

Titre: Contribution à l'élaboration d'un système de stationnement autonome : approche par les algorithmes de stabilisation
Title:

Auteurs: Guillaume Girardin, & Romano M. De Santis
Authors:

Date: 2004

Type: Rapport / Report

Référence: Girardin, G., & De Santis, R. M. (2004). Contribution à l'élaboration d'un système de stationnement autonome : approche par les algorithmes de stabilisation.
Citation: (Rapport technique n° EPM-RT-2005-03). <https://publications.polymtl.ca/3139/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/3139/>
PolyPublie URL:

Version: Version officielle de l'éditeur / Published version

Conditions d'utilisation:
Terms of Use:

 **Document publié chez l'éditeur officiel**
Document issued by the official publisher

Institution: École Polytechnique de Montréal

Numéro de rapport: EPM-RT-2005-03
Report number:

URL officiel:
Official URL:

Mention légale:
Legal notice:

EPM-RT-2005-03

**CONTRIBUTION À L'ÉLABORATION D'UN SYSTÈME
DE STATIONNEMENT AUTONOME
APPROCHE PAR LES ALGORITHMES DE
STABILISATION**

Guillaume Girardin
Stagiaire de l'ESSAIM (Mulhouse-France)
Projet dirigé par
Professeur Romano DeSantis
École Polytechnique de Montréal

Août 2004

Poly

EMP-RT-2005-03

Contribution à l'élaboration d'un système de
stationnement autonome
Approche par les algorithmes de stabilisation

Guillaume Girardin
Stagiaire de l'ESSAIM (Mulhouse-France)
Projet dirigé par
Professeur Romano DeSantis
École Polytechnique de Montréal

Août 2004

©2004
Guillaume Girardin
Tous droits réservés

Dépôt légal :
Bibliothèque nationale du Québec, 2004
Bibliothèque nationale du Canada, 2004

EPM-RT-2005-03

Contribution à l'élaboration d'un système de stationnement autonome : approche par les algorithmes de stabilisation

par : Guillaume Girardin, stagiaire de l'ESSAIM (Mulhouse-France)

Département de génie électrique.

École Polytechnique de Montréal

Toute reproduction de ce document à des fins d'étude personnelle ou de recherche est autorisée à la condition que la citation ci-dessus y soit mentionnée.

Tout autre usage doit faire l'objet d'une autorisation écrite des auteurs. Les demandes peuvent être adressées directement aux auteurs (consulter le bottin sur le site <http://www.polymtl.ca/>) ou par l'entremise de la Bibliothèque :

École Polytechnique de Montréal
Bibliothèque – Service de fourniture de documents
Case postale 6079, Succursale «Centre-Ville»
Montréal (Québec)
Canada H3C 3A7

Téléphone : (514) 340-4846
Télécopie : (514) 340-4026
Courrier électronique : biblio.sfd@polymtl.ca

Pour se procurer une copie de ce rapport, s'adresser à la Bibliothèque de l'École Polytechnique.

Prix : 25.00\$ (sujet à changement sans préavis)

Régler par chèque ou mandat-poste au nom de l'École Polytechnique de Montréal.

Toute commande doit être accompagnée d'un paiement sauf en cas d'entente préalable avec des établissements d'enseignement, des sociétés et des organismes canadiens.

Sommaire

Cette étude concerne l'élaboration d'un système autonome de stationnement pour des véhicules de transport. L'approche retenue est l'utilisation des algorithmes de stabilisation d'Astolfi et de R.M. DeSantis décrits dans leurs publications. L'objectif est de montrer que ces algorithmes peuvent résoudre le problème du stationnement autonome d'une manière nouvelle, et d'en dégager les bénéfices par rapport aux approches déjà en place.

Un système de régulation mettant en œuvre ces contrôleurs de stabilisation, ainsi qu'un superviseur, est décrit. Un cas d'utilisation a été choisi : il s'agit de stationner à 90° en marche arrière un véhicule ayant les caractéristiques d'un véhicule réel. L'efficacité du système est démontrée par voie de simulation à l'aide de diverses conditions initiales et pour deux véhicules différents.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous les membres du laboratoire pour le formidable accueil qu'ils m'ont réservé et leur soutien sans faille. Un merci particulier à M. DeSantis pour le sujet passionnant et l'encadrement, à Cédric Demers-Roy pour tous les fichiers et le savoir Matlab qu'il m'a transmis, et aux techniciens de la section, MM. Richard Grenier et Jean-Sébastien Décarie pour leur disponibilité. Une dernière pensée va à François pour ses encouragements et l'intérêt porté à mon travail.

Je veux également que mes professeurs de l'ESSAIM sachent combien je leur suis reconnaissant. Merci à M. Blech pour m'avoir encouragé à effectuer un échange universitaire et aidé lors des démarches, merci à MM. Gissinger et Basset d'être venus prendre de nos nouvelles par grand froid. Et enfin je veux que Jean-Philippe Lauffenburger sache à quel point j'ai apprécié ses conseils, ses encouragements, et sa présence continue, toutes ces attentions dont la distance décuple l'importance.

Que Damien Rambaud sache également que son travail m'a beaucoup aidé, et qu'il a été un bon partenaire pour les cours de robotique.

Pour terminer j'adresse une pensée à tous mes amis québécois, français en exil ou restés à quai, sans qui cette année à Montréal et ce stage n'auraient pu être aussi agréables. Merci à Céline, Thierry, Estelle, Arnaud, Julien, Nicolas, Caroline et Marc, en particulier.

