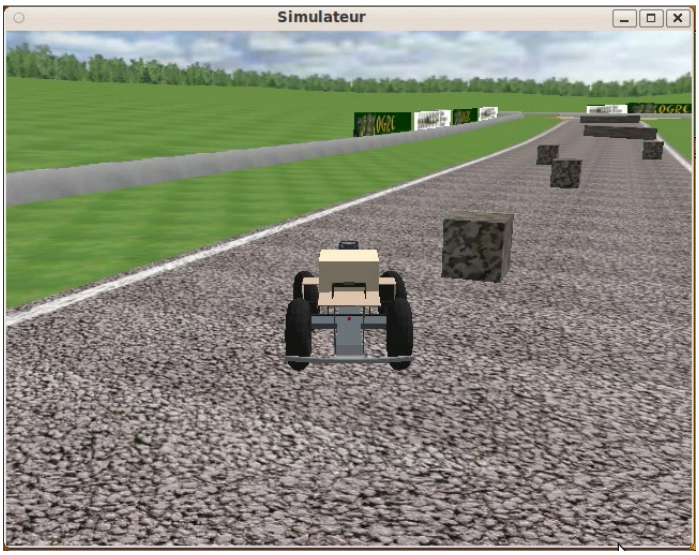


FIGURE 4.8 – Capture d'image du simulateur au cours du scénario n°2

Résultats obtenus

La vue de dessus du scénario ainsi que la trajectoire suivie sont représentés sur la figure 4.9. Nous allons voir en détails l'évolution du choix du système automatique sur les différents éléments infranchissables à éviter.

Afin de bien analyser le comportement du véhicule face aux éléments infranchissables qu'il rencontre, nous proposons de commenter uniquement les moments clés par rapport à l'application. Tout d'abord, analysons le contournement du premier obstacle (figure 4.10).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

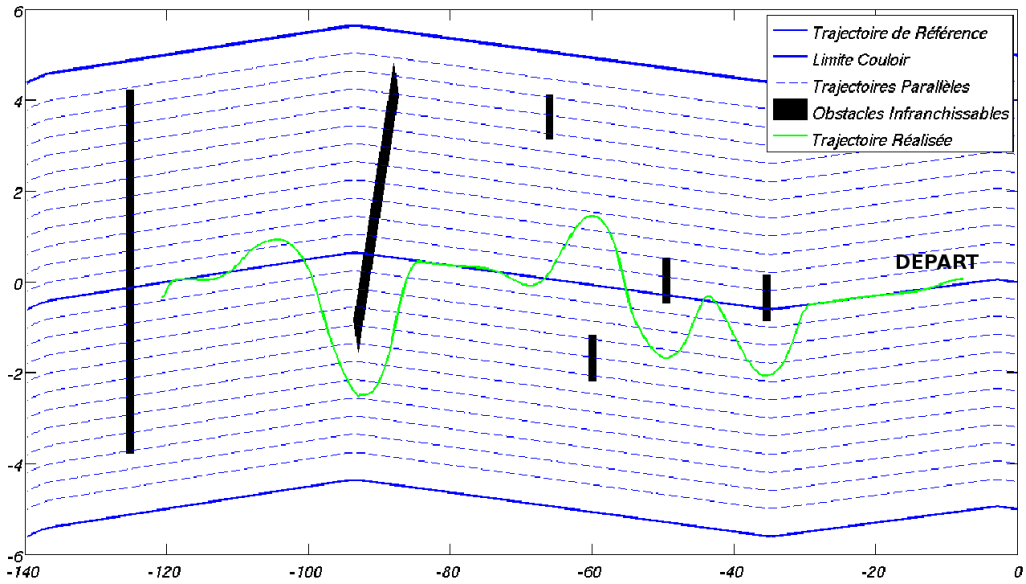


FIGURE 4.9 – Situation et résultats par rapport à la navigation entre des éléments infranchissables

Rencontre avec le premier obstacle : cet obstacle se trouve sur la trajectoire de référence, il s'agit d'un cube de 1m de coté. Au démarrage de l'application, le système suit la trajectoire de référence jusqu'à l'itération 142. A l'itération suivante, une partie des trajectoires générées entrainent une collision avec l'obstacle. Le système a le choix parmi 4 trajectoires pour le contournement de l'obstacle par la droite et 7 trajectoires pour le contournement par la gauche. Le système choisit le contournement par la gauche car l'aire entre les trajectoires de gauche et celle de référence est plus petite que celle des trajectoires de droite. Ayant choisi la trajectoire générée passant par la gauche, le véhicule commence son contournement ce qui entraîne que les nouvelles trajectoires de droite ne sont plus admissibles à partir de l'itération 150. Le système garde son choix jusqu'à avoir dépassé l'obstacle (voir itération 160 et 180). Il revient progressivement sur la trajectoire nominale entre l'itération 190 et 217. Le passage successif entre les trajectoires de $\Gamma = 1.2$ à $\Gamma = 0$ est adouci par le terme d'effort J_{effort}.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

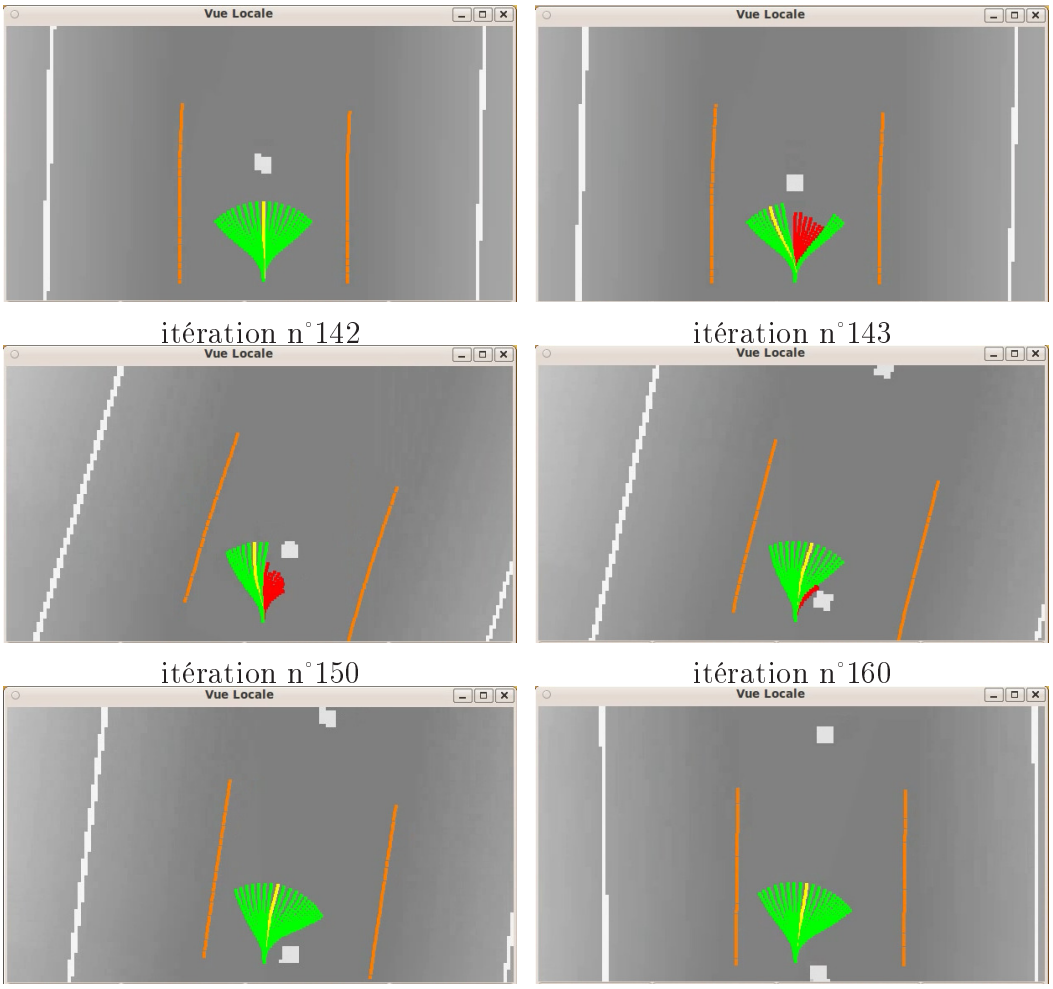


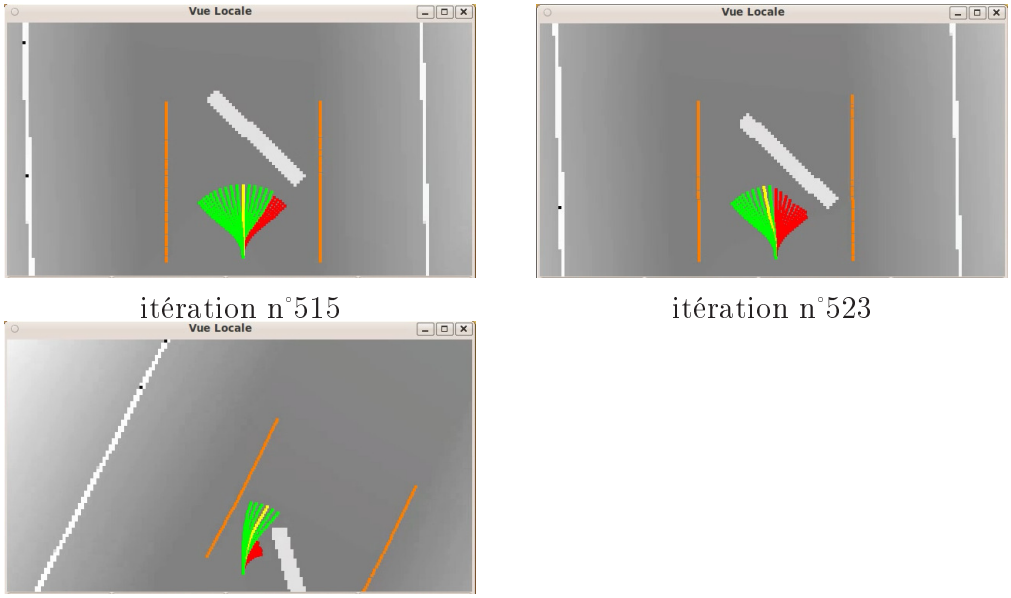
FIGURE 4.10 – Evolution des états des trajectoires générées et le choix sélectionné pour l'évitement du premier élément infranchissable : *il s'agit de la grille d'élévation de l'environnement par rapport au repère du véhicule. La trajectoire optimale est en jaune, les trajectoires générées qui ne rencontrent pas un élément infranchissable en vert, tandis qu'en rouge cela correspond aux trajectoires amenant à une collision. Le couloir de navigation est représenté en orange. Attention, les points des trajectoires générées sont calculés à partir du milieu de l'essieu arrière du véhicule*

Rencontre avec le cinquième obstacle : la succession des itérations lors du contournement de cet élément se trouve sur la figure 4.11. Cet obstacle est d'une longueur de 6m et placé à 45° de la trajectoire de référence. Si on regarde l'évolution des états des trajectoires générées, on remarque que au fur

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

et à mesure des itérations les trajectoires de droite vers la gauche deviennent infranchissables. Cela entraîne que le choix de la trajectoire optimale se décale vers la gauche jusqu'à l'ouverture existante. Ensuite, le véhicule retrouve sa trajectoire nominale.

Rencontre avec le dernier obstacle : Cet obstacle est d'une longueur de 6m et placé orthogonalement à la trajectoire de référence. Dans ce cas (voir figure 4.12, nous remarquons que tout d'abord la trajectoire suivant celle de référence devient incompatible avec l'application. Ensuite, la totalité des trajectoires deviennent incompatibles en 5 itérations, le système n'a plus de choix possible, il s'arrête.



itération n°515 itération n°523

itération n°560

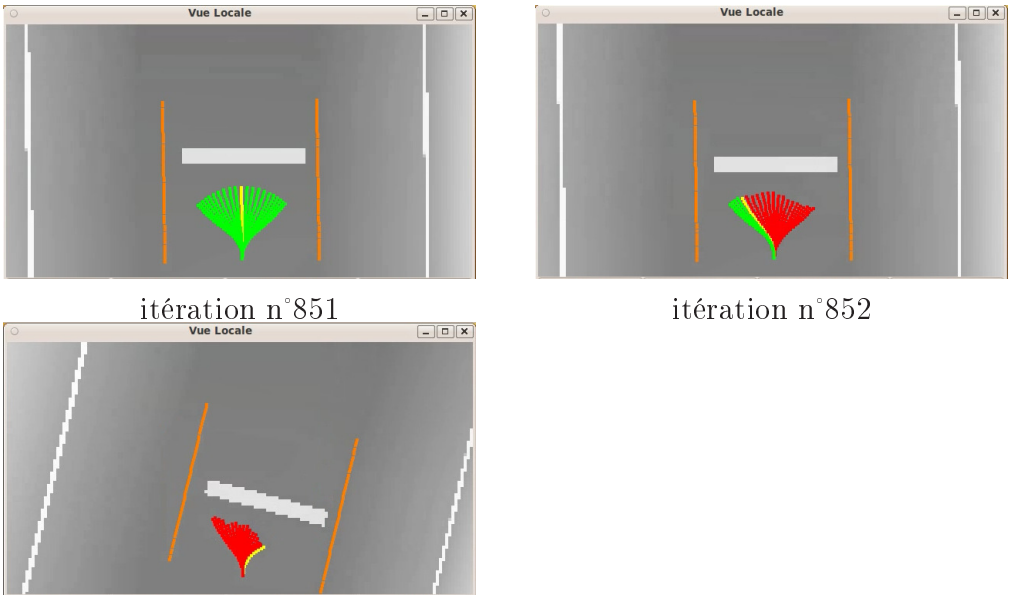
FIGURE 4.11 – Evolution des états des trajectoires générées et le choix sélectionné pour l'évitement du cinquième élément infranchissable

4.2.3 Scénario n°3 : Sol plat avec des obstacles franchissables à vitesse faible le long de la trajectoire de référence.

Présentation du scénario

Pour ce scénario, nous allons utilisé la même configuration que précédemment sauf que la hauteur des éléments perturbateurs sera de $15cm$ soit pour notre véhicule une vitesse de franchissement d'environ $0.3m.s^{-1}$. A travers ce

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref



itération n°851 itération n°852

itération n°857

FIGURE 4.12 – Evolution des états des trajectoires générées et le choix sélectionné pour l'évitement du dernier élément infranchissable

scénario, nous analyserons le comportement du véhicule en fonction des termes de pondérations du critère $J_{selection}$. On choisira de privilégier le suivi de la trajectoire de référence au détriment de la vitesse d'évolution et vice versa.

Résultats

La figure 4.13 montre les deux trajectoires réalisées par le véhicule avec deux critères de sélection de trajectoire différents. La courbe verte représente la trajectoire réalisée lorsque le critère privilégie la minimisation de l'écart-latéral entre les trajectoires générées et celle de référence tandis que la courbe rouge correspond au cas inverse. A travers ces deux choix de critères, nous remarquons que la trajectoire réalisée est totalement différente. Analysons plus en détail le choix de chacune d'entre elles.

Rencontre avec le premier élément perturbateur : C'est à partir de la rencontre du premier élément que le système change de comportement en fonction de critère de sélection de la trajectoire optimale choisie. Si on regarde plus en détail l'espace des vitesse admissible construit grâce aux trajectoires générées 4.14, nous remarquons que 5 trajectoires vont aboutir à ralentir pour franchir l'obstacle. A ce moment, si on regarde les taux des critères des différentes trajectoires générées (voir figure 4.15), nous apercevons facilement le

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

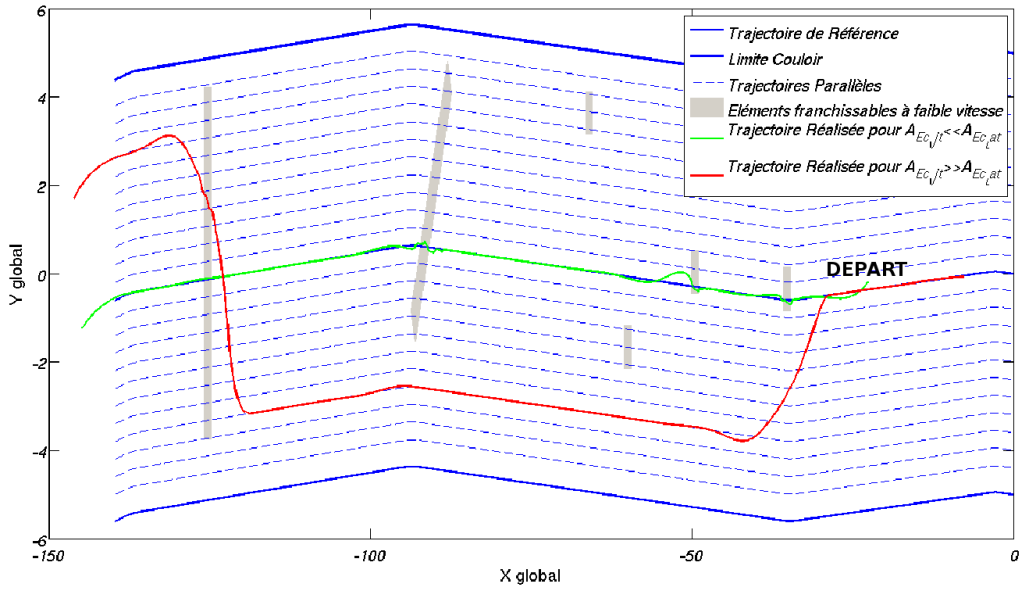


FIGURE 4.13 – Situation et résultats par rapport à la navigation entre des éléments franchissables à faible vitesse

choix que fera le système en fonction de son critère de sélection. En effet, si le critère cherche à minimiser en priorité l'écart entre la trajectoire de référence, le système choisira de prendre la trajectoire ayant comme écart $\Gamma = 0.4$ par contre si il choisi de prendre la trajectoire qui aura un profil de vitesse le plus rapide il choisira la trajectoire $\Gamma = -0.8$ car elle minimise en même temps le profil de vitesse et le critère d'effort.

4.2.4 Bilan des scénarios présentés

A travers ces trois scénarios, nous avons pu analyser la réaction du système face à des éléments perturbateurs présents dans l'environnement. La tâche de perception étant considérée comme parfaite, nous avons pu observer le bon fonctionnement et voir en détail les choix du système pour finalement respecter son objectif. Pour aboutir à une intégration de notre système sur un véhicule réel, il nous faut parvenir à reconstruire la grille d'élévation du véhicule avec les capteurs embarqués sur le véhicule réel. L'algorithme que l'on devra utiliser aura des imprécisions. Il est donc important de tester notre système avec un MNT fourni par une tâche de perception imparfaite. Ainsi, nous analyserons l'immunité de notre système de guidage automatique et nous nous rapprocherons des conditions d'un test réel. Pour cela, nous présenterons la tâche de perception développée dans notre équipe (par un autre étudiant) puis nous analyserons les mêmes scénarios que dans la section précédente afin

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

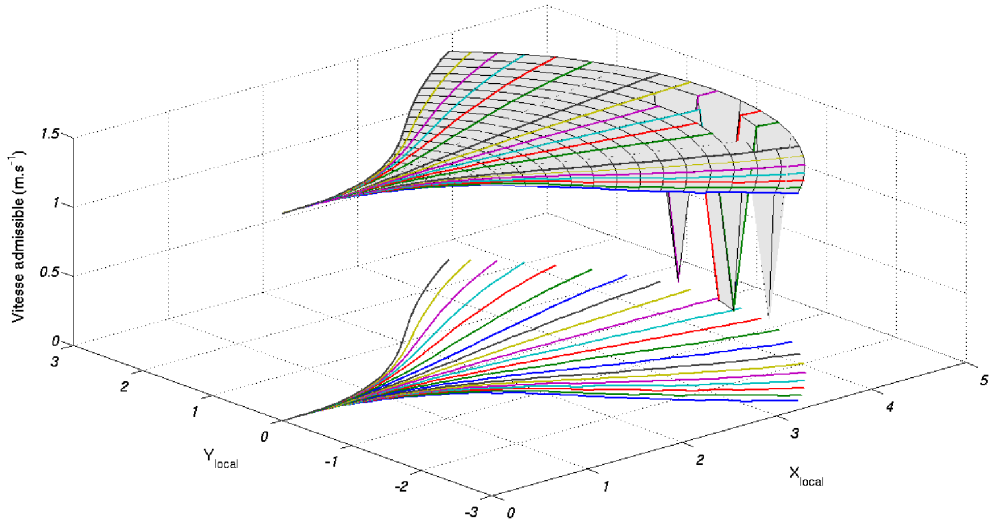


FIGURE 4.14 – Espace de vitesse admissible construites à partir des trajectoires générées pour l'itération 125

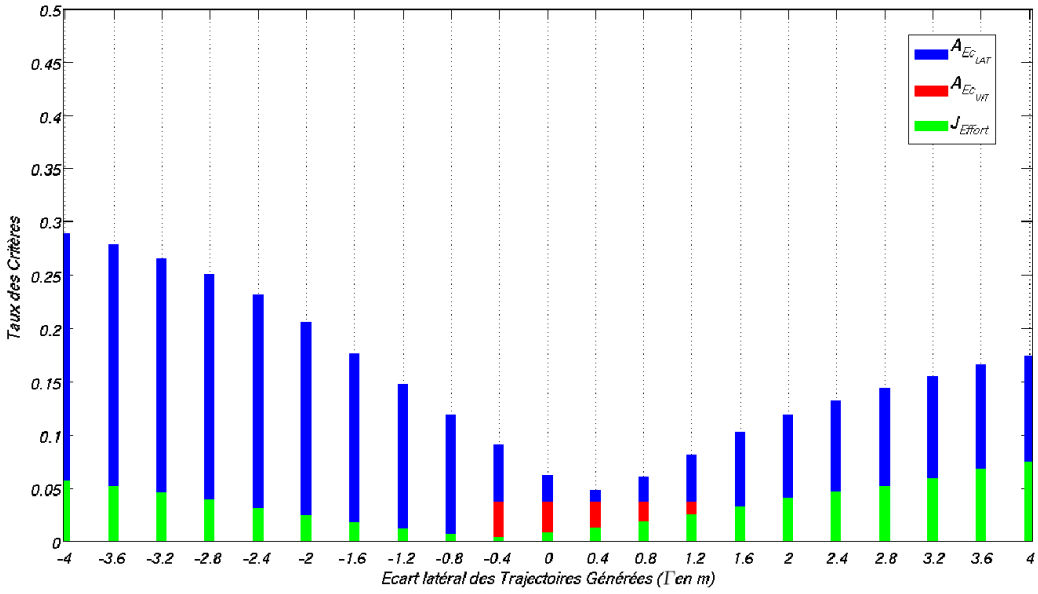


FIGURE 4.15 – Taux des critères des différentes trajectoires pour l'itération 125

de montrer les modifications de comportement du véhicule.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.3 Résultats avec une localisation et une reconstruction du monde réelles

4.3.1 Présentation du système de perception

L'approche proposée pour exécuter la tâche de perception est de combiner les images issues d'une caméra embarquée et les données provenant d'un télémètre mono-nappe (figure 4.16) dans un processus SLAM (Simultaneous Localization And Mapping). Ce processus permet d'obtenir en temps-réel la carte locale dense à l'avant du véhicule. De plus, afin de palier les éventuelles pertes de signal GPS et assurer une intégrité de localisation (position vraie comprise dans l'incertitude de localisation), il propose de fusionner les données GPS avec la localisation fournie par le processus SLAM. Pour cela, la dérive de localisation inhérente au processus SLAM est prise en compte et est mise à jour lors de l'arrivée d'informations provenant du récepteur GPS. Cela permet d'avoir une localisation fiable nécessaire pour notre système. Le processus SLAM joue le rôle d'un odomètre visuel permettant la localisation 6D (position + orientation) du robot ([Malartre 2009], [Malartre 2010], [Debain 2010b]).