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|-------------|---|-----------|
| I. | INTRODUCTION..... | 3 |
| II. | OBJECTIF..... | 4 |
| III. | DESCRIPTION DU ROBOT MOBILE..... | 5 |
| III.1 | <i>Aspect physique.....</i> | 5 |
| III.2 | <i>Modélisation mathématique.....</i> | 5 |
| IV. | CONTROLE DE 1^{ER} NIVEAU..... | 8 |
| V. | CONTROLE DE 2^{EME} NIVEAU..... | 8 |
| V.1 | <i>Données supplémentaires considérées.....</i> | 8 |
| V.2 | <i>Algorithmes de contrôle.....</i> | 9 |
| V.2.1 | Astolfi..... | 9 |
| V.2.2 | RMDS | 13 |
| V.2.3 | Modification de l’algorithme RMDS pour les besoins du projet..... | 15 |
| V.3 | <i>Superviseur</i> | 16 |
| VI. | IMPLEMENTATION ET VALIDATION..... | 17 |
| VI.1 | <i>Simulation</i> | 18 |
| VI.1.1 | Les véhicules | 18 |
| VI.1.2 | L’aire de stationnement | 19 |
| VI.1.3 | Le scénario | 19 |
| VI.1.4 | Le choix des cibles | 20 |
| VI.1.5 | Le choix du contrôleur « actif »..... | 21 |
| VI.2 | <i>Résultats obtenus</i> | 22 |
| VI.3 | <i>Discussion des résultats en simulation</i> | 24 |
| VII. | CONCLUSION..... | 25 |
| | BIBLIOGRAPHIE..... | 26 |

I. INTRODUCTION

Les travaux présentés dans ce rapport ont été effectués lors de mon stage de fin d'études à l'Ecole Polytechnique de Montréal, de janvier à août 2004 (à temps plein à partir de mai). Les premiers travaux ont été effectués en collaboration avec Damien Rambaud, stagiaire provenant de l'ESISAR (Valence – France), présent jusqu'au mois de juin.

Intégrés au sein du Laboratoire d'Automation et Systèmes, nous nous sommes efforcé de reprendre des approches connues de cette équipe pour les adapter au problème de stationnement autonome des véhicules de type voiture. Depuis plusieurs années le laboratoire a en effet développé de nombreux algorithmes de contrôle appliqués à la stabilisation, au suivi de chemin, ou encore au guidage assisté de véhicules de type automobile, tracteur-remorque ou multi-articulations ([BOL01], [DES95], [LES01], [DEM03]).

La problématique du stationnement autonome a déjà été traitée à plusieurs reprises dans la littérature scientifique, et un système est même disponible en option sur un véhicule de grande série (Toyota Prius). Cela prouve l'intérêt porté à ce domaine, mais restreint la possibilité d'une approche originale. Après une recherche, certes non exhaustive, nous avons trouvé des approches basées sur le suivi de trajectoire(s) ([PAR96a], [PAR96b], [LO03]) mais pas de développements à partir d'algorithmes de stabilisation, apparus récemment dans la littérature. Nous avons donc décidé d'en choisir deux correspondant au domaine d'expertise du laboratoire et d'essayer de les intégrer dans un système de stationnement autonome, afin de déterminer s'ils peuvent aider à résoudre ce genre de problèmes.

Nous avons étudié en particulier les approches de MM. DeSantis et Astolfi, présentées respectivement dans [BOL01] et [AST99], deux algorithmes de stabilisation suivant l'approche de Lyapunov et utilisant la linéarisation exacte. Le véhicule considéré est de type voiture, son modèle mathématique est celui développé dans [DES95] sur la base d'hypothèses liées à l'évolution à faible vitesse (moins de 1.5 m/s), et souvent repris dans la littérature. Le système de stationnement a été mis au point et simulé à l'aide des progiciels Matlab / Simulink, dans le but de l'implanter sur le robot mobile du laboratoire (voir [BEA03]) avec xPC Target.

II. OBJECTIF

Nous avons considéré le schéma général permettant de décrire le comportement d'un véhicule de type voiture dirigé par un conducteur (figure 1, inspirée de [LAU02]) :

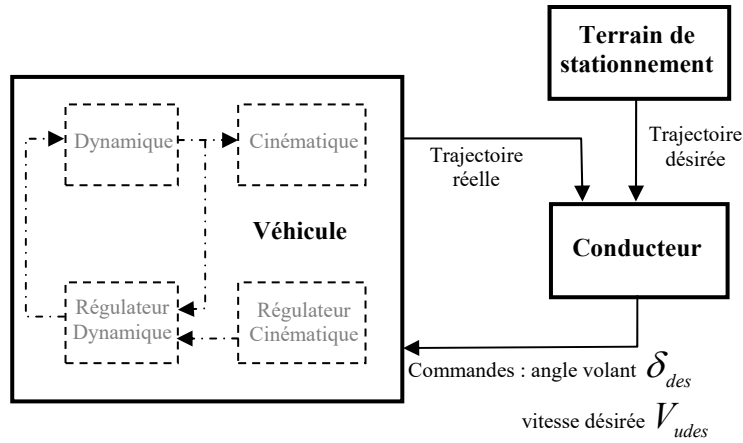


Figure 1 : Système composé du véhicule et du conducteur

Puis, après réflexion sur le rôle d'un système autonome de stationnement, nous avons fixé comme objectif de développer un module capable de fermer la boucle de régulation à la place du conducteur (lorsque celui-ci lui donne la main), tout en gardant la prise en compte de l'environnement (pour l'instant considéré comme figé). Cela a fixé le schéma de la figure 2 :

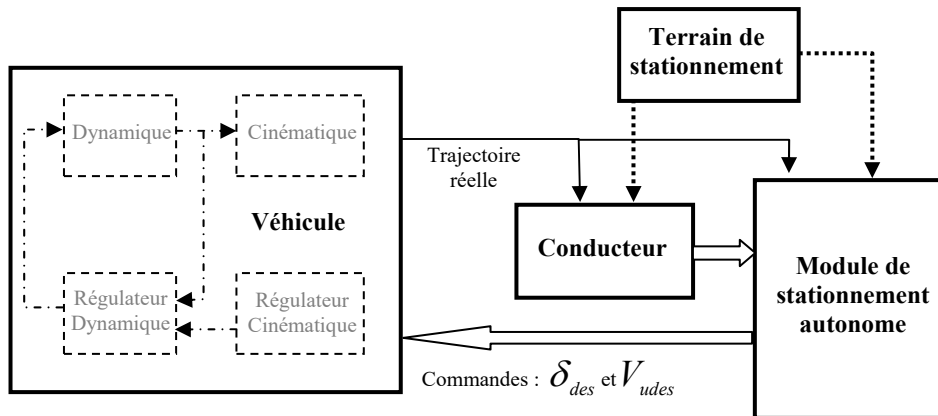


Figure 2 : Régulation par le module de stationnement autonome

III. DESCRIPTION DU ROBOT MOBILE

III.1 Aspect physique

Du point de vue physique le robot utilisé est celui du Laboratoire d'Automations et Systèmes de l'Ecole Polytechnique de Montréal, élaboré par Cédric Demers-Roy et les techniciens du laboratoire (voir Fig 3 et [BEA03] pour plus de détails). Il s'agit d'un robot mobile à deux roues indépendantes (un moteur par roue), dont le centre de masse est situé au point-milieu de l'essieu. L'équilibre est assuré par deux roues folles qui n'influencent pas le comportement du robot.

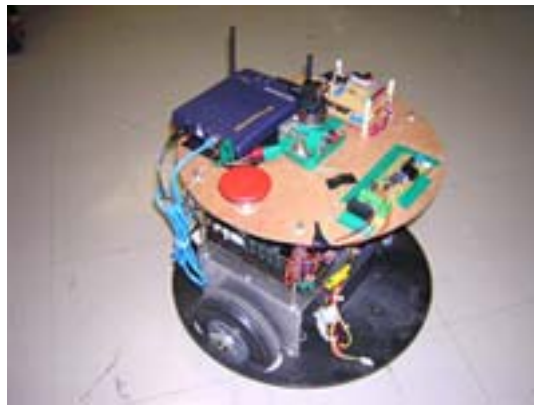


Figure 3 : Robot mobile du Laboratoire d'Automation et Systèmes

III.2 Modélisation mathématique

Du point de vue de la modélisation mathématique on considère un véhicule de type « voiture » (car-like vehicle), dont le modèle détaillé est développé notamment dans [DES95]. Ce développement est effectué avec les hypothèses suivantes :

- déplacements limités au plan X-Y
- absence de glissement latéral
- parfaite symétrie longitudinale (électrique et mécanique)
- superposition du centre de masse avec le point-guide du véhicule situé au milieu de l'essieu arrière.

Remarque : les deux premières hypothèses sont justifiées par la faible vitesse (1.5 m/s) à laquelle nous limiterons le robot. Les deux suivantes sont issues des caractéristiques physiques du robot.

Comme le montre la figure 4 le modèle considéré est composé d'un module dynamique et d'un module cinématique.

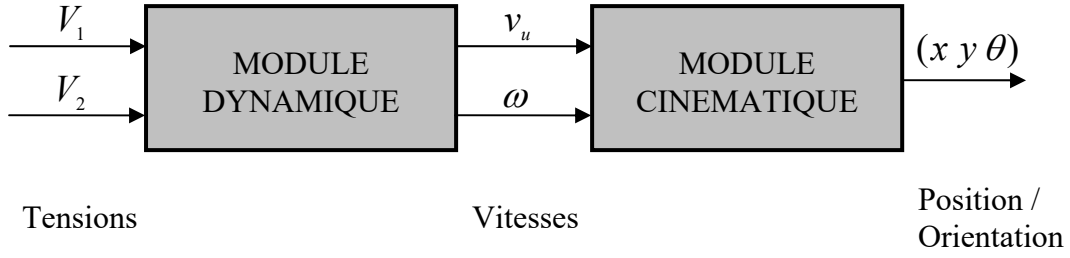


Figure 4 : Structure du modèle véhicule

Le module dynamique sert à traduire les tensions appliquées à chaque moteur (V_1 et V_2) en vitesses angulaire et linéaire. Ce module se compose de deux fonctions de transfert du premier ordre.

La première relie la vitesse linéaire (V_u) à la propulsion (U_1 , vitesse linéaire requise par le système de contrôle) et se note ainsi dans le domaine de Laplace :

$$H_1(s) = \frac{V_u(s)}{U_1(s)} = \frac{K_v}{1 + s\tau_v}$$

$$\text{où } U_1 = \frac{V_1 + V_2}{2}.$$

La seconde fonction relie la vitesse angulaire (Ω) au braquage (U_2 , vitesse angulaire demandée par le système de contrôle) et se note ainsi dans le domaine de Laplace :

$$H_2(s) = \frac{\Omega(s)}{U_2(s)} = \frac{K_\omega}{1 + s\tau_\omega}$$

$$\text{où } U_2 = \frac{V_1 - V_2}{2}.$$

K_v, τ_v, K_ω et τ_ω ont été déterminés par identification à partir d'essais en boucle ouverte (voir [RAM04]).

Le module cinématique permet de calculer la position/orientation du véhicule à partir des vitesses issues du premier module. La figure 5 représente les paramètres géométriques et variables considérés.

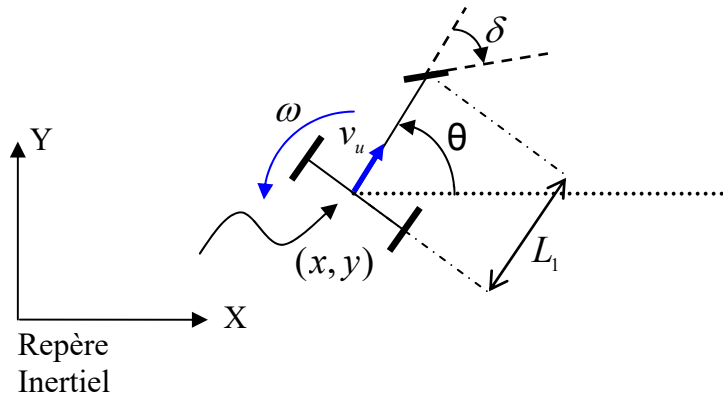


Figure 5 : Variables et paramètre du robot mobile

Les variables temporelles de notre véhicule sont :

- l'abscisse et l'ordonnée $x(t)$ et $y(t)$ du point-guide (par rapport au repère fixe)
- l'orientation $\theta(t)$ (angle entre le repère fixe et le véhicule)
- la vitesse linéaire $v_u(t)$
- la vitesse angulaire $\omega(t)$
- l'angle de braquage du véhicule $\delta(t)$ (angle entre l'axe longitudinal du véhicule et les roues avants)

Le paramètre géométrique essentiel est :

- l'empattement L_1 (distance entre les essieux arrière et avant)

Les équations cinématiques du véhicule sont alors les suivantes :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_u \\ \omega \end{pmatrix}$$

avec $\omega = \frac{v_u \cdot \tan(\delta)}{L_1}$.

IV. CONTROLE DE 1^{ER} NIVEAU

Le même découpage en deux modules est effectué pour l'asservissement du système (voir figure 6). On retrouve donc un contrôleur dynamique (qui génère les tensions de commande des moteurs pour que $v_u(t)$ et $\omega(t)$ tendent rapidement vers les valeurs désirées) et un contrôleur cinématique (qui calcule les valeurs de $v_u^*(t)$ et $\omega^*(t)$ pour répondre aux commandes : dans notre cas $(v_u \delta)_{des}(t)$ provenant du contrôle de niveau supérieur : conducteur ou système de commande automatique).