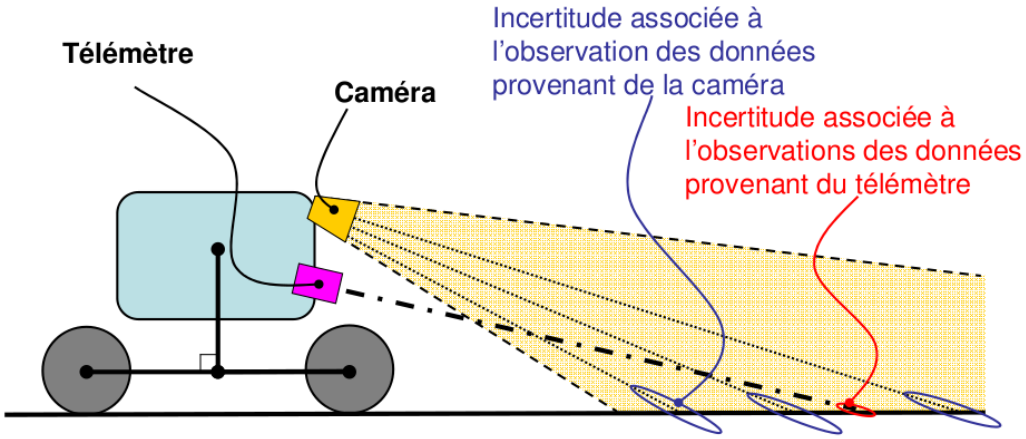


FIGURE 4.16 – Présentation algorithme de perception utilisé

Cependant, comme tout procédé utilisant une odométrie visuelle, la tâche de perception est très sensible aux grandes variations de l'état du système (accélération, vitesse de rotation sur les 3 axes). Par conséquent, nous devons ajouter les contraintes de vitesse assurant le bon fonctionnement de la tâche de perception. Ces conditions à respecter pour un bon fonctionnement de la perception sont :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$\dot{\theta} < 0.4rad.s{-}1 \tag{4.9}$$
$$\dot{\psi_s} < 0.06rad.s{-}1 \tag{4.10}$$
$$\dot{\varphi_s} < 0.06rad.s{-}1 \tag{4.11}$$

$\dot{\theta}$, $\dot{\psi_s}$ et $\dot{\varphi_s}$ sont respectivement les vitesses de lacet, de tangage et de roulis du véhicule. La figure 4.17 montre le profil de vitesse obtenu pour franchir une marche de 15cm de hauteur avec la fonction de transfert de charge puis la condition pour le respect de la tâche de perception. Nous remarquons que les contraintes provenant de la tâche de perception sont prépondérantes sur les conditions de stabilité utilisées auparavant. C'est la raison pour laquelle nous utiliserons uniquement ces limites afin de déterminer le profil de vitesse admissible par le véhicule.

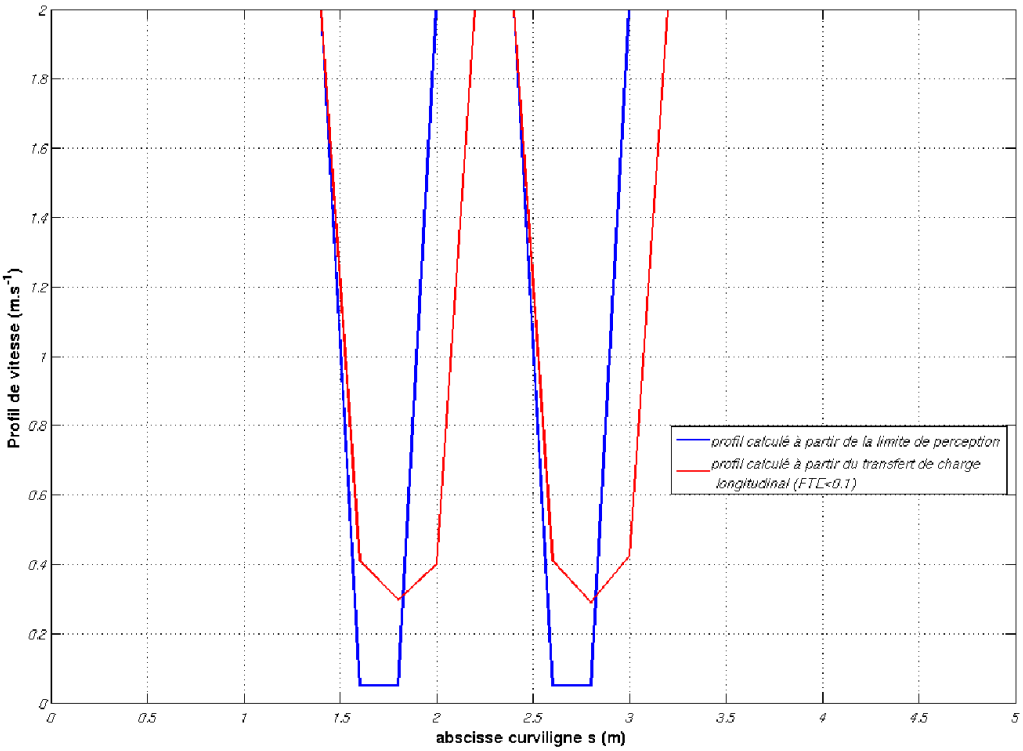


FIGURE 4.17 – Comparaison entre les profils de vitesse obtenus pour le franchissement d'une marche de 15cm : *la courbe rouge correspond au profil calculé à partir du transfert de charge ; la courbe bleue à partir des conditions provenant de la tâche de perception*

De plus, le système de perception a une distance limite d'observation (notée $D_{L_{obs}}$). Cette limite vient de la position et de l'inclinaison du télémètre (voir

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

figure 4.16). En effet, le télémètre doit être positionné à une hauteur permettant d'observer le terrain suffisamment loin pour que le système soit en mesure d'atteindre une vitesse d'évolution acceptable pour notre application. Dans notre cas, la distance maximale d'observation est de $4m$ devant le véhicule qui correspond avec les capacités de mobilité du véhicule, à environ $1.8m.s^{-1}$. Le dernier point à prendre en compte lors de l'utilisation de cette tâche de perception est le temps de calcul qu'elle engendre. En effet, le système doit maintenant calculer son environnement limitant de ce fait le nombre de trajectoires possibles à estimer. Dorénavant, le système devra se satisfaire de 11 trajectoires potentielles pour établir la meilleure stratégie de navigation. Maintenant que nous avons présenté l'organe qui va permettre de reconstruire l'environnement devant le véhicule, analysons les nouvelles performances du système avec les mêmes scénarios que précédemment.

4.3.2 Scénario 1 : sol plat

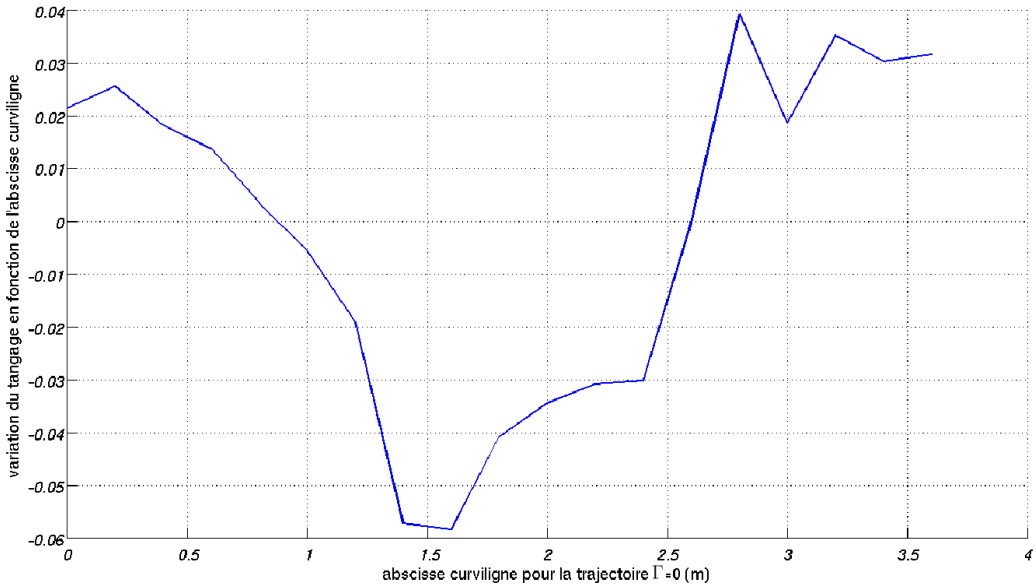
Présentation du scénario

Il s'agit du scénario déjà présenté dans la partie 4.2.1. Ici, nous allons établir les résultats obtenus avec la nouvelle tâche de perception. Nous allons voir les nouvelles aptitudes du robot confronté à une interprétation de l'environnement imparfaite. A travers ce scénario, nous montrerons les différentes contraintes à gérer et l'apport des dernières fonctionnalités encore non citées.

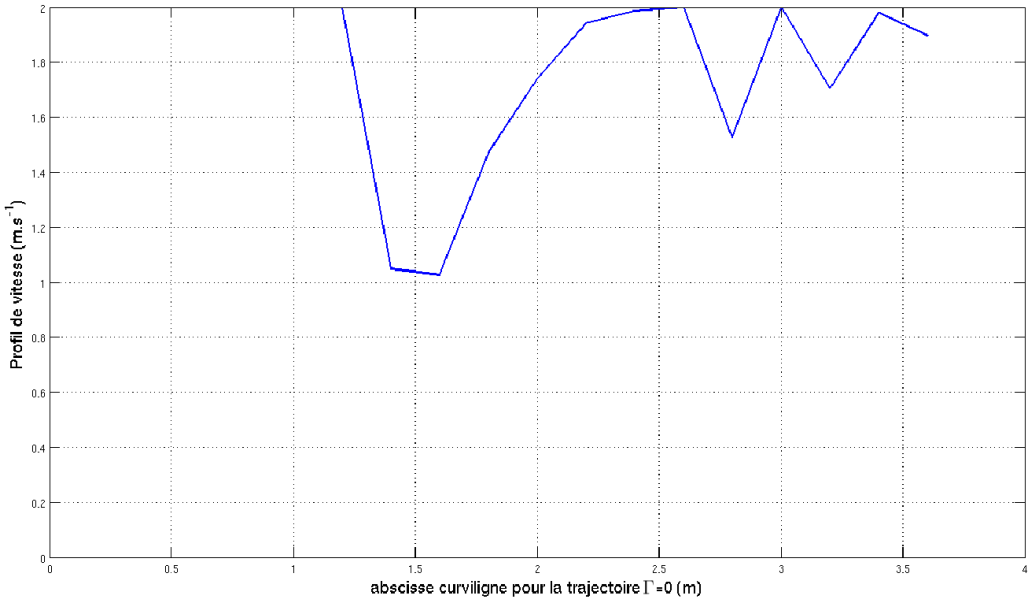
Résultats obtenus

En particulier, la grille d'élévation du terrain est maintenant imparfaite, il existe un bruit d'environ $5cm$ d'écart-type qui perturbe le profil de vitesse. Cette perturbation trouve son origine à cause de l'approximation faite pour le calcul de l'indice de préservation de l'intégrité physique de l'environnement. En effet, nous avons fait le choix de ne pas prendre en compte les suspensions du véhicule. Par conséquent, si les variations du tangage et du roulis sont brusques à cause du bruit de mesure, le profil de vitesse devient alors beaucoup moins stable (voir figure 4.18). C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de filtrer le tangage et le roulis par un filtre de deuxième ordre établi grâce aux paramètres des suspensions (cf section 3.4.3). Ainsi, les variations de ces angles sont filtrées et le profil de vitesse est en grande partie immunisé au bruit engendré par la tâche de perception. Cependant, le résultat du filtrage dépend de la vitesse d'évolution si pour la vitesse calculée les variations du tangage et du roulis respectent les conditions d'intégrité alors cette vitesse correspondra au profil de vitesse admissible.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref



(a) Variation du tangage en fonction de l'abscisse curviligne pour la trajectoire d'écart latéral $\Gamma = 0$



(b) Profil de vitesse admissible associé

FIGURE 4.18 – Conséquence du bruit de la grille d'élévation sur le profil de vitesse sans les suspensions

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Un exemple est donné sur la figure 4.19 qui montre les résultats de la variation de tangage par rapport au temps pour des vitesses d'évolution différentes du véhicule. Pour les vitesses d'évolution de 0.5 et 2 $m.s^{-1}$, la variation du tangage est compris dans les limites exprimées auparavant. Pour une vitesse de $5m.s^{-1}$, la variation devient trop grande, cette vitesse n'est pas admissible d'un point de vue des conditions de perception.

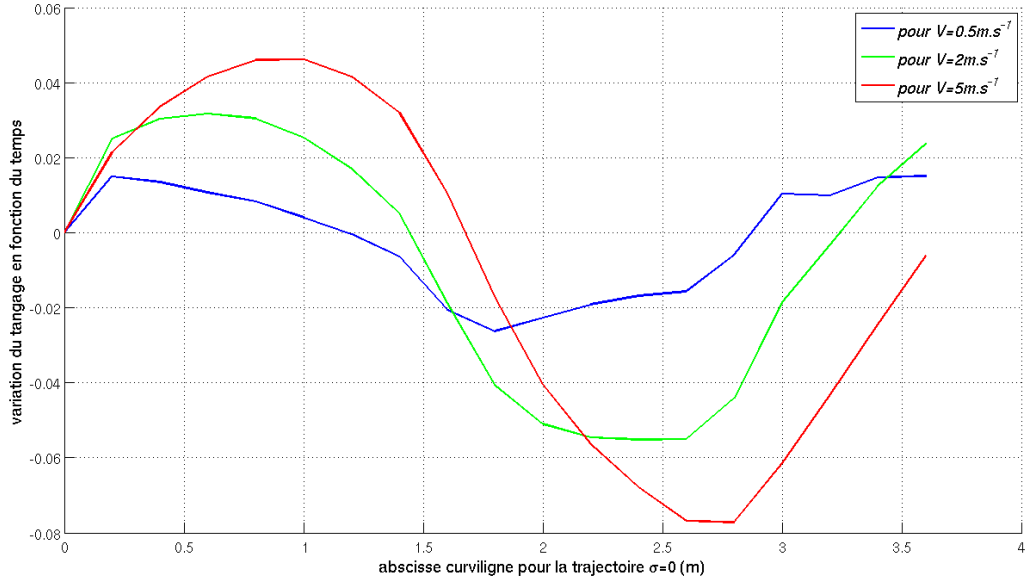


FIGURE 4.19 – Variation du tangage avec la prise en compte des suspensions pour différentes vitesse d'évolutions

Un autre phénomène intéressant à observer est la forme du nouvel espace de vitesse que cela engendre. En effet, notre nouvelle tâche de perception est sensible aux variations brutales de l'état du véhicule notamment aux variations de lacet. Les trajectoires avec une variation de lacet importante se compose d'un profil de profil de vitesse faible alors que l'on roule sur un sol plat. Le nouvel espace de vitesse est représenté sur la figure 4.20. Le profil de vitesse associé à la trajectoire $\Gamma = 4m$ est présenté sur la figure 4.21.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

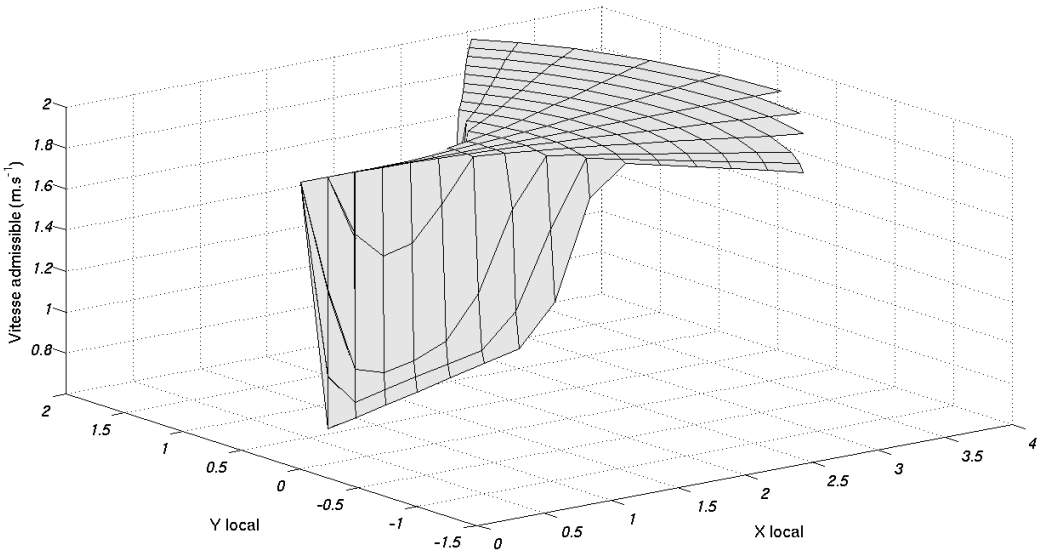


FIGURE 4.20 – Espace des vitesses admissibles obtenu avec la prise en compte des suspensions

4.3.3 Scénario 2 : Un sol plat avec un obstacle infranchissable

Présentation du scénario

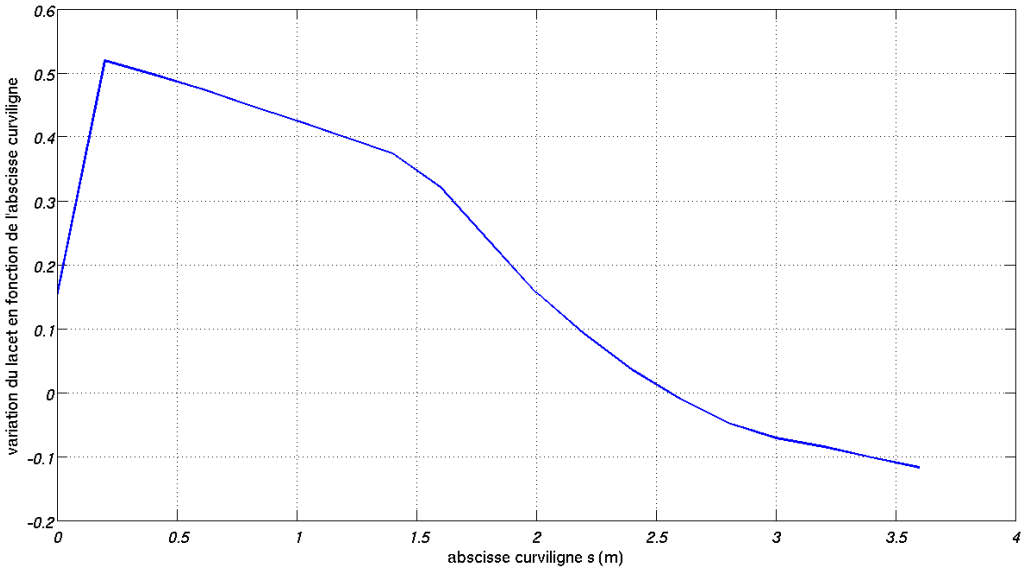
Comme pour le deuxième scénario proposé précédemment, nous ajoutons un obstacle infranchissable sur la trajectoire de référence. Cependant, nous ne focaliserons l'étude que sur le contournement d'un seul obstacle. Le fonctionnement global est identique à celui observé avec la tâche de perception parfaite.