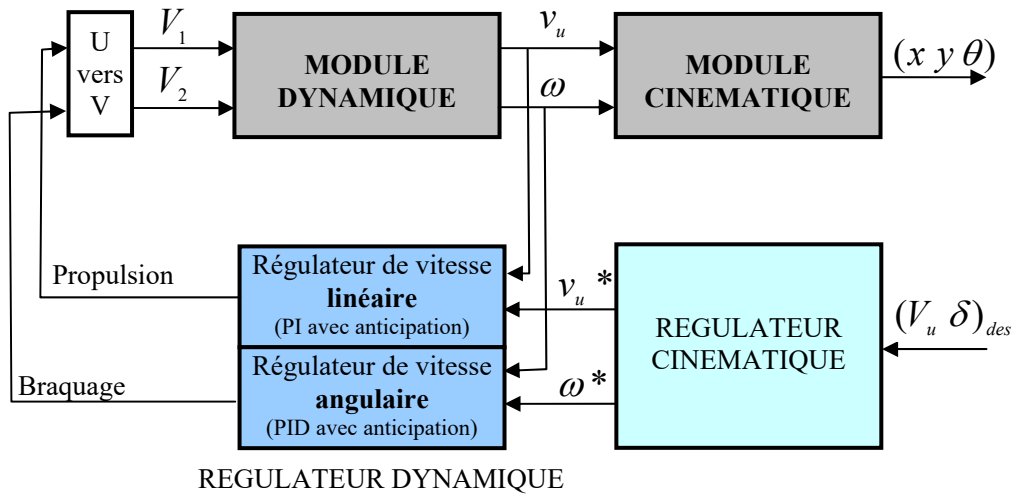


Figure 6 : Contrôle de 1^{er} niveau

A ce stade pour que le véhicule se rapproche d'une voiture réelle, nous introduisons la valeur δ_{max} de braquage maximum des roues avant (supposé symétrique) en ajoutant une saturation dans le régulateur cinématique.

V. CONTROLE DE 2^{EME} NIVEAU

V.1 Données supplémentaires considérées

Le contrôle de niveau 1 suffit à contrôler le robot, et nous a permis de mettre en place le mode manuel, dans lequel le conducteur dirige le véhicule avec un joystick et des pédales de jeu pour PC, tout comme s'il conduisait une voiture. Le comportement du véhicule est identique à celui

d'une voiture à faible vitesse, notamment avec la limite sur l'angle de braquage. Toutefois, dans la problématique du stationnement un système de régulation, tout comme un conducteur, a besoin de connaître les dimensions extérieures du véhicule, afin de prendre en compte les obstacles.

Nous avons donc décidé de garder notre modèle pour ce qui est des équations dynamiques et cinématiques, sur la base d'une faible vitesse de déplacement et d'un terrain constant, et d'y ajouter une « enveloppe virtuelle » (de masse nulle) pour l'encombrement. Cette enveloppe n'influençant pas le comportement du véhicule pour les raisons évoquées précédemment.

Nous considérons donc également les paramètres géométriques supplémentaires suivants (voir figure 7) :

- la longueur L du véhicule
- la largeur lv du véhicule (supposée également largeur de l'essieu arrière)
- la distance d qui sépare le point guide de l'arrière du véhicule

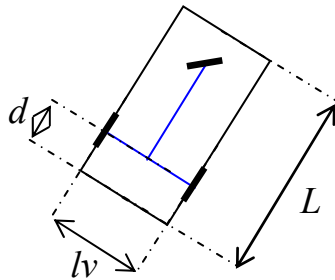


Figure 7 : Robot mobile avec son enveloppe virtuelle

V.2 Algorithmes de contrôle

Nous présentons ici les deux algorithmes de stabilisation que nous avons choisis pour le contrôle de niveau 2. La littérature propose également d'autres solutions applicables au problème de stationnement, comme celle basée sur la logique floue (cf démonstration Matlab [JAN02]), mais n'ayant pas le temps d'en faire une liste exhaustive ni de les essayer toutes, nous avons opté pour deux algorithmes connus du laboratoire (cf [LES01]) et enseignés à l'Ecole Polytechnique, que nous pensions particulièrement bien adaptés au problème de stationnement autonome : soit les approches d'Astolfi et de Romano M. DeSantis (RMDS).

V.2.1 Astolfi

L'algorithme d'Astolfi présenté ici (extrait de [AST99]) est un algorithme de stabilisation basé sur l'utilisation des coordonnées polaires.

La régulation se fait par rapport à trois mesures entre la position/orientation courante du véhicule et sa position/orientation finale désirée (appelée cible) :

- ρ : distance entre le point-guide et la cible
- φ : angle entre l'axe X des roues du robot et l'axe X de la cible (égal à $\theta_{cible} - \theta$)
- α : angle entre l'axe Y du repère véhicule et un vecteur reliant le point-guide à la cible

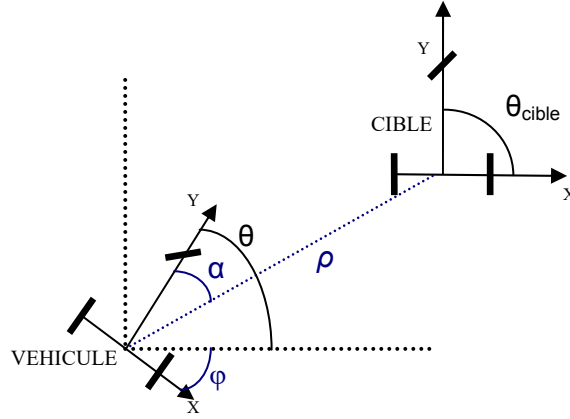


Figure 8 : Coordonnées utilisées par Astolfi (marche Avant)

Il convient alors de différencier deux cas pour la régulation :

Si $\alpha(0) \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ on utilise la transformation suivante :

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\alpha = -\theta + \arctan\left(\frac{-y}{-x}\right)$$

$$\varphi = \theta_{cible} - \theta$$

La régulation se fait alors en dissociant les parties linéaire et angulaire. La vitesse désirée est fonction de la distance à la cible :

$$v_{udes} = K_{\rho} \cdot \rho$$

et la vitesse angulaire fonction des erreurs d'orientation :

$$\omega_{des} = K_{\alpha} \cdot \alpha + K_{\varphi} \cdot \varphi$$

Si $\alpha(0) \in \left(-\pi, \frac{\pi}{2}\right] \cup \left(\frac{\pi}{2}, \pi\right]$ le système ne peut converger et on a besoin de redéfinir la direction du robot en posant $v_u = -v_u$ ce qui a pour effet de nous ramener virtuellement dans le cas $\alpha(0) \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$.

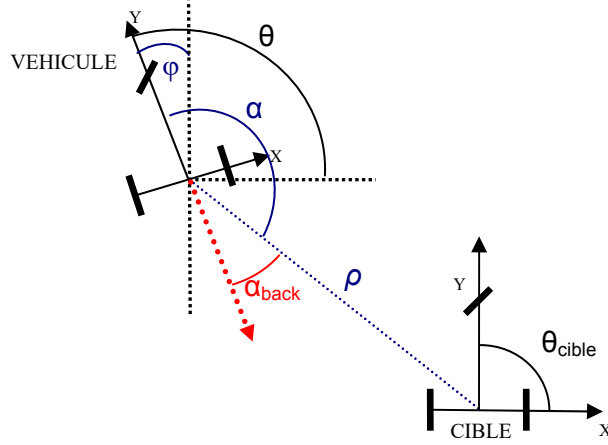


Figure 9 : Coordonnées utilisées par Astolfi (marche Arrière)

Suit alors la transformation suivante :

$$\alpha_{back} = \arctan\left(\frac{-y \cdot \cos(\theta') + x \cdot \sin(\theta')}{-x \cdot \cos(\theta') + y \cdot \sin(\theta')}\right)$$

$$\text{où } \theta' = \theta + \pi$$

Et les équations du contrôle deviennent :

$$v_{udes} = -K_\rho \cdot \rho$$

$$\omega_{des} = K_\alpha \cdot \alpha_{back} + K_\phi \cdot \phi$$

Remarque : pour le choix des gains, Astolfi a montré que le système en boucle fermée converge avec les conditions suivantes :

$$K_\rho > 0$$

$$K_\phi < 0$$

$$K_\alpha + K_\phi - K_\rho > 0$$

Compte tenu des raisons évoquées plus haut, le contrôleur d'Astolfi a donc ici une structure hybride, la condition sur $\alpha(0)$ permettant de choisir entre marche avant et marche arrière, et ce pour toute la durée de la manoeuvre.

Voici un schéma bloc pour résumer le fonctionnement du contrôleur

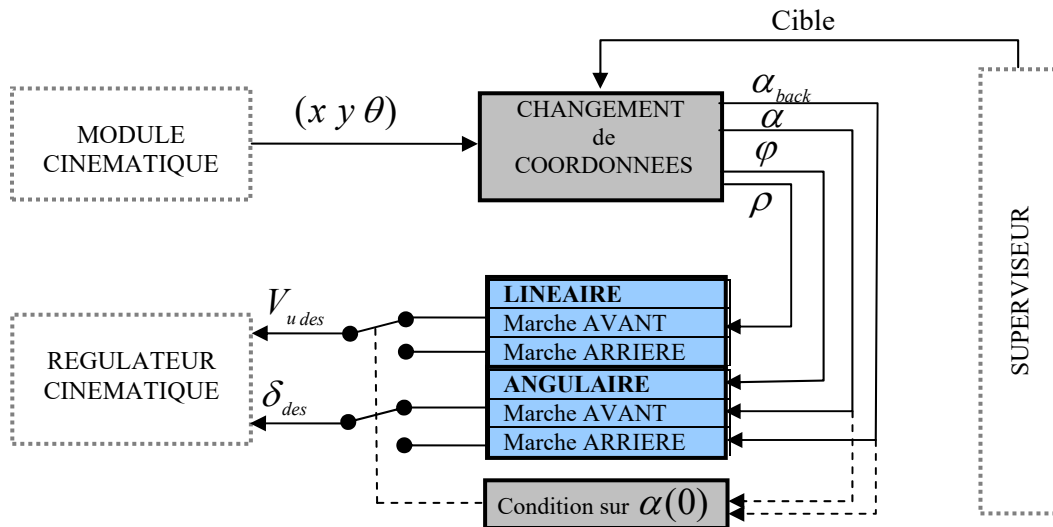


Figure 10 : Schéma de principe du stabilisateur d'Astolfi

Voici une trajectoire typique obtenue avec ce contrôleur (les gains sont ceux gardés pour la suite) :

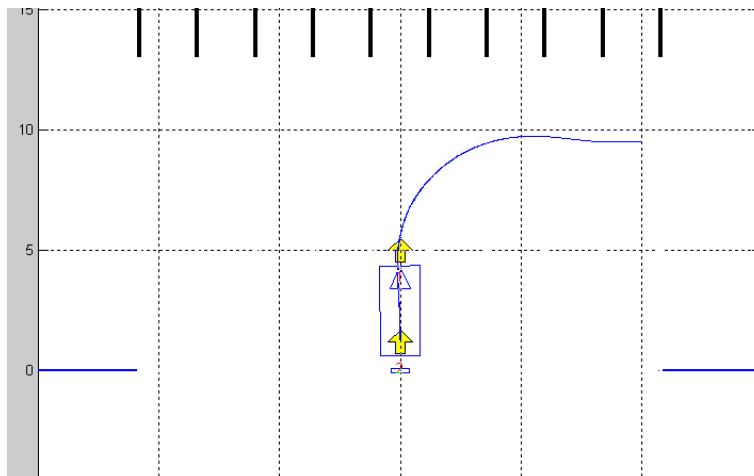
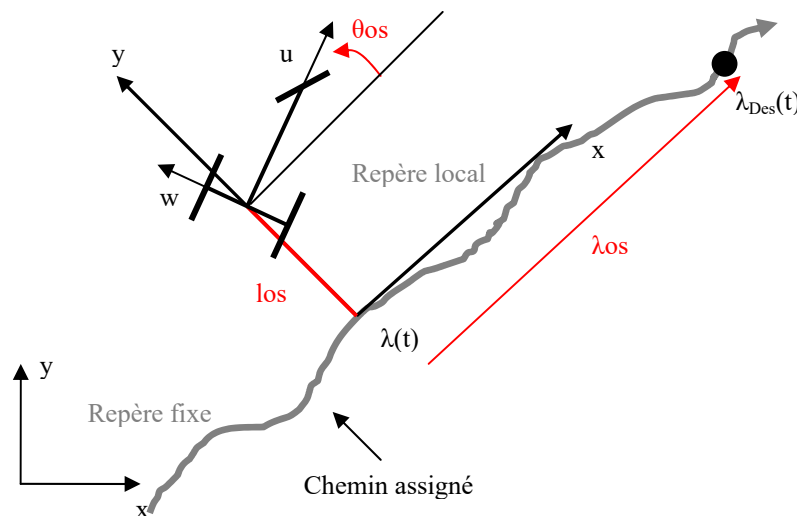