Résultats obtenus

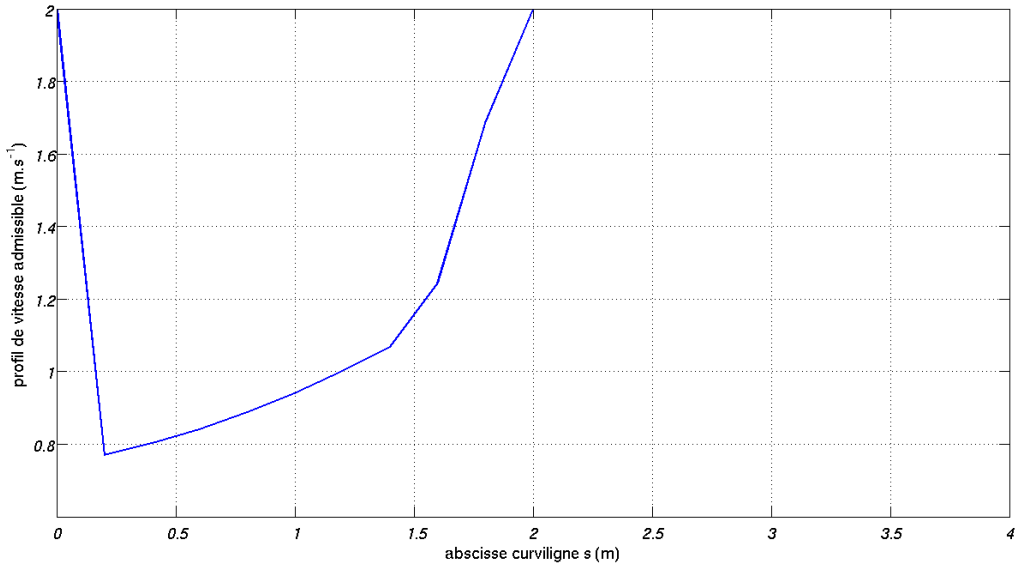
Deux remarques intéressantes sont à faire pour ce scénario. La première est la zone de non-observation du MNT (voir figure 4.22). Cela est tout à fait normal, car il est impossible de reconstruire l'environnement avec notre système de perception (télémètre + caméra) derrière un obstacle si celui-ci est plus grand que la hauteur du faisceau du télémètre. Dans ce cas, le véhicule devra éviter cette zone ce qui implique un contournement plus large que dans le cas précédent.

La deuxième remarque concerne la vitesse du véhicule lors du contournement de l'obstacle. Comme nous l'avons expliqué précédemment, la prise en compte des limitations de la perception lors de modification du choix de tra-

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref



(a) Variation du lacet pour la trajectoire d'écart latéral $\Gamma = 4$

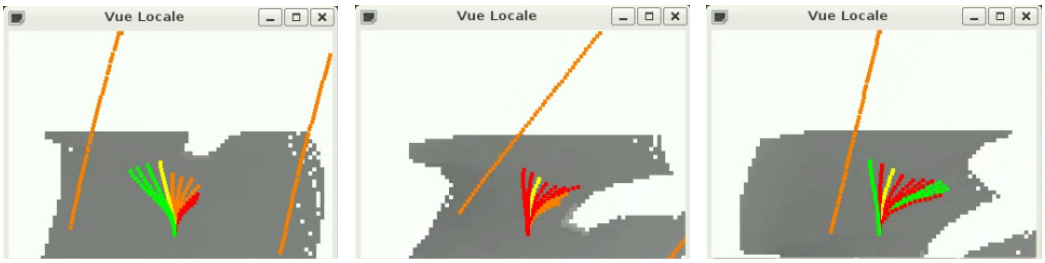


(b) Profil de vitesse associé

FIGURE 4.21 – Effet de la contrainte de la perception sur le lacet pour les profils de vitesse admissible

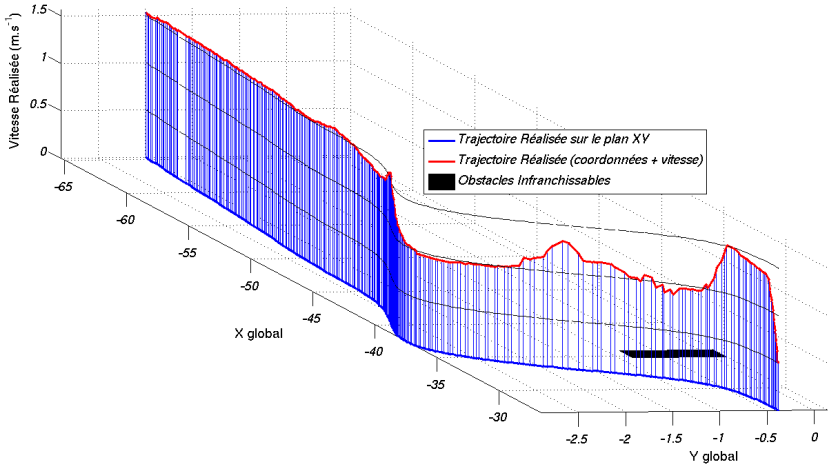
jectoire entraîne un ralentissement du véhicule. Nous pouvons observer la trajectoire réalisée ainsi que la vitesse du véhicule sur la figure 4.23.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

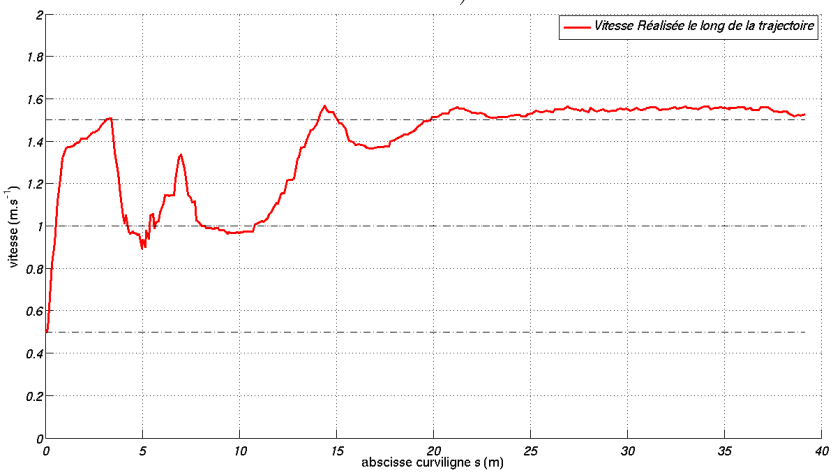


(a) itération 33 (b) itération 66 (c) itération 92

FIGURE 4.22 – Vue locale du MNT fourni par la tâche de perception lors du contournement de l'obstacle



(a) Trajectoire réalisée lors du contournement de l'obstacle (position + vitesse)



(b) Vitesse réalisée par rapport à l'abscisse curviligne

FIGURE 4.23 – Trajectoire réalisée lors du contournement d'un obstacle

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

4.4 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons analysé le comportement du système avec des scénarios simples. Ces scénarios ont été joués dans un premier temps avec une reconstruction du MNT et une localisation parfaites. Dans un second temps, nous l'avons testé avec les algorithmes de perception de notre équipe.

Ces premiers résultats obtenus en simulation montrent que le système a un comportement conforme à notre attente et que ses performances permettent d'envisager des tests en conditions réelles. Si le contournement d'un objet vu comme un obstacle infranchissable est un résultat classique attendu, l'apport du calcul des profils de vitesse des trajectoires envisagées par le robot pour franchir une perturbation de l'environnement tel qu'un ralentisseur est un complément intéressant.

Dans le prochain chapitre, nous détaillerons les nouveaux résultats obtenus avec notre véhicule AROCO.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 5

Expérimentations avec un véhicule réel

Nous avons présenté notre méthodologie permettant de préserver l'intégrité physique du véhicule ainsi que la structure du système de guidage automatique. Puis, nous avons analysé le comportement du système dans un environnement simulé. La prochaine étape consiste à réaliser des expérimentations dans un cadre proche d'une situation réelle. Pour cela, nous utiliserons un véhicule équipé de différents capteurs et naviguant dans un environnement ouvert. Ce chapitre se compose tout d'abord de la présentation du véhicule et de ces capteurs. Puis, nous détaillerons les réactions du véhicule confronté à différentes difficultés présentes dans son environnement.

5.1 Dispositif expérimental

5.1.1 Le véhicule AROCO

Le robot sur lequel ont été réalisées les expérimentations se nomme AROCO (figure 5.1). Il s'agit d'un véhicule électrique tout-terrain se déplaçant jusqu'à $15km/h$. Avec son encombrement réduit ($1.90m$ de long et $1.20m$ de large), ses 4 roues motrices indépendantes et ses deux trains directeurs, AROCO constitue la plate-forme idéale pour mener des travaux de recherche de mobilité des véhicules en milieu naturel.

5.1.2 Les capteurs

Les odomètres et mesures du train directeur

Il ne nous a pas été nécessaire d'instrumenter AROCO d'odomètres, car il est déjà équipé de ces capteurs. Ainsi chacune des roues dispose de son propre

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref



FIGURE 5.1 – Le véhicule AROCO lors du symposium ROBOTICS 2010

odomètre. De plus, le véhicule dispose de capteurs permettant de mesurer les angles des trains directeurs avant et arrière.

La récupération de ces mesures et la commande du véhicule fixées à $10Hz$ se font via un réseau ethernet local TCP/IP.

Capteur Caméra - Télémètre

Ce capteur permet la fusion entre une caméra Marlin F-131B et un télémètre laser Sick LMS 221. La fréquence de la caméra est de $15images/seconde$. Pour le télémètre, la fréquence d'acquisition est $40Hz$, il fournit un débattement de 180° pour une résolution de 0.5°. Les deux capteurs sont liés par un socle voir figure 5.2. Le capteur nous fournit un MNT à chaque nouvelle image provenant de la caméra soit à une fréquence de $15Hz$. Ce capteur est positionné devant le véhicule à une hauteur d'environ $1.20m$, incliné de 15° vers le sol. Cela nous permet de reconstruire l'environnement à plus de 4 mètres devant le véhicule.

récepteur GPS

AROCO est équipé d'un récepteur GPS RTK. Ce capteur donne la position dans le repère absolu terrestre avec une précision de $3cm$. Sa fréquence d'acquisition est de $10Hz$.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref



FIGURE 5.2 – Le capteur caméra - télémètre

5.1.3 Identification des paramètres utiles pour l'expérimentation

Lors de la mise en place de notre système, nous avons dû paramétrer certains termes comme l'angle de braquage ou encore les capacités d'accélération et de décélération du véhicule. Pour les tests sur le simulateur, ces paramètres sont directement configurables ; on a donc choisi de ne pas les mentionner. Cependant lors des tests précédents (cf chapitre 4), nous avions choisi de prendre comme angle de braquage un système du premier ordre avec les configurations suivantes : un temps de retard pur de $300ms$ et une constante de temps de $170ms$. Ceux-ci correspondent aux paramètres identifiés préalablement sur le véhicule réel. Les capacités d'accélération et de décélération du véhicule simulé sont égales à $1m.s^{-1}$ et nous avons choisi de ne pas prendre en compte les temps de retard. Maintenant que nous devons utiliser le véhicule AROCO, il convient de faire une nouvelle étape d'identification que cela soit pour l'angle de braquage δ mais aussi pour le modèle en vitesse V.

Modèle du train directeur avant δ

Afin de déterminer le modèle du train directeur avant du véhicule, nous avons appliqué une consigne de 10° sur la direction et mesuré les différents paramètres correspondants à un système du premier ordre (de la forme : $\delta_{k+1} = exp(-\frac{\tau}{Te}).\delta_k + (1 - exp(-\frac{\tau}{Te})).\delta^c_{k-r}$ voir section 3.3). Grâce au résultat obtenu (figure 5.3), on en déduit une constant de temps $\tau = 170ms$ mais aussi un temps de retard pur de $300ms$ ($r = 3$).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

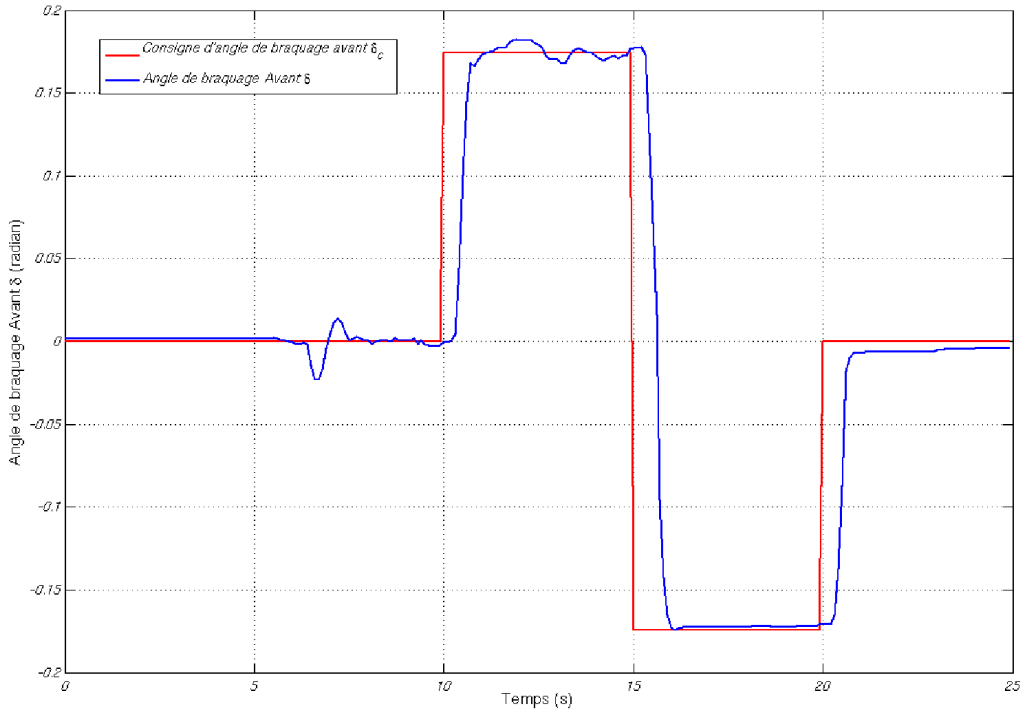


FIGURE 5.3 – Réponse de l'angle de braquage ayant un échelon comme entrée

Modèle de l'évolution de la vitesse V

De la même manière que pour l'angle du train directeur, nous appliquons un échelon de consigne sur la vitesse curviligne du véhicule. La figure 5.4 montre la réponse obtenue. Nous pouvons en déduire que l'accélération du véhicule a_{cc} est égal à $0.7m.s^{-2}$, la décélération d_{ec} est égale à $0.7m.s^{-2}$ et un temps de retard pur d'environ $400ms$ soit quatre itérations de la commande (rappel : la période de commande est de $100ms$).

Prise en compte des temps de retard pur du véhicule

Après l'identification des paramètres utiles du véhicule, nous nous rendons compte qu'il existe des temps de retard pur pour l'angle de braquage du train directeur ($Tr_\delta = 300ms$) et pour le modèle de vitesse ($Tr_V = 400ms$) non négligeables vu notre temps d'échantillonnage de commande ($Te = 100ms$). Il devient donc nécessaire de les intégrer. Pour le retard pur en vitesse Tr_V, il va avoir une incidence significative sur l'admissibilité des profils de vitesse obtenus par rapport aux capacités du véhicule (cf. 3.4.6). Le système vérifie l'admissibilité d'une trajectoire en calculant à chaque pas d'échantillonnage l'accélération instantanée pour atteindre le profil de vitesse. Si cette accélération est inférieure à la capacité de décélération du véhicule, nous considérons la

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

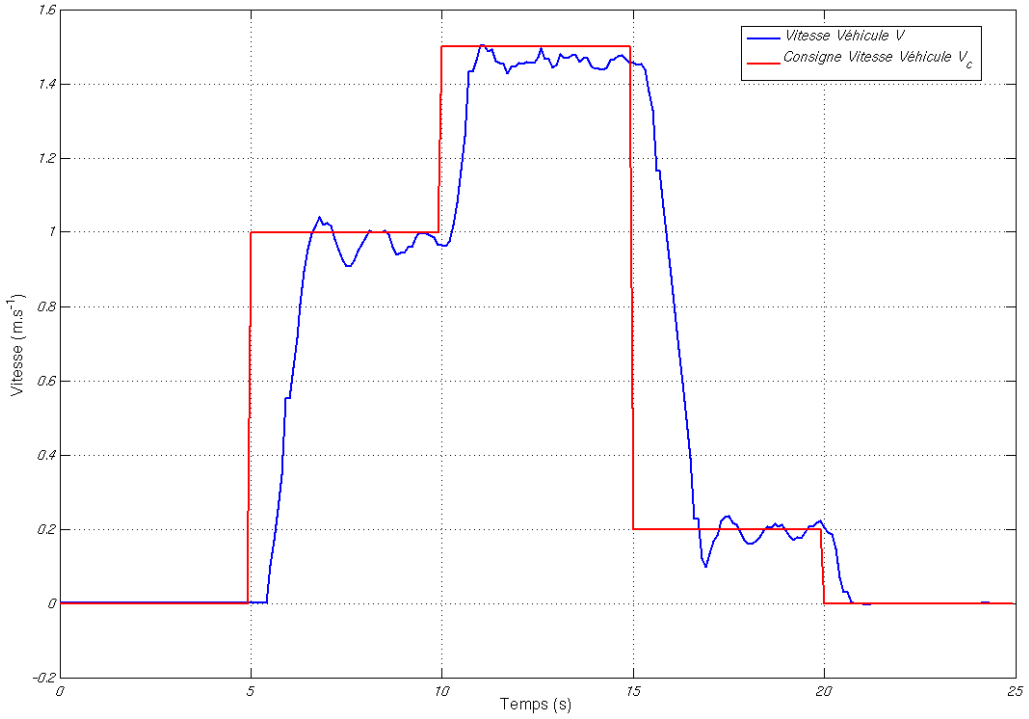


FIGURE 5.4 – Réponse de la vitesse du véhicule par un échelon comme entrée

trajectoire comme impraticable. Or le calcul de cette accélération ne prend pas en compte le retard pur. Analysons de nouveau le cas présenté dans la partie 3.4.6 en considérant que la consigne ne pourra être modifiée après $400ms$. Pour une vitesse actuelle de $2m.s^{-1}$, nous obtenons une distance de $2 \times 0.4 = 0.8m$ où la vitesse ne changera pas, soit quatre pas d'échantillonnage. Pour une vitesse de $1m.s^{-1}$, la distance obtenue est de $1 \times 0.4 = 0.4m$ soit une distance de deux pas d'échantillonnage en abscisse curviligne cela entraîne que l'accélération instantanée sera donc inférieure avec retard que dans le cas précédent qui est sans retard. D'ailleurs dans notre cas, le profil de vitesse même avec une vitesse $V_0 = 1m.s^{-1}$ n'est plus admissible d'un point de vue des capacités de décélération du véhicule (voir figure 5.5).

De plus, ce retard rend l'analyse de la prédiction des vitesses futures du véhicule incertaines. En effet sur $400ms$ (correspondant au retard pur), nous ignorons si la réponse du système est déterministe. Si l'on considère que le véhicule a le choix entre accélérer (a), freiner (f) ou rester à la même vitesse (r), pour quatre consignes successives en vitesse exécutées, nous ne pouvons pas prédire le comportement du véhicule. Le tableau 5.1.3 illustre ce phénomène.

C'est la raison pour laquelle nous avons fait le choix de commander la vitesse du véhicule sur un temps d'échantillonnage plus grand ($500ms$). Par cela, nous approximons l'accélération $a_{cc} = \frac{2}{5} \times 0.7 = 0.28m.s^{-2}$ et la

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

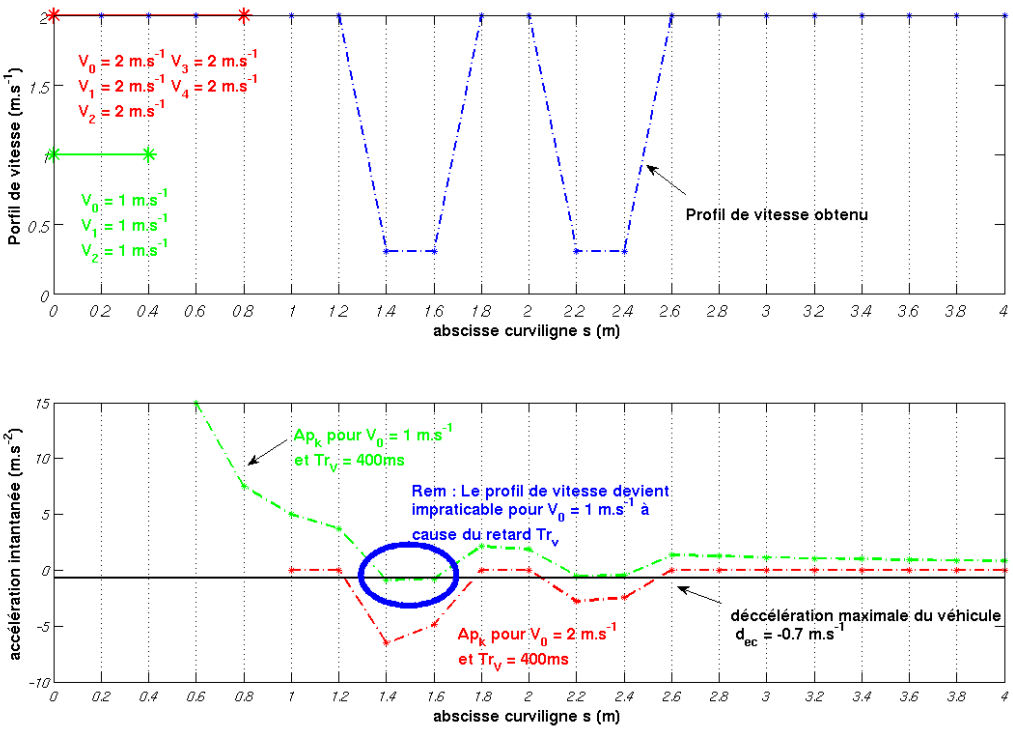


FIGURE 5.5 – Calcul de l'admissibilité d'un profil de vitesse avec un retard pur de la commande en vitesse de 400ms : *par rapport au cas présenté dans la section 3.4.6 où nous ne prenions pas en compte le temps de retard (figure 3.16), nous remarquons que si le véhicule a une vitesse de* $1m.s^{-1}$ *le profil de vitesse n'est plus admissible*

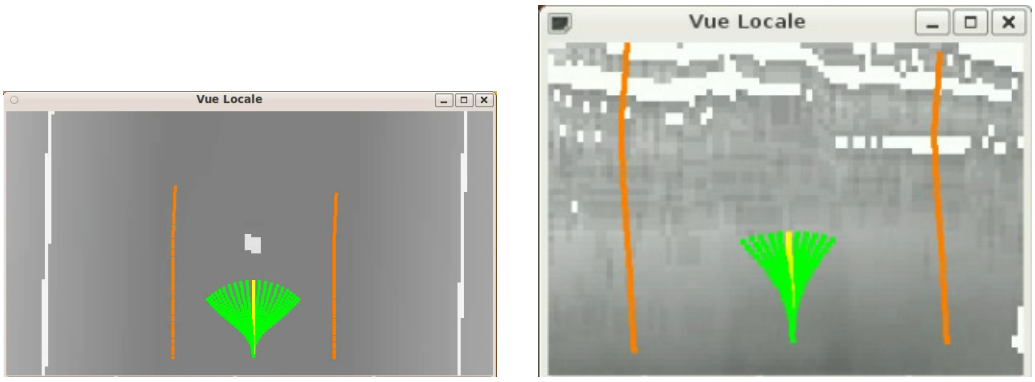
V^c_{k-3}	V^c_{k-2}	V^c_{k-1}	V^c_k	V_{k+1}
a	a	a	a	a
a	f	r	a	?
⋮	⋮	⋮	⋮	?
⋮	⋮	⋮	⋮	?
a	r	r	r	?
r	r	r	r	r
r	r	a	a	?
⋮	⋮	⋮	⋮	?
f	f	f	f	f

TABLE 5.1 – Tableau représentant la prédiction de l'action du véhicule V_{k+1}en fonction de ses consignes précédentes (V^c_{k-3},V^c_{k-2},V^c_{k-1},V^c_k)

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

décélération $d_{ec} = \frac{2}{5} \times 0.7 = 0.28 m.s^{-2}$. Cela implique une vitesse maximale d'évolution du véhicule de $1.2 m.s^{-1}$ pour une distance d'observation de $4m$ devant le véhicule.

Pour le temps de retard du train directeur, il faudrait prendre en compte le temps de retard sur le modèle cinématique et utiliser une loi de commande prédictive. Dans un premier temps, nous avons fait comme hypothèse de le négliger. Afin de palier les phénomènes d'oscillations du véhicule, nous avons limité le débattement maximal par le coefficient Rc de la loi de commande utilisée. Cela a pour impact d'augmenter la distance à parcourir pour atteindre les différents sous objectifs. Les trajectoires générées sont donc plus resserrées entres elles par rapport aux cas présentés sur le logiciel de simulation (voir figure 5.6).



(a) Trajectoires générées sur le simulateur

(b) Trajectoires générées dans notre cas réel

FIGURE 5.6 – Comparaison des trajectoires générées entre notre logiciel de simulation et le cas réel

5.1.4 Protocoles d'expérimentation

Afin de réaliser les tests réels, nous avons fait le choix de franchir un élément à faible vitesse. Il s'agit d'un ralentisseur de hauteur $15cm$ avec 45° d'inclinaison de face et puis une pente plus douce (figure 5.7). Nous avons aussi placé un élément totalement infranchissable. Cet élément est en fait un tube d'une hauteur de $1m$ et de diamètre $25cm$. Ces deux éléments sont placés sur la trajectoire de référence de telle sorte que le véhicule soit obligé de modifier sa trajectoire. Le système doit donc ralentir et contourner afin d'atteindre son objectif. Une vue de l'expérimentation est proposée dans la figure 5.7.

Nous avons fait le choix de prendre uniquement la sélection de la meilleure trajectoire par rapport au critère de minimisation de l'écart latéral et de la

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

dépense énergétique. Nous avons fait ce choix car le critère sur la vitesse est beaucoup plus sensible au bruit de la grille d'élévation et entraîne plus d'instabilité lors du choix de la trajectoire optimale que celui lié à l'écart latéral.



Vue de dessus du site de l'expérimentation réelle

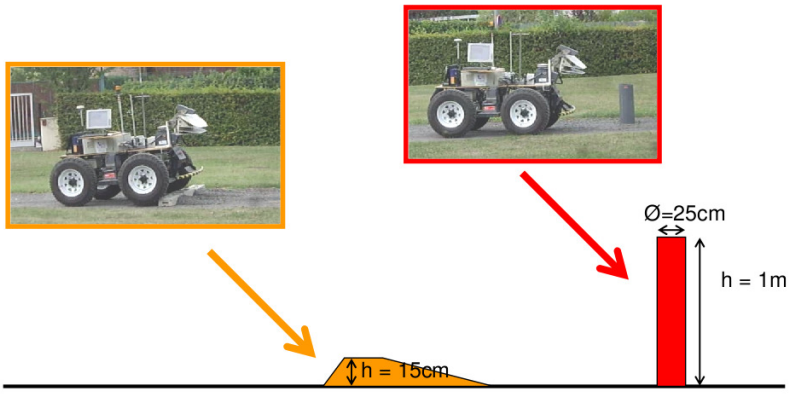


Schéma des éléments rencontrés lors de l'expérimentation réelle

FIGURE 5.7 – Présentation de l'expérimentation réelle sur le site du Cemagref (Aubière)

5.2 Résultats obtenus

La première action que doit mener le système est de définir une zone d'attention afin de limiter les temps de calcul et de diminuer les ambiguïtés. Cependant, afin de prévenir de tout les cas possibles et pour une question de facilité d'implémentation des algorithmes, nous avons choisi de compléter une grille d'élévation fixe. Cette grille doit être suffisamment grande afin d'englober toutes les positions relatives possibles entre le véhicule et le couloir de

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

navigation. Pour notre test réel, nous avons fait le choix d'avoir une largeur de couloir de navigation de $4m$. La tâche de perception voit à $6m$ par rapport à l'origine du repère local (milieu de l'essieu arrière). Nous avons donc choisi de prendre une grille d'élévation de taille $16m \times 6m$. Cependant, les calculs concernant la traversabilité seront bien compris dans la zone d'intérêt.

De plus, comme nous utilisons un récepteur GPS RTK qui a une précision de l'ordre de $3cm$ et que nous évoluons dans un environnement dégagé (pas de masquage de satellites ou problème de multi-trajet), nous ferons l'hypothèse que la position du véhicule est précise et intègre.

Voyons à présent l'état du MNT fourni par la tâche de perception après la détermination de la zone d'intérêt et observons les améliorations apportées.

Rencontre avec l'élément franchissable à faible vitesse : Si nous nous intéressons aux données brutes fournies par la tâche de perception avant le ralentisseur (figure 5.8), nous observons que la grille d'élévation contient des cases non-renseignées. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé un filtre basé sur la morphologie de la roue (expliqué en 3.4.1) et un filtre moyenneur afin de lisser l'aspect global de la grille d'élévation. Le résultat est donné sur la figure 5.9. Nous constatons alors que ces cases sont désormais bien renseignées et nous permettent d'effectuer le calcul des différents profils de vitesse.

Les profils de vitesse sont donnés sur la figure 5.10. On remarque que les profils de vitesse pour chacune des trajectoires passent sur l'élément perturbateur. La vitesse de franchissement est alors de $0.3m.s^{-1}$. Les profils de vitesse admissibles présentent deux creux : le premier correspond au franchissement des roues avant sur le ralentisseur tandis que le deuxième correspond au franchissement des roues arrières. Le taux des critères étant donné par la figure 5.11, on remarque que la trajectoire optimale pour franchir l'obstacle est celle qui a pour écart latéral $\Gamma = -0.4$.

Nous pouvons voir au final sur la figure 5.12 la trajectoire ainsi que la vitesse réalisée pour franchir l'obstacle. Sur cette figure, nous remarquons que le véhicule ralentit environ $2m$ avant le ralentisseur. Cela est dû au choix de l'origine du repère du véhicule. En effet, l'origine choisie est le milieu de l'essieu arrière, donc il faut que le véhicule maintienne sa vitesse pour le franchissement des roues avant et arrière. Puis, il reprend sa vitesse d'évolution nominale ; dans notre cas la vitesse maximale en tenant compte de la distance d'observation (qui est égale à $1.2m.s^{-1}$).

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

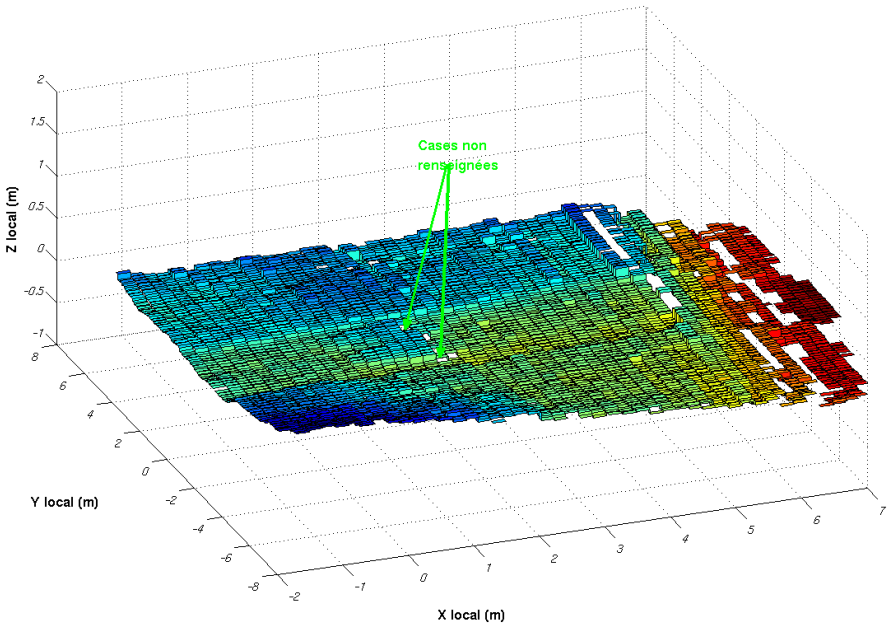


FIGURE 5.8 – Grille d'élévation brute provenant de la tâche de perception avant le ralentisseur : *nous pouvons noter la présence de cases non renseignées juste après le ralentisseur*

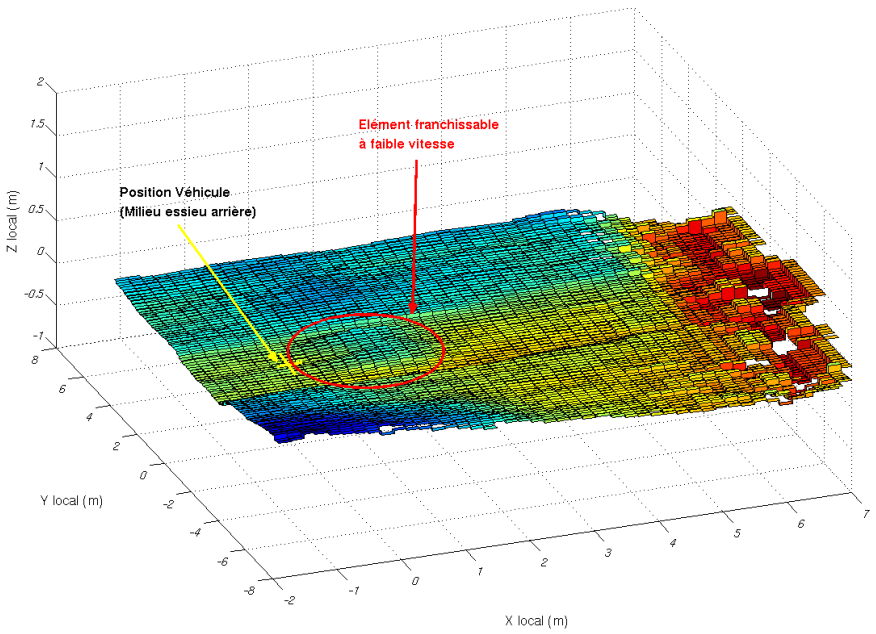


FIGURE 5.9 – Grille d'élévation filtrée provenant de la tâche de perception avant le ralentisseur

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

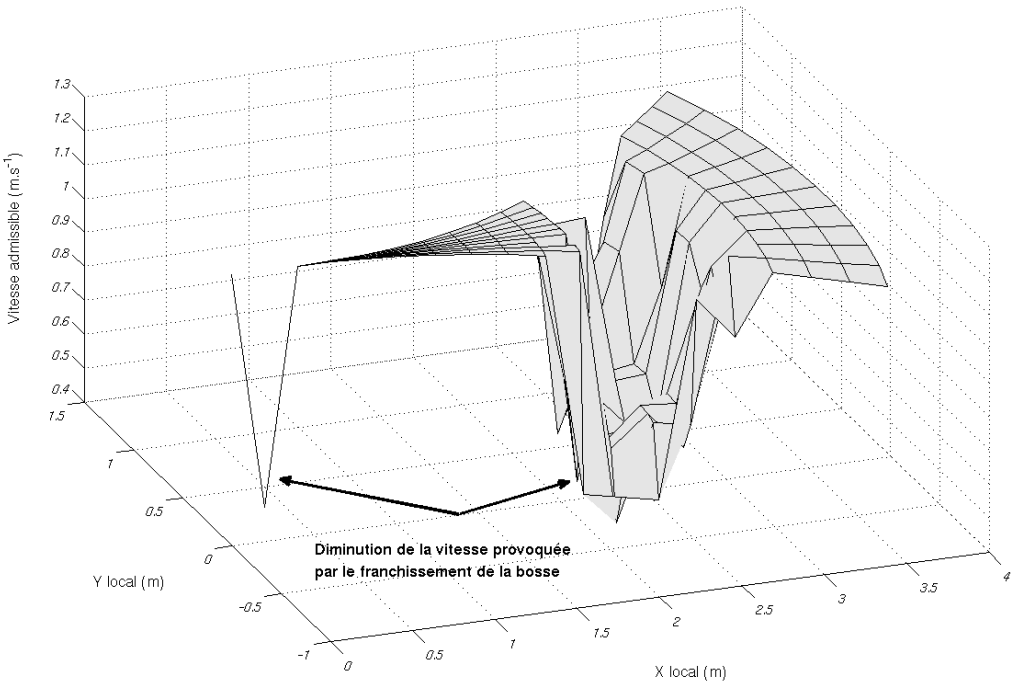


FIGURE 5.10 – Profils de vitesse pour la grille d'élévation de la figure 5.9

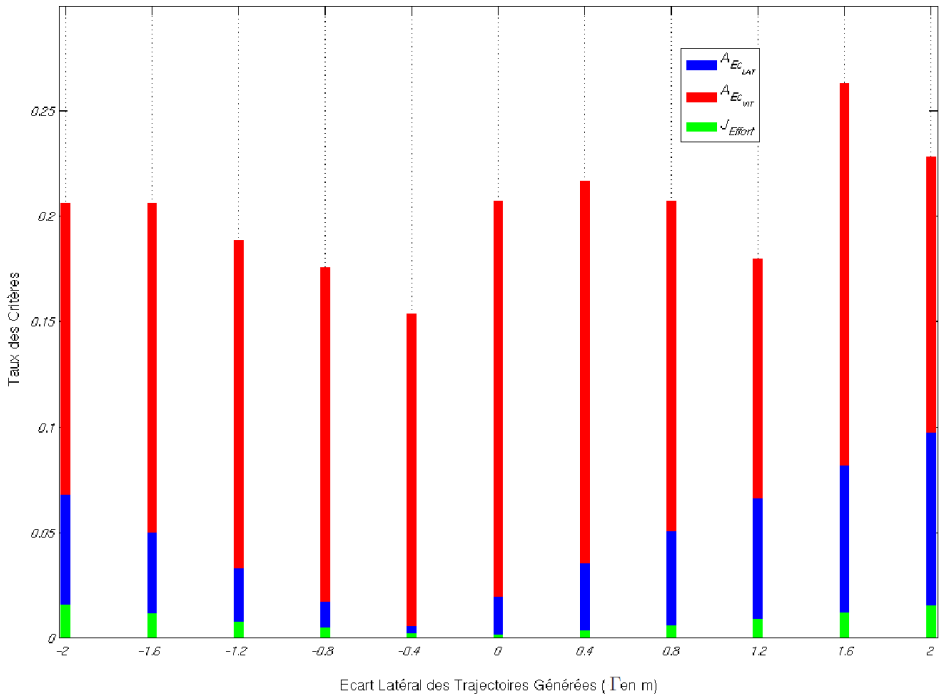


FIGURE 5.11 – Taux des critères de la situation présentée

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

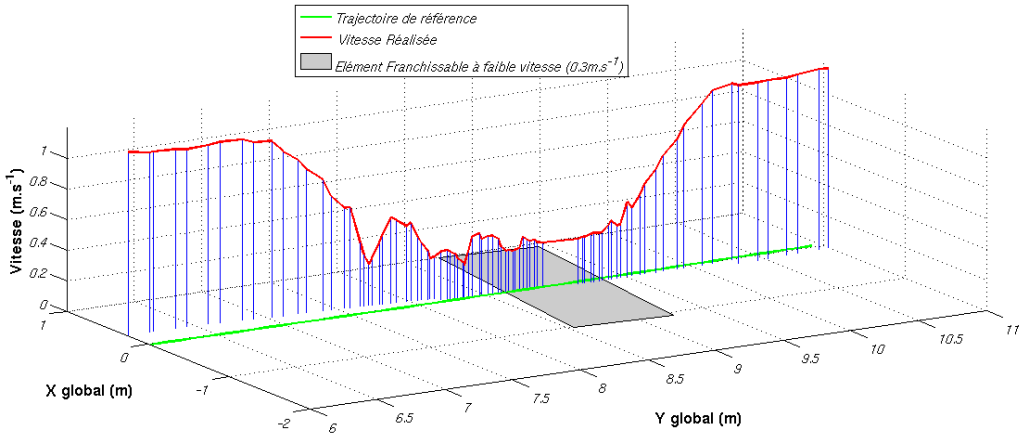


FIGURE 5.12 – Trajectoire et vitesse réalisées lors du franchissement du ralentisseur

Remarque : Si nous nous intéressons à la grille d'élévation juste après le franchissement du ralentisseur (figure 5.13), nous pouvons noter un décalage d'environ $10cm$ de l'élévation du sol qui n'existe pas dans l'environnement réel. Cela est dû à l'imprécision de la tâche de perception lors du franchissement du ralentisseur. Ce phénomène a une influence sur les profils de vitesse calculés (voir figure 5.14). En effet, le système calcule alors la vitesse admissible pour franchir cette marche fictive. Toutes les profils de vitesse sont modifiés et ont alors une vitesse admissible d'environ $0.5m.s^{-1}$ alors qu'elles devraient être égale à la vitesse nominale.

Après le franchissement du ralentisseur, le système est maintenant confronté à l'élément infranchissable.