Figure 11 : Trajectoire typique obtenue avec Astolfi
(2 cibles à suivre successivement et limite de l'angle de braquage)

Remarque : cet algorithme permet d'atteindre des cibles avec une précision intéressante sur la position (x, y), mais est parfois peu précis sur l'orientation (θ) lors de son utilisation en espace restreint. De plus, il est très difficile de lui faire prendre en compte des obstacles car il est prévu pour fonctionner à signe de vitesse constant, soit seulement en marche arrière ou avant, durant toute la manœuvre. Il sera donc privilégié par la suite pour les phases d'approche (avant de rencontrer un obstacle), ou pour les manœuvres dites « faciles », lorsque les contraintes sont plus faibles (par exemple un véhicule petit dans une grande place)

V.2.2 RMDS

L'algorithme dit RMDS, développé par Romano M. DeSantis dans [DES95] et repris dans [BOL01], est en réalité un algorithme de suivi de chemin, qu'il est possible d'adapter pour la stabilisation. Dans sa version générale, l'algorithme définit les erreurs suivantes :



et prévoit une régulation en deux temps :

- 1.) on ramène le robot sur le point le plus proche du chemin (contrôle latéral),
- 2.) on module la vitesse pour être sur le bon point du chemin (contrôle longitudinal).

Dans notre cas le temps n'est pas important, nous travaillons donc à vitesse constante. Il ne reste par conséquent que le régulateur latéral ayant pour but de maintenir le robot sur le chemin. Le principe de l'algorithme RMDS pour la stabilisation est donc le suivant : tout d'abord on définit deux limites dans l'axe parallèle à l'axe X de la cible, fixant virtuellement deux murs que le robot ne doit pas franchir. Puis on dit au robot ceci : « suis le chemin décrit par l'axe Y de la cible en marche avant. Lorsque tu rencontres un mur change de direction, jusqu'à ce que tu sois parfaitement positionné sur la cible ».

Cela peut se résumer avec la figure suivante :

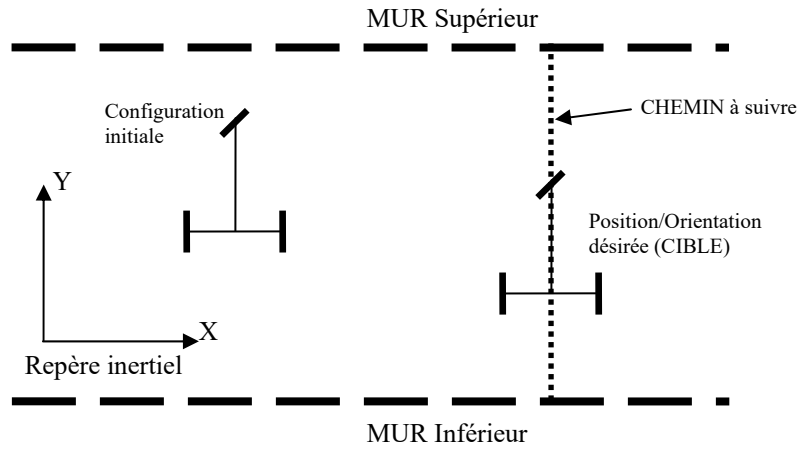


Figure 12 : L'algorithme RMDS appliqué à la stabilisation
(extrait de [DES04])

Le contrôleur longitudinal est réduit à sa plus simple expression :

$$v_{udes} = V_{uF} \text{ (marche avant) ou}$$

$$v_{udes} = V_{uB} \text{ (marche arrière)}$$

Le contrôleur latéral, lorsque l'on considère l'objectif à atteindre en terme de distance et pas de temps (un des avantages de l'algorithme RMDS), fait intervenir la notion de linéarisation exacte (cf [BOL01] pour plus de détails), et son équation s'exprime comme ceci (après simplifications pour un chemin en ligne droite) :

$$\Omega_{des} = -V_u \cdot \cos^3 \theta_{os} \cdot (-k_2 \sigma \tan \theta_{os} + k_1 l_{os}) \quad \text{avec} \begin{cases} \sigma = 1 \text{ en marche avant} \\ \sigma = -1 \text{ en marche arrière} \end{cases}$$

V.2.3 Modification de l'algorithme RMDS pour les besoins du projet

L'algorithme était particulièrement bien adapté aux manœuvres en espace restreint, et à notre problème de stationnement. Nous n'avons apporté qu'une modification : lorsque le véhicule va en marche arrière, nous avons remplacé la condition de changement de direction simple qui était d'atteindre le mur par le fait d'atteindre le mur *OU* de rencontrer un obstacle. Pour cela nous considérons que le superviseur (décrit plus loin) génère un signal pour avertir le contrôleur lorsque n'importe quel coin du véhicule est proche d'un obstacle.

Voici le schéma fonctionnel de l'algorithme RMDS tel que nous l'avons implanté.

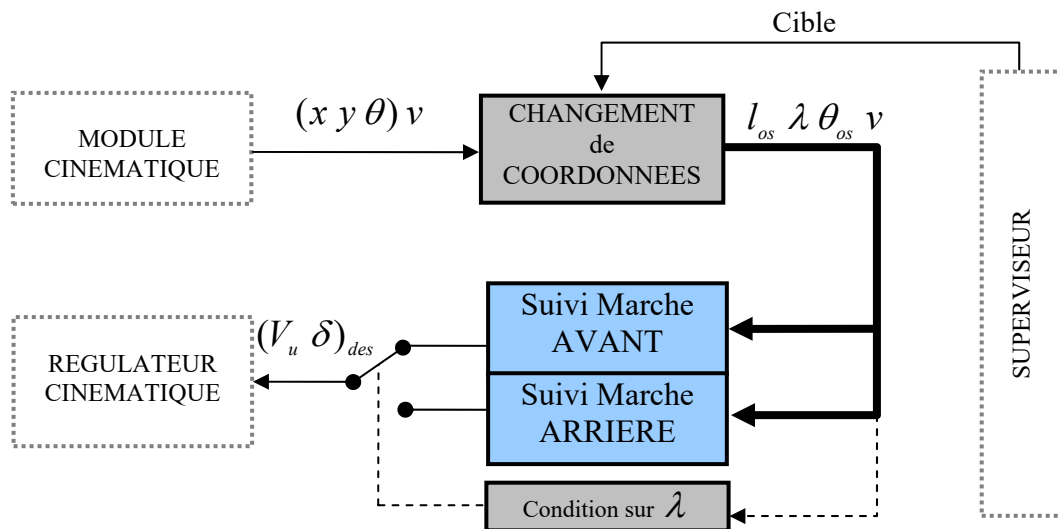


Figure 12 : Schéma de principe du stabilisateur (hybride) RMDS

La condition de changement de direction selon λ est la suivante :