Rencontre avec l'élément infranchissable : Tout d'abord observons sur la figure 5.15 la grille d'élévation avant le contournement de cet élément. On remarque sur cette figure que l'élément infranchissable est bien représenté et que de plus il existe une zone non renseignée derrière lui. En effet, bien que nous utilisions la morphologie de la roue pour combler les cases vides, dans ce cas il en existe plusieurs qui sont successives et l'opération de filtrage ne permet pas de les renseigner. Ce phénomène est normal et même souhaité puisque pour un vide de plus du tiers de la roue, il se peut que le véhicule tombe dans une situation dangereuse avec une roue bloquée dans un trou. Lors du posé de robot, le système en déduira donc naturellement que les trajectoires passant par cette zone ne sont pas praticables par le véhicule.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

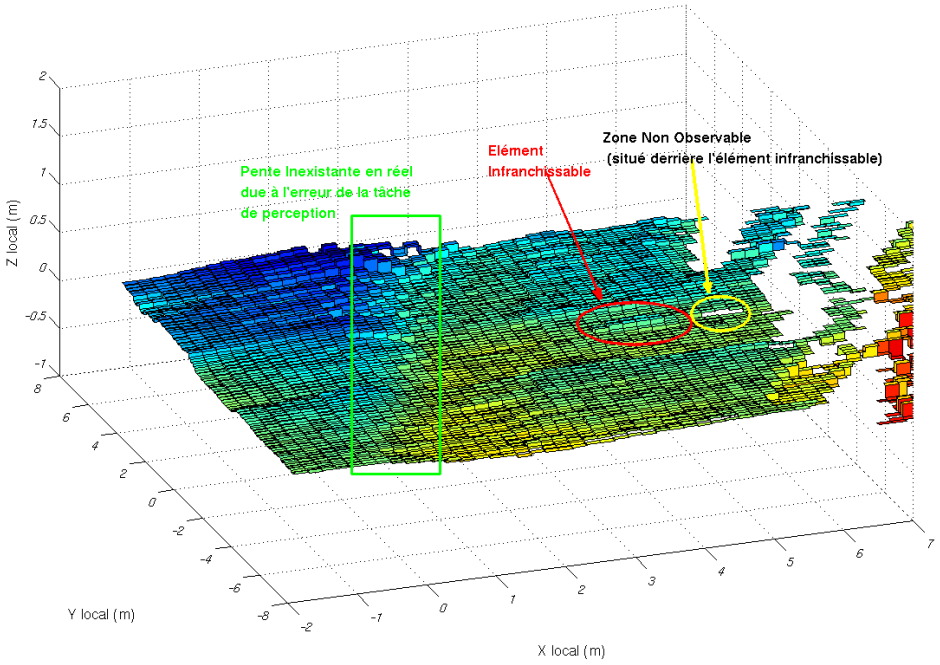


FIGURE 5.13 – Grille d'élévation filtrée après le franchissement de le ralentisseur (morphologie + lissage par filtre moyenneur)

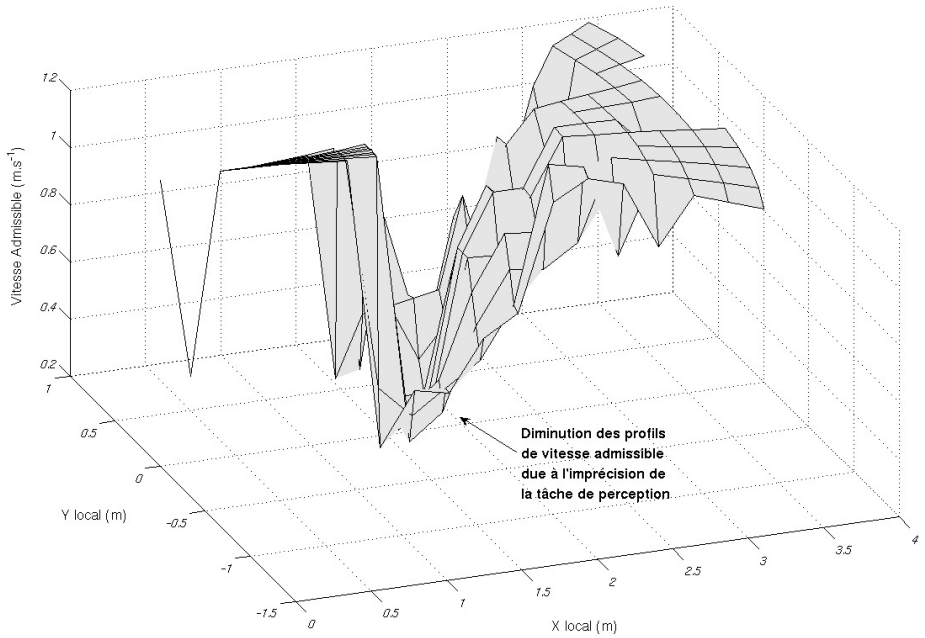


FIGURE 5.14 – Espace de vitesse admissible obtenue pour la grille d'élévation de la figure 5.13

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

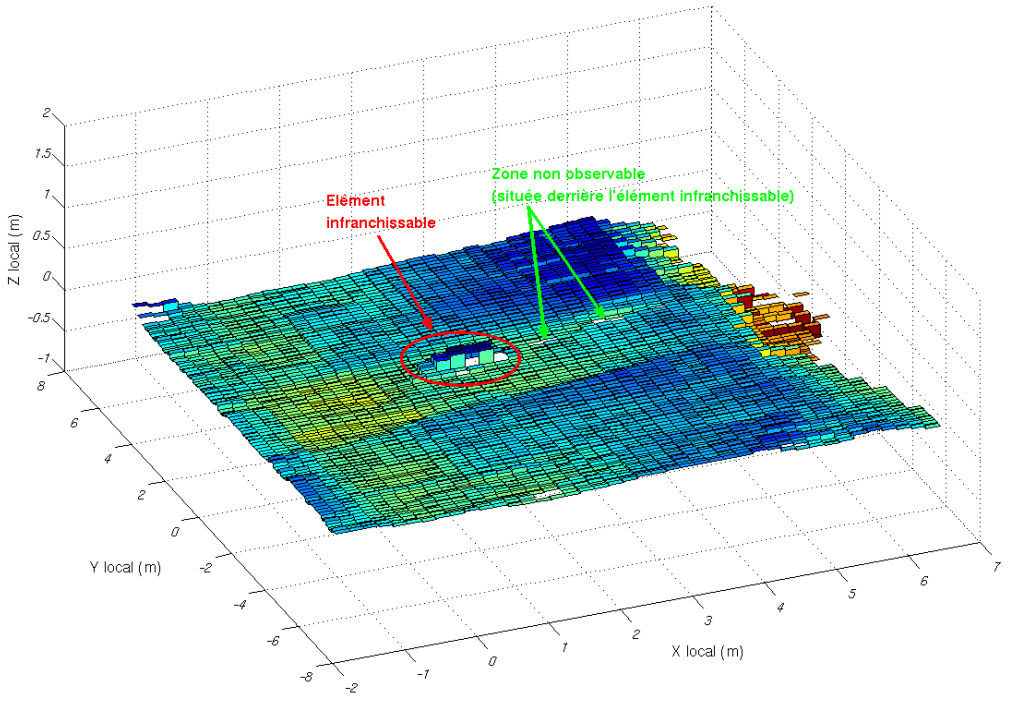
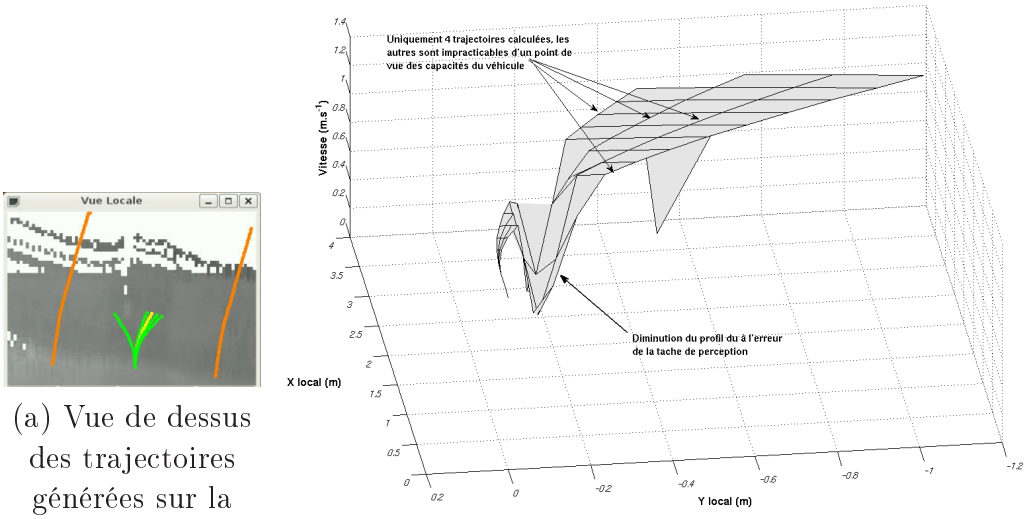


FIGURE 5.15 – Grille d'élévation filtrée avant le contournement de l'élément infranchissable

Après cette remarque, si nous observons l'espace des vitesses admissibles par le système, nous pouvons noter que seulement cinq trajectoires ont un profil de vitesse non nul (figure 5.16). Les autres trajectoires sont non admissibles par le véhicule vu sa vitesse d'évolution. Bien évidemment, les trajectoires calculées passent par la zone libre de l'environnement. La figure 5.17 représente la trajectoire ainsi que la vitesse réalisée lors du contournement. On observe une décélération du véhicule : celle-ci venant du problème de la tâche de perception déjà cité auparavant.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref



(a) Vue de dessus des trajectoires générées sur la grille d'élévation

(b) Profils de vitesse des quatre trajectoires générées

FIGURE 5.16 – Espace des vitesses admissibles par le véhicule avant le contournement de l'élément infranchissable

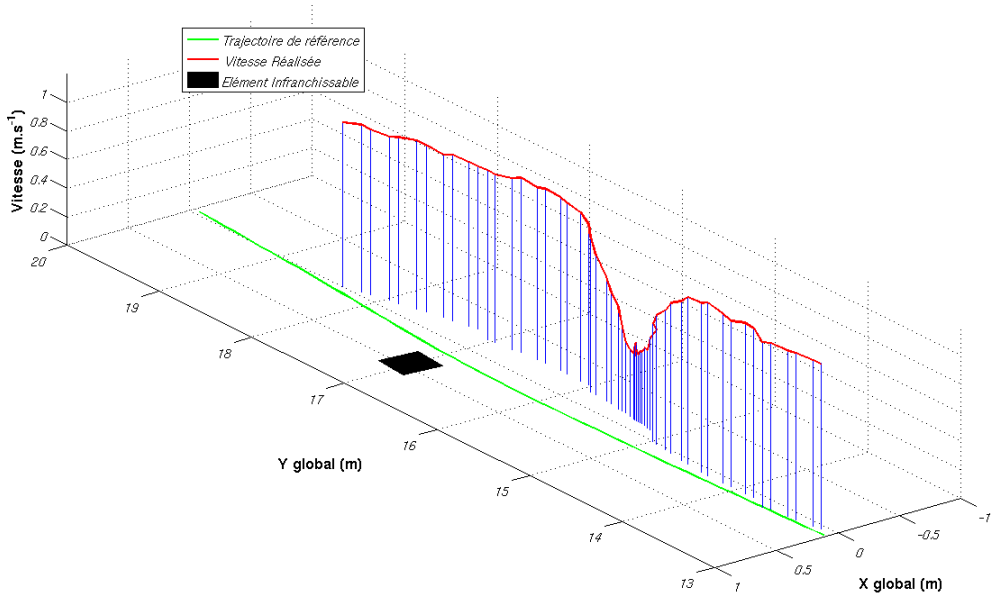


FIGURE 5.17 – Trajectoire et vitesse réalisées lors du contournement de l'élément infranchissable

5.3 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons présenté le véhicule expérimental AROCO, ainsi que les capteurs embarqués. Les profils de vitesse calculés et

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

exécutés par le véhicule respectent bien les contraintes imposées par les éléments rencontrés de l'environnement (ralentisseur et élément infranchissable). Ces travaux ont été présentés au cours de diverses manifestations notamment lors du Symposium ROBOTICS 2010 [1] sur le site du Cemagref à Montoldre (Allier, 03) prouvant ainsi le bon fonctionnement et l'efficacité de notre système face à des environnements naturels complexes. Nous avons analysé les capacités du véhicule et remarqué que les temps de retards des actionneurs, notamment en ce qui concerne le modèle d'évolution de la vitesse, entraînent des limites importantes de notre système par rapport aux tests réalisés en simulation. Ces temps de retards vont avoir un impact important sur la vitesse maximum d'évolution du véhicule mais aussi sur les capacités de contournement de celui-ci. De plus, nous avons pu aussi apercevoir les limites liés au manque de fiabilité de la tâche de perception. A l'heure actuelle, le système n'est pas capable de gérer les incertitudes liées à la reconstruction du monde environnant. Il faudrait que la tâche de perception puisse calculer un indice de confiance des données reçues. Malgré cela, nous avons pu constater que notre système assure tout de même une intégrité physique même si cela se traduit par l'arrêt du véhicule.

1. http ://fr.robotics2010.org/

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Chapitre 6

Travaux en cours - Perpectives

Dans ce chapitre, nous proposons d'autres pistes permettant d'améliorer notre système. En effet, il aurait été intéressant de reprendre quelques parties de notre système actuel mais le manque de temps et les contraintes liées à l'implémentation temps-réel n'ont pas permis de les tester.

6.1 Représentation continue de l'environnement

Pour modéliser notre environnement, nous avons fait le choix d'utiliser une grille d'élévation. Cependant, ce choix entraîne une discontinuité sur le calcul des vitesses. Il aurait pu être intéressant de modéliser la surface de l'environnement par une fonction f_{MNT}. Cette fonction aurait comme caractéristiques d'être continue et représentative de l'environnement et obtenues à partir d'une grille lissée par des fonctions polynomiales par morceaux généralement appelées splines. Le principe consiste à considérer seize points (figure 6.1), puis on détermine la fonction du carré central par la formule suivante :

$$Z(u,v) = [u^3 u^2 u\ 1].M_{spline}.\begin{bmatrix} P1 & P2 & P3 & P4 \\ P5 & P6 & P7 & P8 \\ P9 & P10 & P11 & P12 \\ P13 & P14 & P15 & P16 \end{bmatrix}.M_{spline}^{T}.\begin{bmatrix} v^3 \\ v^2 \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

avec u et v les paramètres de la fonction ($(u,v) \in [0;1] \times [0;1]$), et M_{spline} la matrice de pondération correspondant à la méthode de splines utilisée. L'avantage des splines est que nous pouvons obtenir des propriétés comme la continuité de courbure par exemple entre des morceaux successifs. Pour avoir une représentation de la fonction globale représentant l'environnement dans la zone de calcul, il suffit d'utiliser un changement de variable pour passer du

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

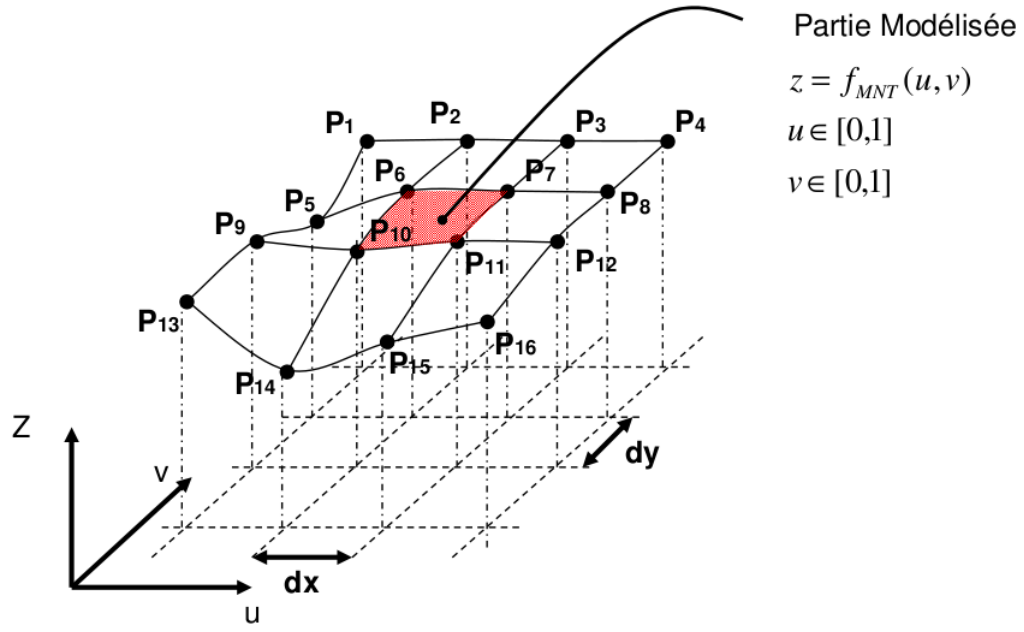


FIGURE 6.1 – Exemple de la détermination de la fonction par morceaux

couple (X, Y) les coordonnées dans le repère local du véhicule au couple (u, v) paramètres des morceaux grâce à une fonction en "dents de scie", telle que :

$$u = \frac{X - X_0}{dx} - VE(\frac{X - X_0}{dx}) \tag{6.2}$$

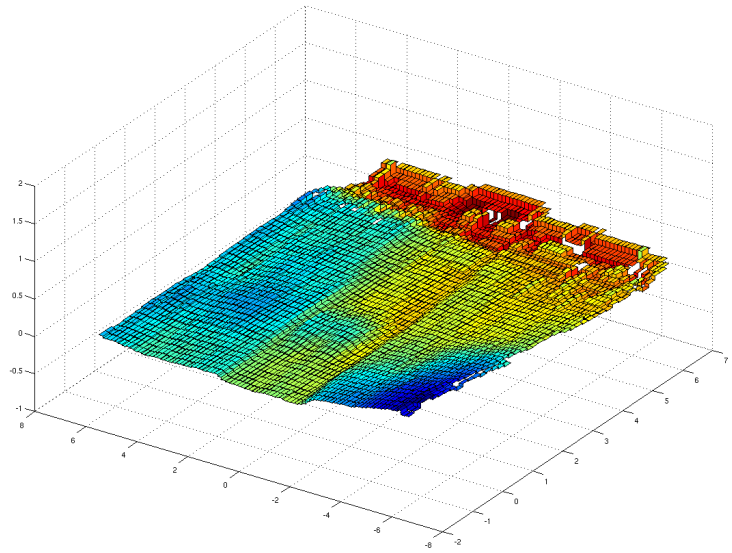
$$v = \frac{Y - Y_0}{dy} - VE(\frac{Y - Y_0}{dy}) \tag{6.3}$$

avec la fonction VE signifiant la valeur entière.

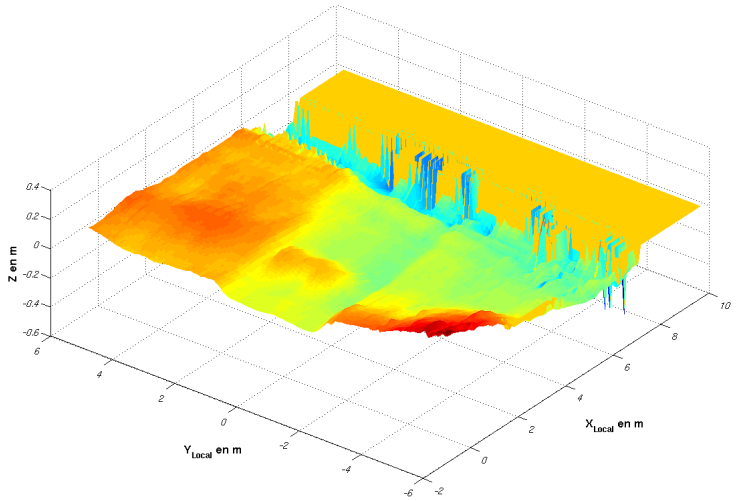
Nous pouvons voir le résultat obtenu avec une méthode du Catmull-Rom sur la figure 6.2. Cette modélisation permet d'assurer une continuité C1. On pourrait choisir une modélisation de type B-spline qui assure une continuité C2.

Grâce à cette représentation, il est possible de réaliser une étude paramétrique pour déterminer les poses du robot sur les différentes trajectoires voire l'espace de vitesse directement établie par la fonction f_{MNT}.
Cette représentation est utilisée dans [Shiller 1999], où il s'agit de déterminer le profil de vitesse pour une trajectoire en fonction de divers paramètres tels que le transfert de charge, ou les effets des glissements.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref



(a) Grille d'élévation obtenu servant de modèle pour la modélisation



(b) Résultat de la modélisation avec le choix de la méthode de Catmull-Rom qui permet d'assurer une continuité C1.

FIGURE 6.2 – Comparaison de la grille d'élévation et de la fonction paramétrable par morceaux

6.2 Une loi de commande chainée exacte

Nous avons fait le choix de rechercher une loi de commande quadratique optimale d'ordre N. Or lors de l'élaboration de cette loi de commande, nous avions une fonction d'évolution non linéaire et avons dû faire des approximations de Taylor d'ordre 1 qui entraînent des erreurs considérées dans notre cas

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

comme négligeables. Une solution envisageable afin d'avoir une linéarisation exacte est d'utiliser un système chainé. La figure 6.3 montre le modèle du véhicule relativement à la trajectoire.

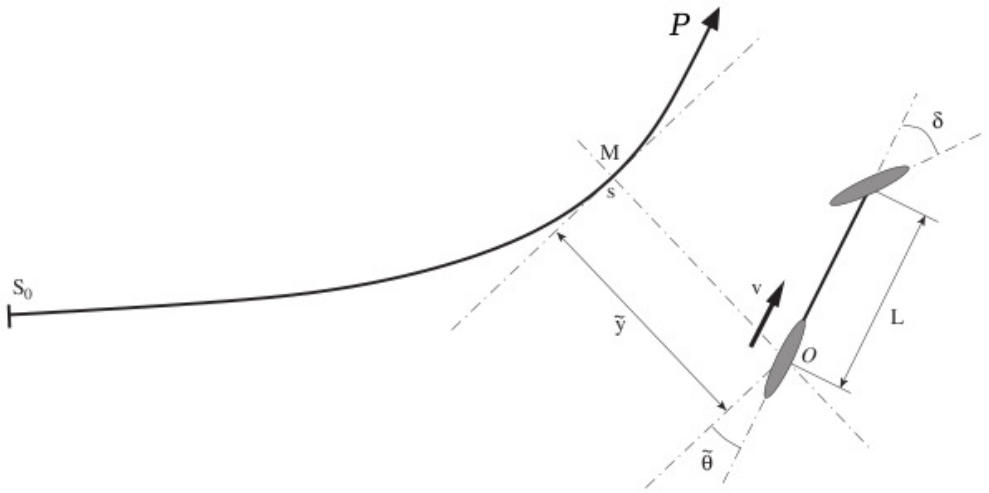


FIGURE 6.3 – Modèle bicyclette

Les notations permettant de décrire le mouvement du véhicule sont définies en fonction de la tâche de suivi. Les paramètres relatifs à la trajectoire de référence qui interviennent dans les équations d'évolution du véhicule, sont listés ci-après :

- P est la trajectoire à suivre, ou trajectoire de référence.
- O est le centre de l'essieu arrière du véhicule (point de contrôle).
- M est le point appartenant à la trajectoire P le plus proche du point de contrôle O.
- s est l'abscisse curviligne de M le long de P, et $c(s)$ définit la courbure de C en ce point.
- $\tilde{y}$ est la distance entre les points O et M représente l'écart latéral entre le véhicule et la trajectoire de référence.
- $\tilde{\theta}$ est l'écart angulaire entre le véhicule et la trajectoire de référence.
- δ est l'angle de braquage des roues avant.
- V est la vitesse longitudinale du véhicule (vitesse du point O).
- L est la valeur d'empattement du véhicule (distance entre le centre de l'essieu avant et celui de l'essieu arrière).

Avec ces notations, le véhicule est complètement caractérisé par la position du point O par rapport à P, ainsi que par son orientation par rapport à la tangente à P au point M. Le vecteur d'état à contrôler est donc défini par le vecteur $[s\ \tilde{y}\ \tilde{\theta}]^T$.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

A partir des notations précédentes, le modèle cinématique du véhicule peut être défini par le système 6.4 comme donné dans [Thuilot 2002].

$$\left|\begin{array}{rcl}\dot{s} & = & V.\frac{cos\tilde{\theta}}{1-c(s).\tilde{y}} \\ \dot{\tilde{y}} & = & V.sin\tilde{\theta} \\ \dot{\tilde{\theta}} & = & V.(\frac{tan\delta}{L} - \frac{c(s).cos\tilde{theta}}{1-c(s).\tilde{y}}\end{array}\right. \tag{6.4}$$

On suppose que $\tilde{y} \neq \frac{1}{c(s)}$, c'est-à-dire que le véhicule n'est pas au centre de courbure de la trajectoire. Nous cherchons à amener et de réguler les variables d'état $\tilde{y}$ et $\tilde{\theta}$ à zéro. Le modèle non-linéaire 6.4 peut être converti de manière exacte, sous une forme chaînée (voir [Samson 1995]). Dans ce cas, nous posons le vecteur d'état chaîné $(a_1, a_2, a_3)^T$ par :

$$\left|\begin{array}{rcl}a_1 & = & s \\ a_2 & = & \tilde{y} \\ a_3 & = & (1 - c(s).\tilde{y}).tan\tilde{\theta}\end{array}\right. \tag{6.5}$$

et le vecteur de commande chaîné $M = (m_1, m_2)^T$ par :

$$\left|\begin{array}{rcl}m_1 & = & \frac{da_1}{dt} \\ m_2 & = & \frac{da_3}{dt}\end{array}\right. \tag{6.6}$$

La conversion du système 6.4 en un système chaîné 6.5 permet d'obtenir une forme linéaire exacte.
L'expression de la variable de commande δ peut être obtenue en inversant la transformation chaînée de la loi de commande. Le calcul, détaillé dans [Thuilot 2004] donne :

$$\begin{array}{c}\delta(\tilde{y}, \tilde{\theta}) = arctan(L.[\frac{cos^3\tilde{\theta}}{(1-c(s).\tilde{y})^2}.(\frac{dc(s)}{ds}.\tilde{y}.tan\tilde{\theta} - K_d.(1 - c(s).\tilde{y}).tan\tilde{\theta} \\ -K_p.\tilde{y} + c(s).(1 - c(s).\tilde{y}).tan^2\tilde{\theta} + \frac{c(s).cos\tilde{\theta}}{1-c(s).\tilde{y}}])\end{array} \tag{6.7}$$

où K_p et K_d sont respectivement les gains proportionnels et dérivatifs ($K_p > 0$ et $K_d > 0$).

Pour plus de cohérence, nous avons choisi d'utiliser la même loi de commande pour la génération de trajectoires et le contrôle du robot. De plus, notre choix s'est porté sur un algorithme de commande qui suppose de nombreuses approximations. Nous aurions pu prendre la loi de commande présentée comme base de la génération de trajectoires et contrôle du véhicule qui nous donne une expression littérale sans approximation. Il aurait été intéressant de voir les différences que cela engendre d'un point de vue génération de trajectoires. En effet, l'expression de la loi de commande parait plus simple et moins coûteuses en temps de calcul, il aurait été bien de voir si cette loi de commande améliore aussi le contrôle du robot.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

6.3 Une génération de trajectoires basée sur un tirage aléatoire de la commande

Une autre amélioration qui peut être intéressante pour ces travaux est de généraliser le type de trajectoires générées. Afin de générer nos trajectoires, on a choisi d'agir sur l'écart latéral Γ entre la trajectoire de référence et celles générées. Ainsi, nous déterminions les commandes successives d'un ensemble de trajectoires supposé canonique. Pour généraliser, on propose de réaliser un tirage aléatoire sur la commande δ.
Prenons un exemple simple. Si on définit l'ensemble des commandes possibles du train directeur à un instant k par trois valeurs $(\delta_k - \Delta, \delta_k, \delta_k + \Delta)$ avec Δ répresentant le débattement possible de l'angle de braquage durant une itération du système. Si on considère que la probabilité d'avoir une de ces commandes est équivalente, nous pouvons obtenir une génération de trajectoire aléatoire (figure 6.4).

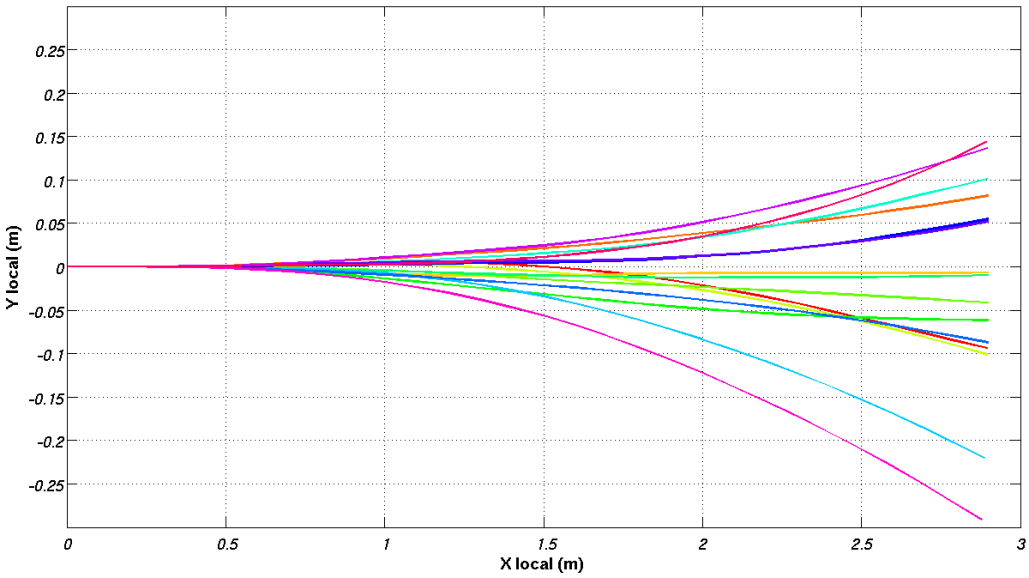


FIGURE 6.4 – Exemple de génération de 15 trajectoires avec une commande aléatoire simple : *pour cette génération nous avons choisi* $\Delta = 3^\circ$ *et un horizon de distance de prédiction de* $3m$ *c'est-à-dire 15 pas d'échantillonnage*

Cependant, nous avons fait le choix de ne pas investiguer davantage cette solution car pour que la génération de trajectoires soit assez représentative des ensembles d'action à mener il faudrait en générer un grand nombre (nombre de trajectoire supérieur à 30) ce qui est incompatible pour notre système qui doit en plus calculer les profils de vitesse et choisir la meilleure sans oublier la construction de la grille d'évolution.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

6.4 Utilisation d'un véhicule virtuel

Un dernier point intéressant serait de pouvoir utiliser notre simulateur dans le système pour tester les différentes stratégies de navigation du système. En effet, lors de nos travaux, nous avons élaboré un logiciel capable de simuler un véhicule dans un environnement. Ce logiciel est en mesure de calculer le comportement dynamique du véhicule sur cet environnement. Il pourrait donc être utilisé dans la détermination de l'intégrité physique du véhicule pour les différentes trajectoires générées. Cependant, à l'heure actuelle, nous utilisons la libraire open-source ODE (Open Dynamics Engine) qui permet avoir un comportement plus ou moins réaliste du véhicule. Une étude est à mener afin d'utiliser d'autres solutions technologiques (librairie PhysX [1] par exemple) et de déterminer l'exactitude du comportement dynamique du véhicule en le comparant à des logiciels de référence comme ADAMS par exemple. Si nous obtenions un simulateur réaliste et qui soit capable de simuler plusieurs trajectoires en un temps très faible, nous pourrions évaluer la préservation de l'intégrité physique du véhicule pour un ensemble important de trajectoires. Nous aurions donc "un véhicule virtuel" effectuant chacune des trajectoires générées. Il nous serait aisé de choisir la plus optimale en fonction du critère choisi.

1. http ://www.nvidia.com/object/physx_new.html

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Conclusion

Dans ce manuscrit, nous avons proposé un système de guidage automatique pour une navigation sûre dans un monde ouvert. L'idée principale est de contrôler la direction et la vitesse du véhicule afin de préserver son intégrité physique et celle de son environnement. Pour cela, nous avons proposé une généralisation du concept d'obstacle permettant d'estimer l'espace des vitesses admissibles par le véhicule en fonction de la surface de navigation.

Nous avons alors proposé pour le système de navigation l'architecture suivante :

- une étape permettant de focaliser la reconstruction de l'environnement pour la tâche de perception : pour cela, une zone d'attention est établie en intégrant l'objectif à respecter (couloir de navigation) ainsi que les capacités de mobilité du véhicule.
- un module de génération de trajectoires : cette génération est basée sur une loi de commande quadratique optimale d'horizon fini. Le principe est de déterminer les commandes successives du véhicule puis de calculer grâce à la fonction d'évolution du véhicule ses positions successives. Au final, nous obtenons un nombre restreint de trajectoires réalisables par le véhicule. Dans ces premiers travaux, ces trajectoires sont toutes parallèles afin d'optimiser l'efficacité du système.
- une étape d'estimation du profil de vitesse de chaque trajectoire générée : pour cela, l'environnement est représenté par une grille d'élévation locale sur laquelle nous effectuons un posé de robot. Il est ensuite possible de prédire le transfert de charge latéral et longitudinal en fonction du comportement dynamique du véhicule. Un profil de vitesse limitant ces transferts de charge en est alors déduit. Ce profil de vitesse intègre également le respect des contraintes liées à la tâche de perception.
- la sélection de la trajectoire optimale par rapport à un critère défini par l'opérateur : ce critère intègre la distance entre le véhicule et la trajectoire de référence, l'écart entre le profil de vitesse et la valeur nominale ainsi que la dépense énergétique. Ce critère définira le type de comportement du véhicule face à des éléments de son environnement mettant en cause son intégrité.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Afin d'analyser les résultats de notre système face à des scénarios divers et variés qui peuvent être difficiles et longs à mettre en place pour des expérimentations réelles, nous avons développé un logiciel capable de simuler un véhicule circulant dans un environnement virtuel. Il est constitué d'un moteur de rendu 3D, d'un moteur physique et d'un système d'ordonnancement de données temps-réel. Ainsi, nous avons pu étudier les avantages et les limites de notre système de navigation à travers des scénarios canoniques et reproductibles. Depuis, il est devenu un outil efficace pour réaliser les tests de nos algorithmes avant les expérimentations réelles.

Nous avons finalement testé le système sur notre véhicule expérimental AROCO afin d'examiner le comportement du système face à un environnement réel intégrant un élément franchissable à faible vitesse et un élément totalement infranchissable. Si les expérimentations réelles ont montré la pertinance des solutions proposées, les limites de performance (par rapport aux simulations) sont en grande partie dues au manque de précision du MNT reconstruit par la tâche de perception.

A travers ce manuscrit, nous avons proposé une solution pour assurer l'intégrité physique d'un véhicule. Au delà de la généralisation de la notion d'obstacle, cette méthode comporte l'avantage de permettre une implémentation temps réel puisque la dynamique du véhicule est gérée en fonction des ressources disponibles. Cette méthode est basée sur la connaissance a priori des capacités du véhicule et de ses capteurs sans oublier les objectifs de l'application. Grâce à cela, il est possible d'optimiser les méthodes déjà existantes.

L'absence d'incertitude sur les données fournies par la tâche de perception entraîne quelques limites nuisibles au comportement global du véhicule. Si nous voulons aboutir à un système fiable et efficace, il faudra que la tâche de commande soit en mesure de communiquer en plus de la zone d'attention du système, la précision souhaitée du MNT reconstruit. Alors la tâche de perception devra respecter cette consigne en fonction de la précision de ses capteurs et de ses algorithmes de reconstruction et dans le cas contraire en informer la tâche de guidage. Plus exactement, la tâche de perception devra renvoyer la précision du MNT reconstruit ainsi qu'une mesure de confiance des résultats obtenus (comme dans [Tessier 2007]). Nous pourrions alors considérer la tâche de perception comme un processus actif qui va, en fonction des connaissances a priori de ses capteurs et de ses algorithmes, informer de l'indice de confiance des données envoyées ; cette tâche de perception deviendrait alors "intelligente" ou cognitive. La tâche de guidage quant à elle devrait prendre en compte cet indice pour réaliser le meilleur choix, elle devrait donc être attentive à la perception ; on pourrait alors la qualifier de "attentionnée". Toutes

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

deux formeraient alors un système de guidage automatique fiable et optimal du point de vue de l'application.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Annexe A

Etude Dynamique Véhicule

Dans cette annexe, nous allons présenter les calculs détaillés des transferts de charge latéral et longitudinal. Pour cela, nous allons réaliser deux études, tout d'abord le cas latéral ensuite le cas longitudinal. Ces études sont inspirées des travaux réalisés dans notre équipe ([Bouton 2010]).

A.1 Transfert de charge Latéral

A.1.1 Présentation du modèle et des repères associés

La figure A.1 montre le modèle utilisé dans l'étude du cas latéral.
Nous obtenons donc les équations suivantes :

$$\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{2/\mathbb{R}_1}} = \dot{\varphi}_s.\vec{x}_2 = \dot{\varphi}_s.\vec{x}_1 \tag{A.1}$$

$$\begin{array}{rcl} \vec{x}_2 & = & \vec{x}_1 \\ \vec{y}_2 & = & \cos(\varphi_s).\vec{y}_1 + \sin(\varphi_s).\vec{z}_1 \\ \vec{z}_2 & = & -\sin(\varphi_s).\vec{y}_1 + \cos(\varphi_s).\vec{z}_1 \end{array} \tag{A.2}$$

$$\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{1/\mathbb{R}_0}} = \dot{\theta}.\vec{z}_1 = \dot{\theta}.\vec{z}_0 \tag{A.3}$$

$$\begin{array}{rcl} \vec{x}_1 & = & \cos(\theta).\vec{x}_0 + \sin(\theta).\vec{y}_0 \\ \vec{y}_1 & = & -\sin(\theta).\vec{x}_0 + \cos(\theta).\vec{y}_0 \\ \vec{z}_1 & = & \vec{z}_0 \end{array} \tag{A.4}$$

avec :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

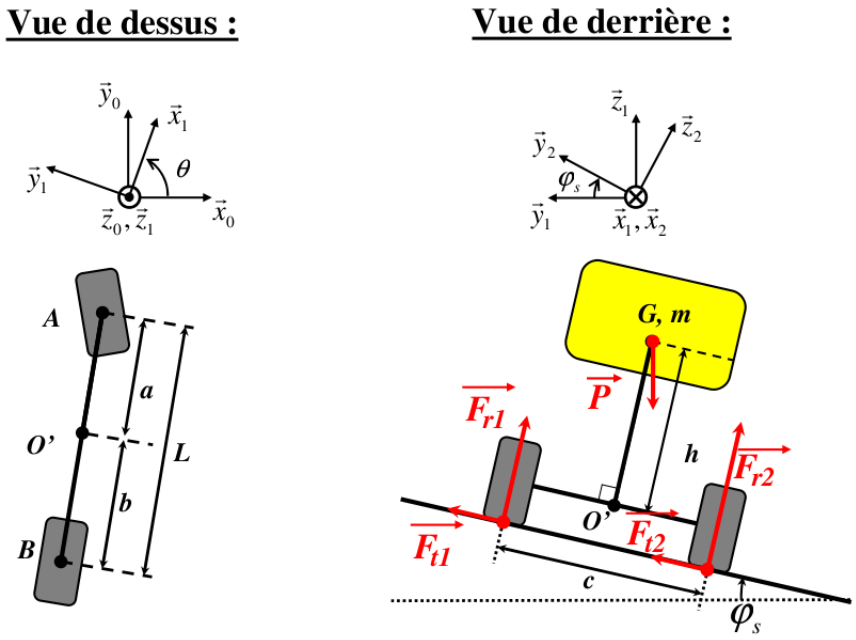


FIGURE A.1 – Modèle utilisé pour le calcul de transfert de charge latéral

- φ_s le roulis du véhicule,
- θ le lacet du véhicule.

Maintenant, nous allons réaliser une étude dynamique sur le véhicule.

A.1.2 Etude dynamique pour le cas latéral

Tout d'abord, nous calculons l'accélération du centre de gravité G du véhicule cela passe par le calcul de sa vitesse.

Calcul de la vitesse de G :

Par définition, on a :

$$\overrightarrow{V_{G/\mathbb{R}_0}} = \left(\frac{d\overrightarrow{OG}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = \left(\frac{d(\overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'G})}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = \overrightarrow{V_{O'/\mathbb{R}_0}} + \left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} \quad \text{(A.5)}$$

Calculons les deux termes de l'équation A.5.

- calcul de $\overrightarrow{V_{O'/\mathbb{R}_0}}$:

$$\overrightarrow{V_{O'/\mathbb{R}_0}} = \overrightarrow{V_B} + \overrightarrow{O'B} \wedge \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_1/\mathbb{R}_0}$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$\begin{aligned} &= v.\vec{x}_1 - b.\vec{x}_1 \wedge \dot{\theta}.\vec{z}_1 \\ &= v.\vec{x}_1 + b.\dot{\theta}.\vec{y}_1 \end{aligned} \tag{A.6}$$

- calcul de $\left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0}$:

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} &= \left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_2} + \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_2/\mathbb{R}_0} \wedge \overrightarrow{O'G} \\ &= \overrightarrow{0} + (\dot{\theta}.\vec{z}_1 + \dot{\varphi}_s.\vec{x}_1) \wedge h.\vec{z}_2 \\ &= \begin{vmatrix} \dot{\varphi}_s \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \wedge \begin{vmatrix} 0 \\ -h.\sin(\varphi_s) \\ h.\cos(\varphi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \\ &= h.\begin{vmatrix} \dot{\theta}.\sin(\varphi_s) \\ -\dot{\varphi}_s.\cos(\varphi_s) \\ -\dot{\varphi}_s.\sin(\varphi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \end{aligned} \tag{A.7}$$

Calcul de l'accélération de G :

Par définition, on a :

$$\overrightarrow{a_{G/\mathbb{R}_0}} = \left(\frac{d\vec{V}_G}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = \left(\frac{d\overrightarrow{V_{O'}}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} + \left(\frac{d^2\overrightarrow{O'G}}{dt^2}\right)_{\mathbb{R}_0} \tag{A.8}$$

Calculons les deux termes de l'équation A.8.

- calcul de $\left(\frac{d\overrightarrow{V_{O'}}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0}$:

$$\left(\frac{d\overrightarrow{V_{O'}}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = \dot{v}.\vec{x}_1 + v.\left(\frac{d\vec{x}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} + b.\ddot{\theta}.\vec{y}_1 + b.\dot{\theta}.\left(\frac{d\vec{y}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} \tag{A.9}$$

or :

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\vec{x}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} &= \left(\frac{d\vec{x}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_1} + \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_1/\mathbb{R}_0} \wedge \vec{x}_1 \\ &= \overrightarrow{0} + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \wedge \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} = \dot{\theta}.\vec{y}_1 \end{aligned} \tag{A.10}$$

$$\left(\frac{d\vec{y}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = \left(\frac{d\vec{y}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_1} + \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_1/\mathbb{R}_0} \wedge \vec{y}_1$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$= \overrightarrow{0} + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \wedge \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} = -\dot{\theta}.\vec{x}_1 \tag{A.11}$$

D'où, on a :

$$\left(\frac{d\overrightarrow{V_{O'}}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = (\dot{v} - b.\dot{\theta}^2).\vec{x}_1 + (b.\ddot{\theta} + v.\dot{\theta}).\vec{y}_1 \tag{A.12}$$

- calcul de $\left(\frac{d^2\overrightarrow{O'G}}{dt^2}\right)_{\mathbb{R}_0}$:

$$\left(\frac{d^2\overrightarrow{O'G}}{dt^2}\right)_{\mathbb{R}_0} = \left(\frac{d^2\overrightarrow{O'G}}{dt^2}\right)_{\mathbb{R}_1} + \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_1/\mathbb{R}_0} \wedge \left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} \tag{A.13}$$

avec :
– calcul de $\left(\frac{d^2\overrightarrow{O'G}}{dt^2}\right)_{\mathbb{R}_1}$:

$$\left(\frac{d^2\overrightarrow{O'G}}{dt^2}\right)_{\mathbb{R}_1} = h. \begin{vmatrix} \ddot{\theta}.\sin(\varphi_s) + \dot{\theta}.\dot{\varphi}_s.\cos(\varphi_s) \\ -\ddot{\varphi}_s.\cos(\varphi_s) + \dot{\varphi}_s^2.\sin(\varphi_s) \\ -\ddot{\varphi}_s.\sin(\varphi_s) - \dot{\varphi}_s^2.\cos(\varphi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \tag{A.14}$$

– calcul de $\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_1/\mathbb{R}_0} \wedge \left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0}$:

$$\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_1/\mathbb{R}_0} \wedge \left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = h. \begin{vmatrix} -\dot{\theta}.\dot{\varphi}_s.\cos(\varphi_s) \\ \dot{\theta}^2.\sin(\varphi_s) \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \tag{A.15}$$

Finalement, on obtient :

$$\boxed{\begin{array}{lcc} \overrightarrow{a_G}.\vec{x}_1 & = & \dot{v} - b.\dot{\theta}^2 + h.\ddot{\theta}.\sin(\varphi_s) \\ \overrightarrow{a_G}.\vec{y}_1 & = & b.\ddot{\theta} + v.\dot{\theta} + h.(-\ddot{\varphi}_s.\cos(\varphi_s) + (\dot{\varphi}_s^2 + \dot{\theta}^2).\sin(\varphi_s)) \\ \overrightarrow{a_G}.\vec{z}_1 & = & h.(-\ddot{\varphi}_s.\sin(\varphi_s) + \dot{\varphi}_s^2.\cos(\varphi_s)) \end{array}} \tag{A.16}$$

Après avoir déterminer l'accélération du centre d'inertie du véhicule en fonction des paramètres φ_s et θ, nous devons déterminer le moment dynamique en G du véhicule.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Calcul du moment dynamique

Par définition, le moment dynamique en G (centre de gravité du véhicule) est donné par :

$$\overrightarrow{\sigma_G} = I_{G/\mathbb{R}_2}.(\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{2/\mathbb{R}_0}})_{\mathbb{R}_2} \tag{A.17}$$

avec :

$$(\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{2/\mathbb{R}_0}})_{\mathbb{R}_2} = \begin{vmatrix} \dot{\varphi}_s \\ \dot{\theta}.\sin(\varphi_s) \\ \dot{\theta}.\cos(\varphi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \tag{A.18}$$

d'où, nous obtenons :

$$\overrightarrow{\sigma_G} = \begin{vmatrix} I_x.\dot{\varphi}_s \\ I_y.\dot{\theta}.\sin(\varphi_s) \\ I_z.\dot{\theta}.\cos(\varphi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \tag{A.19}$$

Seule la composante du moment dynamique sur $\vec{x}_2$ est nécessaire pour trouver les efforts normaux $\vec{F}_{r1}$ et $\vec{F}_{r2}$ et on a :

$$\overrightarrow{\delta_G} = \left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = \left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_2} + \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{2/\mathbb{R}_0}} \wedge \overrightarrow{\sigma_G} \tag{A.20}$$

On obtient :

$$\overrightarrow{\delta_G}.\vec{x}_2 = \left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_2}.\vec{x}_2 + \left(\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{2/\mathbb{R}_0}} \wedge \overrightarrow{\sigma_G}\right)\vec{x}_2 = \left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_2}.\vec{x}_2 + (\overrightarrow{\sigma_G} \wedge \vec{x}_2).\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{2/\mathbb{R}_0}} \tag{A.21}$$

Il nous faut calculer les deux termes de $\overrightarrow{\delta_G}.\vec{x}_2$.