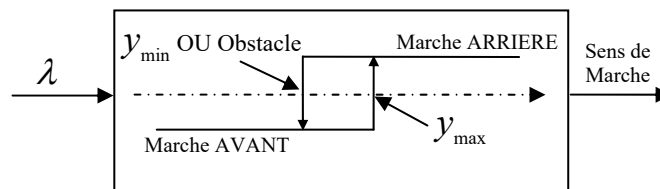


Figure 13 : Règle de changement de direction (avec prise en compte des obstacles)

Et voici la trajectoire typique que ce contrôleur permet d'obtenir du robot :

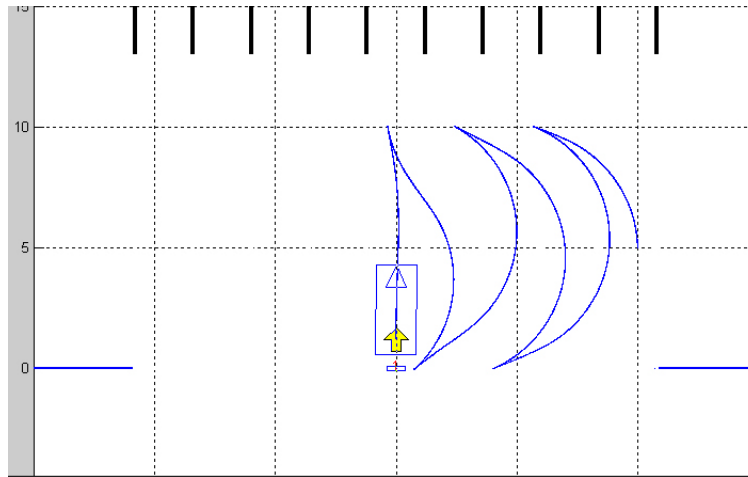


Figure 14 : Trajectoire typique pour l'algorithme RMDS
(une seule cible, murs en $y = 0$ et $10m$, pas d'obstacle, limite de l'angle de braquage)

Remarque : cet algorithme permet d'atteindre la cible à coup sûr, et ceci de manière très précise avec la seule contrainte que l'orientation initiale du véhicule ne soit pas trop importante. Mais malgré un réglage minutieux des gains, cela requiert encore de nombreuses manœuvres, inutiles et déroutantes pour le conducteur, lors de la phase d'approche. Cet algorithme sera donc privilégié pour la fin de la manœuvre.

V.3 Superviseur

Sous l'appellation « superviseur » se trouve l'organe de prise de décision remplaçant le conducteur lors des manœuvres autonomes du véhicule. Il aura donc en charge des fonctions identiques à celles de conduite : définir un objectif vers lequel diriger le véhicule, réagir lorsque le véhicule est proche d'un obstacle, décider que la manœuvre est terminée.

Adaptés à notre problématique, ces fonctions peuvent se décrire ainsi :

- définir la (ou les) cible(s) nécessaire(s) à l'ensemble de la manœuvre (avant de commencer celle-ci)
- fournir aux contrôleurs de niveau 2 (Astolfi et RMDS) les coordonnées de la cible à suivre
- choisir quel contrôleur utiliser (Astolfi ou RMDS)
- donner les coordonnées de la cible suivante lorsqu'une cible est atteinte
- arrêter la manœuvre lorsque la dernière cible a été atteinte

- détecter les obstacles pour changer de contrôleur (Astolfi vers RMDS) ou de sens de marche (pour RMDS).

Toutes les fonctions du superviseur devront être concourantes et temps réel, nous avons donc utilisé les s-fonction dans Matlab, en associant une fonction à chaque prise de décision; soit une pour détecter les obstacles et réagir (ce qui inclut le choix de contrôleur), une pour détecter si une cible a été atteinte et passer à la suivante, et enfin une fonction pour arrêter la simulation lorsque le véhicule est stabilisé sur la dernière cible.

Une fois les décisions prises il faut transmettre les ordres aux contrôleurs, ce qui nous conduit au schéma d'interaction suivant :

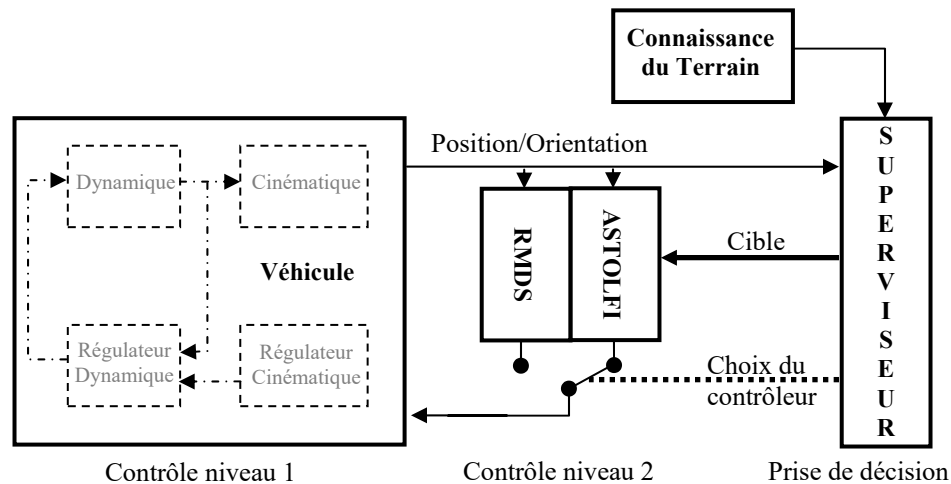


Figure 15 : Le superviseur intégré au système

Remarque : les obstacles sont considérés comme fixes, cela correspondant souvent à la réalité lors d'une manœuvre de stationnement dans un parking fermé.