- calcul de $\left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_2}.\vec{x}_2$:

$$\left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_2}.\vec{x}_2 = I_x.\ddot{\varphi}_s \tag{A.22}$$

- calcul de $(\overrightarrow{\sigma_G} \wedge \vec{x}_2).\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{2/\mathbb{R}_0}}$:

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$
\begin{aligned}
(\overrightarrow{\sigma_G} \wedge \vec{x}_2) \,.\, \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_2/\mathbb{R}_0} &= \left(\begin{vmatrix} I_x.\dot{\varphi}_s \\ I_y.\dot{\theta}.\sin(\varphi_s) \\ I_z.\dot{\theta}.\cos(\varphi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \wedge \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \right) . \begin{vmatrix} \dot{\varphi}_s \\ \dot{\theta}.\sin(\varphi_s) \\ \dot{\theta}.\cos(\varphi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \\
&= \begin{vmatrix} 0 \\ I_z.\dot{\theta}.\cos(\varphi_s) \\ -I_y.\dot{\theta}.\sin(\varphi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} . \begin{vmatrix} \dot{\varphi}_s \\ \dot{\theta}.\sin(\varphi_s) \\ \dot{\theta}.\cos(\varphi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \\
&= (I_z - I_y).\dot{\theta}^2.\cos(\varphi_s).\sin(\varphi_s) \qquad \text{(A.23)}
\end{aligned}
$$

Finalement on trouve :

$$
\boxed{\overrightarrow{\delta_G}.\vec{x}_2 = I_x.\ddot{\varphi}_s + (I_z - I_y).\dot{\theta}^2.\cos(\varphi_s).\sin(\varphi_s)} \qquad \text{(A.24)}
$$

A ce moment de l'analyse, nous devons faire le bilan des forces exercées sur le véhicule.

Bilan des Forces

Nous avons trois forces qui sont exercées sur le véhicule, elles sont :
- l'action normale gauche : $\overrightarrow{F_1} = F_{t1}.\vec{y}_2 + F_{r1}.\vec{z}_2$,
- l'action normale droite : $\overrightarrow{F_2} = F_{t2}.\vec{y}_2 + F_{r2}.\vec{z}_2$,
- le poids du véhicule : $\overrightarrow{P} = -m.g.\vec{z}_0 = -m.g.\sin(\varphi_s).\vec{y}_2 - m.g.\cos(\varphi_s).\vec{z}_2$.

Maintenant, calculons les différents moments appliqués au point G.

Bilan des Moments appliqué en G

Le moment dû à l'action du sol sur la roue gauche $\overrightarrow{F_1}$ au point G est donné par :

$$
\begin{aligned}
\overrightarrow{M_{G_{\vec{F}_1}}} &= \overrightarrow{M_{P_{\vec{F}_1}}} + \overrightarrow{GP} \wedge \overrightarrow{F_1} \\
&= \begin{vmatrix} 0 \\ \frac{c}{2} \\ -h - \frac{D}{2} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \wedge \begin{vmatrix} 0 \\ F_{t1} \\ F_{r1} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \\
&= \left(\frac{c}{2}.F_{r1} + \left(h + \frac{D}{2} \right).F_{t1} \right).\vec{x}_2 \qquad \text{(A.25)}
\end{aligned}
$$

Le moment dû à l'action normale droite $\overrightarrow{F_{r2}}$ au point G est donné par :

$$
\begin{aligned}
\overrightarrow{M_{G_{\vec{F}_2}}} &= \overrightarrow{M_{Q_{\vec{F}_2}}} + \overrightarrow{GQ} \wedge \overrightarrow{F_2} \\
&= \begin{vmatrix} 0 \\ -\frac{c}{2} \\ -h - \frac{D}{2} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \wedge \begin{vmatrix} 0 \\ F_{t2} \\ F_{r2} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2}
\end{aligned}
$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$= \left(-\frac{c}{2}.F_{r2} + \left(h + \frac{D}{2}\right).F_{t2}\right).\vec{x}_2 \quad (A.26)$$

Nous pouvons dorénavant utiliser le principe fondamental de la dynamique.

Equation des forces en $\vec{y}_2$

$$F_{t1} + F_{t2} - m.g.\sin(\varphi_s) = m.\overrightarrow{a_G}.\vec{y}_2 \quad (A.27)$$

$$\boxed{F_{t1} + F_{t2} = m.\left[(b.\ddot{\theta} + v.\dot{\theta}).\cos(\varphi_s) + h.(\ddot{\varphi}_s + (2\dot{\varphi}_s^2 + \dot{\theta}^2).\cos(\varphi_s).\sin(\varphi_s)) + g.\sin(\varphi_s)\right]} \quad (A.28)$$

Equation des forces en $\vec{z}_2$

$$F_{r1} + F_{r2} - m.g.\cos(\varphi_s) = m.\overrightarrow{a_G}.\vec{z}_2 \quad (A.29)$$

$$\boxed{F_{r1} + F_{r2} = -m.\left[(b.\ddot{\theta} + v.\dot{\theta}).\sin(\varphi_s) + h.(\dot{\varphi}_s^2.(1 - 2.\cos^2(\varphi_s)) - \dot{\theta}^2.\sin^2(\varphi_s)) - g.\cos(\varphi_s)\right]} \quad (A.30)$$

Equations des moments en G en $\vec{x}_2$

$$I_x.\ddot{\varphi}_s + (I_z - I_y).\dot{\theta}^2.\cos(\varphi_s).\sin(\varphi_s) = \frac{c}{2}.(F_{r1} - F_{r2})... + (h + \frac{D}{2}).(F_{t1} + F_{t2}) \quad (A.31)$$

$$\boxed{F_{r1} - F_{r2} = \frac{2}{c}.\left[I_x.\ddot{\varphi}_s + (I_z - I_y).\dot{\theta}^2.\cos(\varphi_s).\sin(\varphi_s) - (h + \frac{D}{2}).(F_{t1} + F_{t2})\right]} \quad (A.32)$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Expression du transfert de charge Lateral (TCLat)

Par définition, le transfert de charge latéral $TCLat$ est défini par :

$$TCLat = \left| \frac{F_{r1} - F_{r2}}{F_{r1} + F_{r2}} \right| \tag{A.33}$$

Dans notre cas en utilisant les équations A.28, A.30 et A.32, nous obtenons finalement l'expression :

$$\boxed{\begin{array}{l} TCLat = \frac{2}{m.c}. \left| \frac{I_x.\ddot{\varphi}_s + (I_z - I_y).\dot{\theta}^2.\cos(\varphi_s).\sin(\varphi_s)}{(b.\ddot{\theta} + v.\dot{\theta}).\sin(\varphi_s) + h.(\dot{\varphi}_s^2.(1 - 2.\cos^2(\varphi_s)) - \dot{\theta}^2.\sin^2(\varphi_s)) - g.\cos(\varphi_s)} \right. \\ \left. -m.\frac{(h + \frac{D}{2}).\left[(b.\ddot{\theta} + v.\dot{\theta}).\cos(\varphi_s) + h.(\ddot{\varphi}_s + (2.\dot{\varphi}_s^2 + \dot{\theta}^2).\cos(\varphi_s).\sin(\varphi_s)) + g.\sin(\varphi_s)\right]}{(b.\ddot{\theta} + v.\dot{\theta}).\sin(\varphi_s) + h.(\dot{\varphi}_s^2.(1 - 2.\cos^2(\varphi_s)) - \dot{\theta}^2.\sin^2(\varphi_s)) - g.\cos(\varphi_s)} \right| \end{array}} \tag{A.34}$$

Maintenant que nous avons déterminé la fonction de transfert de charge latéral en fonction de l'évolution du lacet et du roulis du véhicule, nous devons à présent calculer le cas longitudinal.

A.2 Transfert de charge Longitudinal

Pour le calcul du transfert de charge longitudinal, nous allons réaliser les mêmes étapes que dans le cas latéral. Commençons donc par définir le modèle.

A.2.1 Présentation du modèle et des repères associés

La figure A.2.1 montre le modèle utilisé dans l'étude du cas longitudinal. Nous obtenons donc les équations suivantes :

$$\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{2/\mathbb{R}_1}} = \dot{\psi}_s.\vec{y}_2 = \dot{\psi}_s.\vec{y}_1 \tag{A.35}$$

$$\begin{array}{rcl} \vec{x}_2 & = & \cos(\psi_s).\vec{x}_1 + \sin(\psi_s).\vec{z}_1 \\ \vec{y}_2 & = & \vec{y}_1 \\ \vec{z}_2 & = & -\sin(\psi_s).\vec{x}_1 + \cos(\psi_s).\vec{z}_1 \end{array} \tag{A.36}$$

$$\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{1/\mathbb{R}_0}} = \dot{\theta}.\vec{z}_1 = \dot{\theta}.\vec{z}_0 \tag{A.37}$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

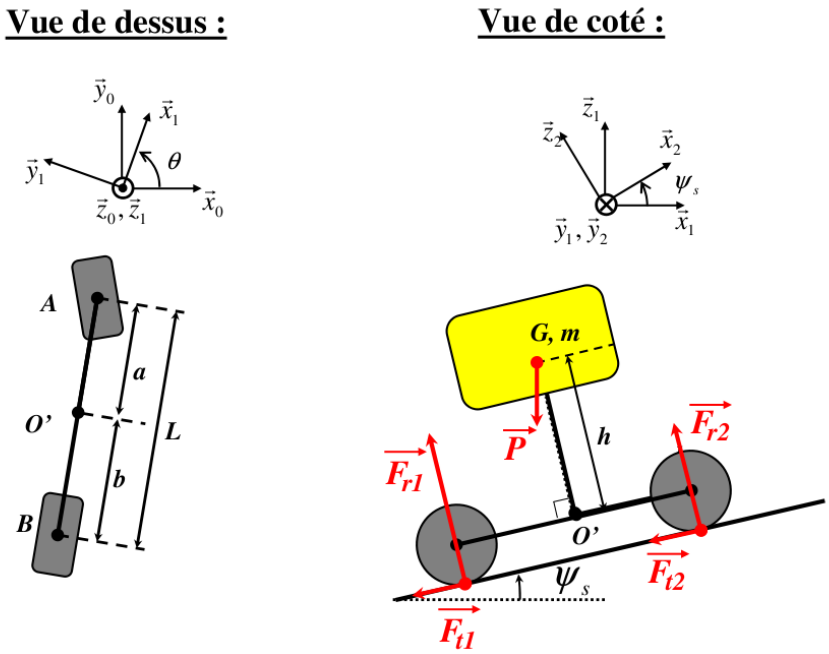


FIGURE A.2 – Modèle utilisé pour le calcul de transfert de charge longitudinal

$$\begin{aligned} \vec{x}_1 &= \cos(\theta).\vec{x}_0 + \sin(\theta).\vec{y}_0 \\ \vec{y}_1 &= -\sin(\theta).\vec{x}_0 + \cos(\theta).\vec{y}_0 \\ \vec{z}_1 &= \vec{z}_0 \end{aligned} \tag{A.38}$$

avec :
- ψ_s le tangage du véhicule,
- θ le lacet du véhicule.

Réalisons l'étude dynamique sur le véhicule.

A.2.2 Etude dynamique pour le cas longitudinal

Tout d'abord, nous calculons l'accélération du centre de gravité G du véhicule, cela passe par le calcul de sa vitesse.

Calcul de la vitesse de G :

Par définition, on a :

$$\overrightarrow{V_{G/\mathbb{R}_0}} = \left(\frac{d\overrightarrow{OG}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = \left(\frac{d(\overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'G})}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = \overrightarrow{V_{O'}} + \left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} \tag{A.39}$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Calculons les deux termes de l'équation A.39.

- calcul de $\overrightarrow{V_{O'}}$:

$$\begin{aligned}
\overrightarrow{V_{O'}} &= \overrightarrow{V_B} + \overrightarrow{O'B} \wedge \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_2/\mathbb{R}_0} \\
&= v.\overrightarrow{x}_2 - b.\overrightarrow{x}_2 \wedge (\dot{\psi}_s.\vec{y}_1 + \dot{\theta}.\vec{z}_1) \\
&= \begin{vmatrix} v.\cos(\psi_s) \\ 0 \\ v.\sin(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} - \begin{vmatrix} b.\cos(\psi_s) \\ 0 \\ b.\sin(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \wedge \begin{vmatrix} 0 \\ \dot{\psi}_s \\ \dot{\theta} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \\
&= \begin{vmatrix} v.\cos(\psi_s) + b.\dot{\psi}_s.\sin(\psi_s) \\ b.\dot{\theta}.\cos(\psi_s) \\ v.\sin(\psi_s) - b.\dot{\psi}_s.\cos(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1}
\end{aligned} \tag{A.40}$$

- calcul de $\left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0}$:

$$\begin{aligned}
\left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} &= \left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_2} + \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_2/\mathbb{R}_0} \wedge \overrightarrow{O'G} \\
&= \overrightarrow{0} + (\dot{\psi}_s.\vec{y}_1 + \dot{\theta}.\vec{z}_1) \wedge h.\vec{z}_2 \\
&= \begin{vmatrix} 0 \\ \dot{\psi}_s \\ \dot{\theta} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \wedge h. \begin{vmatrix} -\sin(\psi_s) \\ 0 \\ \cos(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \\
&= h. \begin{vmatrix} \dot{\psi}_s.\cos(\psi_s) \\ -\dot{\theta}.\sin(\psi_s) \\ \dot{\psi}_s.\sin(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1}
\end{aligned} \tag{A.41}$$

Calcul de l'accélération de G :

Par définition, on a :

$$\overrightarrow{a_{G/\mathbb{R}_0}} = \left(\frac{d\vec{V}_G}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = \left(\frac{d\overrightarrow{V_{O'}}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} + \left(\frac{d^2\overrightarrow{O'G}}{dt^2}\right)_{\mathbb{R}_0} \tag{A.42}$$

Calculons les deux termes de l'équation A.42.

- calcul de $\left(\frac{d\overrightarrow{V_{O'}}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0}$:

$$\begin{aligned}
\left(\frac{d\overrightarrow{V_{O'}}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} &= (\dot{v}.\cos(\psi_s) - v.\dot{\psi}_s.\sin(\psi_s) + b.\ddot{\psi}_s.\sin(\psi_s) + b.\dot{\psi}_s^2.\cos(\psi_s)).\vec{x}_1 + ... \\
&\quad (v.\cos(\psi_s) + b.\dot{\psi}_s.\sin(\psi_s)).\left(\frac{d\vec{x}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} + ...
\end{aligned}$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$
\begin{aligned}
&(b.\ddot{\theta}.\cos(\psi_s) - b.\dot{\theta}.\dot{\psi}_s.\sin(\psi_s)).\vec{y}_1 + ... \\
&b.\dot{\theta}.\cos(\psi_s).\left(\frac{d\vec{y}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} + ... \\
&(\dot{v}.\sin(\psi_s) + v.\dot{\psi}_s.\cos(\psi_s) - b.\ddot{\psi}_s.\cos(\psi_s) + b.\dot{\psi}_s^2.\sin(\psi_s)).\vec{z}_1 + ... \\
&(v.\sin(\psi_s) - b.\dot{\psi}_s.\cos(\psi_s)).\left(\frac{d\vec{z}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} \qquad \text{(A.43)}
\end{aligned}
$$

or :

$$
\begin{aligned}
\left(\frac{d\vec{x}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} &= \left(\frac{d\vec{x}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_1} + \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_1/\mathbb{R}_0} \wedge \vec{x}_1 && \text{(A.44)} \\
&= \overrightarrow{0} + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \wedge \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} = \dot{\theta}.\vec{y}_1 && \text{(A.45)}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\left(\frac{d\vec{y}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} &= \left(\frac{d\vec{y}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_1} + \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_1/\mathbb{R}_0} \wedge \vec{y}_1 && \text{(A.46)} \\
&= \overrightarrow{0} + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \wedge \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} = -\dot{\theta}.\vec{x}_1 && \text{(A.47)}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\left(\frac{d\vec{z}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} &= \left(\frac{d\vec{z}_1}{dt}\right)_{\mathbb{R}_1} + \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_1/\mathbb{R}_0} \wedge \vec{z}_1 && \text{(A.48)} \\
&= \overrightarrow{0} + \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \wedge \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} = \vec{0} && \text{(A.49)}
\end{aligned}
$$

D'où, on a :

$$
\left(\frac{d\overrightarrow{V_{O'}}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = \begin{vmatrix} \dot{v}.\cos(\psi_s) - v.\dot{\psi}_s.\sin(\psi_s) + b.\ddot{\psi}_s.\sin(\psi_s) + b.(\dot{\psi}_s^2 - \dot{\theta}^2).\cos(\psi_s) \\ (v.\dot{\theta} + b.\ddot{\theta}).\cos(\psi_s) \\ \dot{v}.\sin(\psi_s) + v.\dot{\psi}_s.\cos(\psi_s) - b.\ddot{\psi}_s.\cos(\psi_s) + b.\dot{\psi}_s^2.\sin(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \qquad \text{(A.50)}
$$

- calcul de $\left(\frac{d^2\overrightarrow{O'G}}{dt^2}\right)_{\mathbb{R}_0}$:

$$
\left(\frac{d^2\overrightarrow{O'G}}{dt^2}\right)_{\mathbb{R}_0} = \left(\frac{d^2\overrightarrow{O'G}}{dt^2}\right)_{\mathbb{R}_1} + \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_1/\mathbb{R}_0} \wedge \left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} \qquad \text{(A.51)}
$$

avec :

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

– calcul de $\left(\frac{d^2\overrightarrow{O'G}}{dt^2}\right)_{\mathbb{R}_1}$:

$$\left(\frac{d^2\overrightarrow{O'G}}{dt^2}\right)_{\mathbb{R}_1} = h.\begin{vmatrix} \ddot{\psi}_s.\cos(\psi_s) - \dot{\psi}_s^2.\sin(\psi_s) \\ -\ddot{\theta}.\sin(\psi_s) - \dot{\theta}.\dot{\psi}_s.\cos(\psi_s) \\ \ddot{\psi}_s.\sin(\psi_s) + \dot{\psi}_s^2.\cos(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \tag{A.52}$$

– calcul de $\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{2/\mathbb{R}_0}} \wedge \left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0}$:

$$\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{1/\mathbb{R}_0}} \wedge \left(\frac{d\overrightarrow{O'G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = h.\begin{vmatrix} \dot{\theta}^2.\sin(\psi_s) \\ \dot{\theta}.\dot{\psi}_s.\cos(\psi_s) \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_1} \tag{A.53}$$

Finalement , on obtient :

$$\begin{array}{rcl} \overrightarrow{a_G}.\vec{x}_1 & = & \dot{v}.\cos(\psi_s) - v.\dot{\psi}_s.\sin(\psi_s) + b.(\ddot{\psi}_s.\sin(\psi_s) + (\dot{\psi}_s^2 - \dot{\theta}^2).\cos(\psi_s)) + ... \\ & & h.(\ddot{\psi}_s.\cos(\psi_s) + (\dot{\theta}^2 - \dot{\psi}_s^2).\sin(\psi_s)) \\ \overrightarrow{a_G}.\vec{y}_1 & = & (v.\dot{\theta} + b.\ddot{\theta}).\cos(\psi_s) - h.\ddot{\theta}.\sin(\psi_s) \\ \overrightarrow{a_G}.\vec{z}_1 & = & \dot{v}.\sin(\psi_s) + v.\dot{\psi}_s.\cos(\psi_s) - b.(\ddot{\psi}_s.\cos(\psi_s) - \dot{\psi}_s^2.\sin(\psi_s)) + ... \\ & & h.(\ddot{\psi}_s.\sin(\psi_s) + \dot{\psi}_s^2.\cos(\psi_s)) \end{array} \tag{A.54}$$

Après avoir déterminé l'accélération du centre d'inertie du véhicule en fonction des paramètres ψ_s et θ, nous devons déterminer le moment dynamique en G du véhicule.

Calcul du moment dynamique

Par définition, le moment dynamique en G est donné par :

$$\overrightarrow{\sigma_G} = I_{G/\mathbb{R}_2}.(\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{2/\mathbb{R}_0}})_{\mathbb{R}_2} \tag{A.55}$$

avec :

$$(\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_{2/\mathbb{R}_0}})_{\mathbb{R}_2} = \begin{vmatrix} \dot{\theta}.\sin(\psi_s) \\ \dot{\psi}_s \\ \dot{\theta}.\cos(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \tag{A.56}$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

d'où, nous obtenons :

$$\overrightarrow{\sigma_G} = \begin{vmatrix} I_x.\dot{\theta}.\sin(\psi_s) \\ I_y.\dot{\psi}_s \\ I_z.\dot{\theta}.\cos(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \tag{A.57}$$

Seule la composante du moment dynamique sur $\vec{y}_2$ est nécessaire pour trouver les efforts normaux $\vec{F}_{r1}$ et $\vec{F}_{r2}$ et on a :

$$\overrightarrow{\delta_G} = \left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_0} = \left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_2} + \overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_2/\mathbb{R}_0} \wedge \overrightarrow{\sigma_G} \tag{A.58}$$

On obtient :

$$\overrightarrow{\delta_G}.\vec{y}_2 = \left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_2}.\vec{y}_2 + \left(\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_2/\mathbb{R}_0} \wedge \overrightarrow{\sigma_G}\right).\vec{y}_2 = \left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_2}.\vec{y}_2 + \left(\overrightarrow{\sigma_G} \wedge \vec{y}_2\right).\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_2/\mathbb{R}_0} \tag{A.59}$$

Il nous faut calculer les deux termes de $\overrightarrow{\delta_G}.\vec{y}_2$.

- calcul de $\left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_2}.\vec{y}_2$:

$$\left(\frac{d\overrightarrow{\sigma_G}}{dt}\right)_{\mathbb{R}_2}.\vec{y}_2 = I_y.\ddot{\psi}_s \tag{A.60}$$

- calcul de $\left(\overrightarrow{\sigma_G} \wedge \vec{y}_2\right).\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_2/\mathbb{R}_0}$:

$$\begin{aligned} \left(\overrightarrow{\sigma_G} \wedge \vec{y}_2\right).\overrightarrow{\Omega}_{\mathbb{R}_2/\mathbb{R}_0} &= \left(\begin{vmatrix} I_x.\dot{\theta}.\sin(\psi_s) \\ I_y.\dot{\psi}_s \\ I_z.\dot{\theta}.\cos(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \wedge \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \right) . \begin{vmatrix} \dot{\theta}.\sin(\psi_s) \\ \dot{\psi}_s \\ \dot{\theta}.\cos(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \\ &= \begin{vmatrix} -I_z.\dot{\theta}.\cos(\psi_s) \\ 0 \\ I_x.\dot{\theta}.\sin(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} . \begin{vmatrix} \dot{\theta}.\sin(\psi_s) \\ \dot{\psi}_s \\ \dot{\theta}.\cos(\psi_s) \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \\ &= (I_x - I_z).\dot{\theta}^2.\cos(\psi_s).\sin(\psi_s) \end{aligned} \tag{A.61}$$

Finalement, on trouve :

$$\boxed{\overrightarrow{\delta_G}.\vec{y}_2 = I_y.\ddot{\psi}_s + (I_x - I_z).\dot{\theta}^2.\cos(\psi_s).\sin(\psi_s)} \tag{A.62}$$

A ce moment de l'analyse, nous devons faire le bilan des forces exercées sur le véhicule.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Bilan des Forces

Nous avons trois forces qui sont exercées sur le véhicule, elles sont :
- l'action du sol sur la roue arriére : $\overrightarrow{F_1} = -F_{t1}.\vec{x}_2 + F_{r1}.\vec{z}_2$,
- l'action du sol sur la roue avant : $\overrightarrow{F_2} = -F_{t2}.\vec{x}_2 + F_{r2}.\vec{z}_2$,
- le poids du véhicule : $\overrightarrow{P} = -m.g.\vec{z}_0 = -m.g.\sin(\psi_s).\vec{x}_2 - m.g.\cos(\psi_s).\vec{z}_2$.

Maintenant, calculons les différents moments appliqués au point G.

Bilan des Moments appliqué en G

Le moment dû à l'action du sol sur la roue arrière $\overrightarrow{F_1}$ au point G est donné par :

$$\begin{aligned}
\overrightarrow{M_{G_{\vec{F}_1}}} &= \overrightarrow{M_{P_{\vec{F}_1}}} + \overrightarrow{GP} \wedge \overrightarrow{F}_{t1} \\
&= \left(\overrightarrow{GO'} + \overrightarrow{O'P}\right) \wedge \overrightarrow{F_1} \\
&= \left(\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -h \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} + \begin{vmatrix} -b \\ 0 \\ -\frac{D}{2} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \right) \wedge \begin{vmatrix} -F_{t1} \\ 0 \\ F_{r1} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \\
&= \left(b.F_{r1} + (h + \frac{D}{2}).F_{t1}\right).\vec{x}_2 \qquad \text{(A.63)}
\end{aligned}$$

Le moment dû à l'action du sol sur la roue avant $\overrightarrow{F_2}$ au point G est donné par :

$$\begin{aligned}
\overrightarrow{M_{G_{\vec{F}_2}}} &= \overrightarrow{M_{Q_{\vec{F}_2}}} + \overrightarrow{GQ} \wedge \overrightarrow{F}_{t2} \\
&= \left(\overrightarrow{GO'} + \overrightarrow{O'Q}\right) \wedge \overrightarrow{F}_{t2} \\
&= \left(\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -h \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} + \begin{vmatrix} a \\ 0 \\ -\frac{D}{2} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \right) \wedge \begin{vmatrix} -F_{t2} \\ 0 \\ F_{r2} \end{vmatrix}_{\mathbb{R}_2} \\
&= \left(-a.F_{r2} + (h + \frac{D}{2}).F_{t2}\right).\vec{x}_2 \qquad \text{(A.64)}
\end{aligned}$$

Nous pouvons dorénavant utiliser le principe fondamental de la dynamique.

Equation des forces en $\vec{x}_2$

$$-F_{t1} - F_{t2} - m.g.\sin(\psi_s) = m.\overrightarrow{a_G}.\vec{x}_2 \qquad \text{(A.65)}$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

$$\boxed{F_{t1} + F_{t2} = -m.\left[\dot{v} + b.(\dot{\psi}_s^2 - \dot{\theta}^2.cos^2(\psi_s)) + h.(\ddot{\psi}_s + \dot{\theta}^2.\sin^2(\psi_s)) + g.\sin(\psi_s)\right]} \tag{A.66}$$

Equation des forces en $\vec{z}_2$

$$F_{r1} + F_{r2} - m.g.\cos(\psi_s) \quad = \quad m.\overrightarrow{a_G}.\vec{z}_2 \tag{A.67}$$

$$\boxed{F_{r1} + F_{r2} = m.\left[v.\dot{\psi}_s - b.(\ddot{\psi}_s + (\dot{\theta}^2 - 2.\dot{\psi}_s^2).\cos(\psi_s).\sin(\psi_s)) + h.(\dot{\psi}_s^2 - \dot{\theta}^2.\sin^2(\psi_s) + g\right.} \tag{A.68}$$

Equations des moments en G en $\vec{y}_2$

$$b.F_{r1} - a.F_{r2} + (h + \frac{D}{2}).(F_{t1} + F_{t2}) = I_y.\ddot{\psi}_s + (I_x - I_z).\dot{\theta}^2.\cos(\psi_s).\sin(\psi_s) \tag{A.69}$$

On suppose $(a = b)$ le centre d'inertie est au centre du véhicule. On obtient :

$$\boxed{F_{r1} - F_{r2} = -\frac{I_y.\ddot{\psi}_s + (I_x - I_z).\dot{\theta}^2.\cos(\psi_s).\sin(\psi_s) - (h + \frac{D}{2}).(F_{t1} + F_{t2})}{a}} \tag{A.70}$$

Expression du transfert de charge Longitudinal (TCLon)

Par définition, le transfert de charge longitudinal $TCLon$ est défini par :

$$TCLon = \left|\frac{F_{r1} - F_{r2}}{F_{r1} + F_{r2}}\right| \tag{A.71}$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Dans notre cas en utilisant les équations A.66, A.68 et A.70, nous obtenons finalement l'expression :

$$TCLon = \frac{1}{m.a}.\left|\frac{I_y.\ddot{\psi}_s + (I_x - I_z).\dot{\theta}^2.\cos(\psi_s).\sin(\psi_s)}{v.\dot{\psi}_s - b.(\ddot{\psi}_s + (\dot{\theta}^2 - 2.\dot{\psi}_s^2).\cos(\psi_s).\sin(\psi_s)) + h.(\dot{\psi}_s^2 - \dot{\theta}^2.\sin^2(\psi_s)) + g.\cos(\psi_s)}\right.$$
$$\left. +m.\frac{(h + \frac{D}{2}).\left[\dot{v} + b.(\dot{\psi}_s^2 - \dot{\theta}^2.cos^2(\psi_s)) + h.(\ddot{\psi}_s + \dot{\theta}^2.\sin^2(\psi_s)) + g.\sin(\psi_s)\right]}{v.\dot{\psi}_s - b.(\ddot{\psi}_s + (\dot{\theta}^2 - 2.\dot{\psi}_s^2).\cos(\psi_s).\sin(\psi_s)) + h.(\dot{\psi}_s^2 - \dot{\theta}^2.\sin^2(\psi_s)) + g.\cos(\psi_s)}\right| \quad (A.72)$$

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Bibliographie

[Berkemeier 2008] Matthew D. Berkemeier, Eric Poulson et Travis Groethe. *Elementary Mechanical Analysis of Obstacle Crossing for Wheeled Vehicles*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 2319–2324, Pasadena, CA, USA, 19-23 May, 2008.

[Biesiadecki 2005] J. J. Biesiadecki, Baumgartner E., R. Bonitz, B. Cooper, F. Hartman, C. Leger, M. Maimone, S. Maxwell, A. Trebi-Ollenu et J. Wright. *Mars Exploration Rover surface operations : driving opportunity at Meridiani Planum*. In IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pages 1823–1830, Hawaii, USA, 10-12 October, 2005.

[Bouteldja 2004] M. Bouteldja, N. K. M'Sirdi, S. Glaser et V. Dolcemascolo. *Stability Analysis and Rollover Scenario Prediction For Tractor Semi-Trailer*. In International Conference on Advances in Vehicle Control et Safety, editeurs, AVCS04, Genova , Italy, 2004.

[Bouton 2009] Nicolas Bouton. *Stabilité dynamique des véhicules légers tout-terrain. Nouvelles solutions. Application aux véhicules légers de type quad*. PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2009.

[Bouton 2010] Nicolas Bouton, Roland Lenain, Benoit Thuilot et Philippe Martinet. *A new device dedicated to autonomous mobile robot dynamic stability : Application to an off-road mobile robot*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 3813–3818, Anchorage, Alaska, 3-8 May, 2010.

[Cremean 2006] Lars B. Cremean, Tully B. Foote, Jeremy H. Gillula, George H. Hines, Dmitriy Kogan, Kristopher L. Kriechbaum, Jeffrey C. Lamb, Jeremy Leibs, Laura Lindzey, Christopher E. Rasmussen, Alexander D. Stewart, Joel W. Burdick et Richard M. Murray. *Alice : An information-rich autonomous vehicle for high-speed desert navigation*. Journal of Field Robotics, vol. 23, pages 777–810, September, 2006.

[Cui 2010] Yan Cui et T.R. Kurfess. *Influence of Parameter Variations for System Identification of Pitch-Heave Car Model*. In 2nd International

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

Conference on Computer Engineering and Technology (ICCET), volume 5, pages 600–604, Chengdu, China, 16-18 April, 2010.

[Debain 2010a] Christophe Debain, Pierre Delmas, Roland Lenain et Roland Chapuis. *Integrity of an autonomous agricultural vehicle according the definition of trajectory traversability.* In International Conference on Agricultural Engineering (AgEng 2010), Clermont-Ferrand, France, 06-08 September, 2010.

[Debain 2010b] Christophe Debain, Florent Malartre, Pierre Delmas, Roland Chapuis, Thierry Humbert et Michel Berducat. *Smart range finder and camera fusion - Application to real-time dense digital elevation map estimation.* In International workshop of Mobile Robotics for environment/agriculture (Robotics 2010), Clermont-Ferrand, France, 03-04 September, 2010.

[Delmas 2009] Pierre Delmas, Nicolas Bouton, Christophe Debain et Roland Chapuis. *UGV in outdoor environment : A safe mobility approach based on a Digital Elevation Model.* In IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Guilin, CHINA, 19-23 December, 2009.

[Diaz-Calderon 2006] Antonio Diaz-Calderon et Alonzo Kelly. *Development of a Terrain Adaptive Stability Prediction System for Mass Articulating Mobile Robots.* Field and service robots. Springer Verlag, 2006.

[Fox 1997] Dieter Fox et Wolfram Burgard. *The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance.* Rapport technique, Février 19 1997.

[Fraichard 2004] Thierry Fraichard et Hajime Asama. *Inevitable collision states - a step towards safer robots ?* Advanced Robotics, vol. 18, no. 10, pages 1001–1024, 2004.

[Gong 2007] Jianwei Gong, Yulin Duan, Beijing Man et Guangming Xiong. *VPH+ : An Enhanced Vector Polar Histogram Method for Mobile Robot Obstacle Avoidance.* In IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), volume 6, pages 2784–2788, Harbin, Heilongjiang, China, 2007.

[Hac 2004] A. Hac, T. Brown et J. Martens. *Detection of Vehicle Rollover.* In SAE Technical Paper Series, 2004-01-1757, SAE World Congress, 2004.

[Hardy 2006] Michael Hardy. *Combinatorics of Partial Derivatives.* Electronic Journal of Combinatorics, vol. 13, page R1, 2006.

[Hiroaki 1998] Sadayuki Tsugawa Hiroaki, Hiroaki Mori et Shin Kato. *A Lateral Control Algorithm for Vision-Based Vehicles with a Moving Target*

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

in the Field of View. In IEEE International Conference on Intelligent Vehicles, pages 41–45, Stuttgart, Germany, 1998.

[Howard 2008] Thomas M. Howard, Colin J. Green, Alonzo Kelly et Dave Ferguson. *State space sampling of feasible motions for high-performance mobile robot navigation in complex environments.* Journal Field Robot, vol. 25, pages 325–345, June 2008.

[Imine 2008] H. Imine, J. Dakhllalah et Y. Sellami. *Validation Expérimentale de l'Identification de la Hauteur du Centre de Gravité du Poids Lourd et de l'Estimation du Risque de Renversement.* In Conference Internationale Francophone Automatique, CIFA 08, pages 149–154, Bucarest, Roumanie, 2008.

[Johansson 2004] B. Johansson et M. Gafvert. *Untripped SUV rollover detection and prevention.* In 43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC), volume 5, pages 5461–5466, Atlantis, Paradise Island, Bahamas, 14-17 December 2004.

[Kelly 1997a] Alonzo Kelly et Anthony Stentz. *Analysis of Requirements for High Speed Rough Terrain Autonomous Mobility. Part 1 : Throughput and Response.* In International Conference on Robotics and Automation (ICRA), volume 4, pages 3318–3325, Albuquerque, NM, 20-25 April, 1997.

[Kelly 1997b] Alonzo Kelly et Anthony Stentz. *Analysis of Requirements for High Speed Rough Terrain Autonomous Mobility. Part 2 : Resolution and Accuracy.* In International Conference on Robotics and Automation (ICRA), volume 4, pages 3326–3333, Albuquerque, NM, 20-25 April, 1997.

[Khatib 1980] Oussama Khatib. *Commande Dynamique dans l'Espace Opérationnel des Robots Manipulateurs en Présence d'Obstacles.* PhD thesis, Ecole Nationale Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse, 1980.

[Khatib 1986] Oussama Khatib. *Real-Time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots.* International Journal of Robotics Research, vol. 5, no. Issue 1, pages 90–98, Spring 1986.

[Koren 1991] Y. Koren et J. Borenstein. *Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation.* In International Conference on Robotics and Automation (ICRA), volume 2, pages 1398–1404, Sacramento, CA, 9-11 April, 1991.

[Lau 2009] Boris Lau, Christoph Sprunk et Wolfram Burgard. *Kinodynamic motion planning for mobile robots using splines.* In IEEE/RSJ inter-

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

national conference on Intelligent RObots and Systems (IROS), pages 2427–2433, Piscataway, NJ, USA, 11-15 October, 2009.

[Lefebvre 2005] O. Lefebvre, F. Lamiraux et D. Bonnafous. *Fast computation of robot-obstacle interactions in nonholonomic trajectory deformation.* In International Conference on Robotics and Automation (ICRA), volume 1-4, pages 4612–4617, Barcelona, Spain, 18-22 April, 2005.

[Leger 2005] Chris Leger, Ashitey Trebi-Ollennu, John Wright, Scott Maxwell, Bob Bonitz, Jeff Biesiadecki, Frank Hartman, Brian Cooper, Eric Baumgartner et Mark Maimone. *Mars Exploration Rover surface operations : driving spirit at Gusev Crater.* In IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pages 1815–1822, Hawaii, USA, 10-12 October, 2005.

[Lenain 2003] R. Lenain, B. Thuilot, C. Cariou et P. Martinet. *Adaptative control for car like vehicles guidance relying on RTK GPS : rejection of sliding effects in agricultural applications.* In International Conference on Robotics and Automation (ICRA), volume 1, pages 115–120, Taipei, TWN, 14-19 September, 2003.

[Lu 2007] Baozhan Lu, Sihong Zu et Ying Zhang. *Research on Parameter Matching of Front Axle Suspension Vehicle Based on MATLAB*, August 2007.

[Malartre 2009] Florent Malartre, Thomas Feraud, Christophe Debain et Roland Chapuis. *Digital Elevation Map Estimation by Vision-Lidar fusion.* In IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Guilin, China, 19-23 December 2009.

[Malartre 2010] Florent Malartre, Pierre Delmas, Roland Chapuis et Christophe Debain. *Real-Time Dense Digital Elevation Map estimation using laserscanner and camera SLAM process.* In 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), Singapour, 7-10 December 2010.

[Minguez 2000] J. Minguez et L. Montano. *Nearness diagram navigation (ND) : a new real Time Collision Avoidance Approach.* In International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS, volume 3, pages 2094–2100, Takamatsu, Japan, 2000.

[Odenthal 1999] Dirk Odenthal, Tilman Bünte et Jürgen Ackermann. *Nonlinear Steering And Braking Control For Vehicle Rollover Avoidance.* In in European Control Conference, 1999.

[Peters 2006] S.C. Peters et K Iagnemma. *An analysis of rollover stability measurement for high-speed mobile robots.* In IEEE International Con-

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

ference on Robotics and Automation (ICRA), pages 3711 – 3716, Orlando, Floride, 15-19 May 2006.

[Quinlan 1993] Sean Quinlan et Oussama Khatib. *Elastic Bands : Connecting Path Planning and Control.* In IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 802–807, Atlanta, Georgia, USA, May 1993.

[Ryu 2004] J. Ryu et J. C. Gerdes. *Estimation of vehicle roll and road bank angle.* In American Control Conference, volume 3, pages 2110–2115, Boston, Massachusetts, 30 June,2 July 2004.

[Samson 1995] C. Samson. *Control of chained systems : application to path following and time-varying point stabilization of mobile robots.* In IEEE Transactions on Automatic Control, volume 40, pages 64–77, January 1995.

[Sardain 2004] P. Sardain et G. Bessonnet. *Forces Acting on a Biped Robot. Center of Pressure-Zero Moment Point.* In IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, volume 34, pages 630–637, 2004.

[Schmitt 1993] Michel Schmitt et Juliette Mattioli. Morphologie mathématique. Masson, 1993.

[Schofield 2006] B. Schofield, T. Hagglund et A Rantzer. *Vehicle dynamics control and controller allocation for rollover prevention.* In IEEE International Conference on Control Applications, pages 149–154, Munich, Germany, October 2006.

[Shiller 1999] Zvi Shiller. *Motion Planning for Mars Rover.* In First Workshop on Robot Motion and Control(RoMoCo), pages 257–262, Kiekrz, Poland, 28-29 June, 1999.

[Simmons 1996] Reid Simmons. *The Curvature-Velocity Method for Local Obstacle Avoidance.* In International Conference on Robotics and Automation (ICRA), volume 4, pages 3375–3382, Minneapolis, MN, 22-28 April 1996.

[Taylor 1999] Kosecka Blasi Taylor, R. Blasi, C. J. Taylor et J. Malik. *A Comparative Study of Vision-Based Lateral Control Strategies for Autonomous Highway Driving.* In International Journal of Robotics Research, volume 18, pages 442–453, 1999.

[Tessier 2007] Cédric Tessier. *Système de localisation basé sur une stratégie de perception cognitive appliqué à la navigation autonome d'un robot mobile.* PhD thesis, Université Blaise Pascal - Clermont II, November 2007.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref

[Thuilot 2002] B. Thuilot, C. Cariou, P. Martinet et M. Berducat. *Automatic Guidance of a Farm Tractor Relying on a Single CP-DGPS.* Autonomous Robots, vol. 13, pages 53–71, July 2002.

[Thuilot 2004] B. Thuilot, J. Bom, F. Marmoiton et P. Martinet. *Accurate automatic guidance of an urban vehicle relying on a kinematic GPS sensor.* In Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles IAV04, 2004.

[Ulrich 1998] Iwan Ulrich et Johann Borenstein. *VFH+ : Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots.* In International Conference on Robotics and Automation (ICRA), volume 2, pages 1572–1577, Leuven, Belgium, 16-20 May 1998.

[Ulrich 2000] I. Ulrich et J. Borenstein. *VFH* : Local Obstacle Avoidance with Look-Ahead Verification.* In International Conference on Robotics and Automation (ICRA), volume 3, pages 2505–2511, San Francisco, CA, 24-28 April 2000.

[Wilde 2009] Doran K. Wilde. *Computing clothoid segments for trajectory generation.* In IEEE/RSJ international conference on Intelligent RObots and Systems, IROS'09, pages 2440–2445, Piscataway, NJ, USA, 2009.

[Ye 2004] Cang Ye et Johann Borenstein. *Obstacle Avoidance for the Segway Robotic Mobility Platform.* In 10th International Conference on Robotics and Remote Systems for Hazarous Environments, Gainesville, Florida, 28-31 March 2004.

CemOA : archive ouverte d'Irstea / Cemagref