VI. IMPLEMENTATION ET VALIDATION

Nous avons commencé par tester le système en simulation avec Matlab / Simulink, mais avec une architecture nous permettant de passer rapidement à l'expérimentation sur le robot grâce à xPC Target. En effet cet outil de MathWorks permet de compiler un modèle Simulink en langage C, puis de l'envoyer et le faire exécuter sur un ordinateur cible, dans notre cas celui du robot mobile.

Nous avons prévu des tests avec le robot pour valider par l'expérimentation les résultats obtenus en simulation. Un certain nombre de composants ont été validés par les tests décrits dans [RAM04], à savoir la régulation par Astolfi, RMDS ou une combinaison des deux, sans prise en compte des obstacles. Lors des simulations la prise en compte des obstacles se fait à l'aide de s-fonctions qui ne sont pas compilables directement par Real-Time Workshop, et ne peuvent donc être envoyées vers le robot et xPC Target. Nous n'avons pas eu le temps de transformer ces fonctions, et l'essai que nous avons réalisé en exécutant ces fonctions sur le PC hôte ne s'est pas avéré concluant.

L'idée à retenir est que tout le régulateur doit fonctionner sur le PC cible (le robot), et que le PC hôte ne doit servir qu'au traitement des données ou au contrôle en mode manuel.

Nous allons donc présenter uniquement les simulations réalisées et les résultats obtenus.

VI.1 Simulation

Les simulations avaient pour but de prouver qu'une implémentation du système était possible et utile. Nous avons donc choisi deux véhicules caractéristiques des routes québécoises, une géométrie de terrain de stationnement d'après des mesures prises à l'Ecole Polytechnique, puis défini un scénario d'utilisation.


Nous avons ensuite fixé comme objectif que le système de régulation fonctionne pour les deux véhicules avec les mêmes paramètres, et avec des conditions initiales étendues.

Nous allons donc présenter ici les caractéristiques des véhicules retenus, le dessin de l'espace de stationnement, le fonctionnement du système de régulation, puis les résultats obtenus.


VI.1.1 Les véhicules

Nous avons choisi deux véhicules très différents, parmi les plus petits et les plus gros roulants au Québec, les voici avec leurs caractéristiques essentielles :

- VOITURE DE TYPE « ECONOMIQUE »

| | Toyota ECHO Hatchback | |  |
|------------------------|-----------------------|---------|---|
| Longueur | 147.0 in | 3.73 m | |
| Largeur | 65.4 in | 1.66 m | |
| Empattement | 92.9 in | 2.37 m | |
| Rayon de braquage min. | 16.4 pi | 5.00 m | |
| Angle de braquage max. | | 25.36 ° | |

- VOITURE DE TYPE « MONOVOLUME RALLONGEE »

| | Chrysler VENTURE | |  |
|------------------------|------------------|---------|---|
| Longueur | 200.5 in | 5.09 m | |
| Largeur | 78.6 in | 2.00 m | |
| Empattement | 119.3 in | 3.03 m | |
| Rayon de braquage min. | 19.7 pi | 6.01 m | |
| Angle de braquage max. | | 26.76 ° | |

Crédits mesures et photos : www.edmunds.com

VI.1.2 L'aire de stationnement

Voici les mesures retenues pour notre espace de stationnement (d'après celles prises sur le parking de l'Ecole Polytechnique de Montréal) :

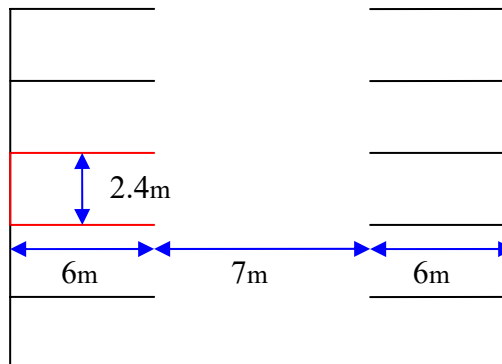


Figure 16 : Mesures de l'espace de stationnement

VI.1.3 Le scénario

Nous avons conçu un scénario, pour nos simulations, identique à ce qui pourrait se passer dans la réalité si notre équipement de stationnement autonome était implanté dans un véhicule. Pour cela nous avons étudié le fonctionnement des systèmes d'aide au stationnement disponibles sur le marché ou en étude, et en particulier celui proposé en option sur la Toyota Prius, qui permet au véhicule de réaliser un créneau (stationnement parallèle).

Nous laissons donc le conducteur faire la phase d'approche en mode manuel, durant laquelle nous supposons que des capteurs (sonars placés sur les côtés du véhicule) mesurent l'espace disponible pour se stationner.

Après avoir dépassé la place libre et s'être arrêté dans une position qu'il juge bonne, le conducteur enclenche le mode automatique, le véhicule se déplace alors de manière autonome pour suivre les cibles définies par le système et se stationner. La figure 17 résume ceci.

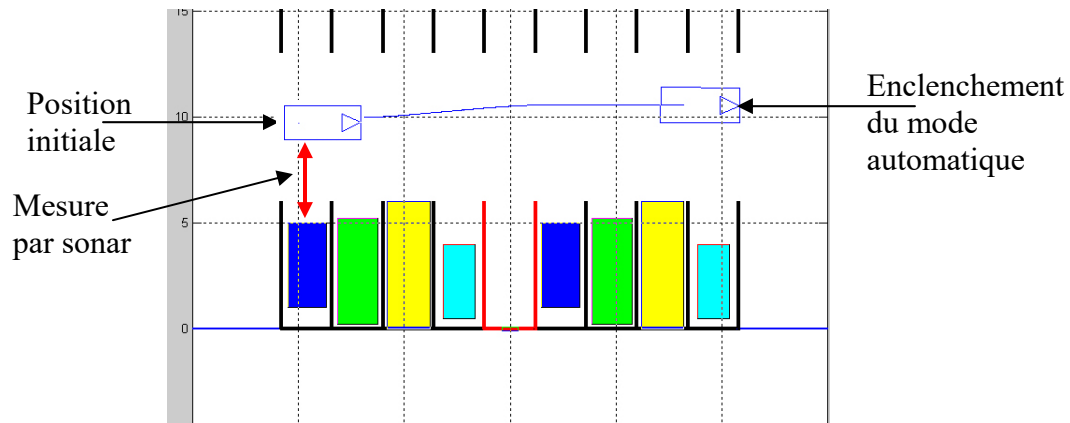


Figure 17 : Phase de reconnaissance

Durant la phase de déplacement autonome nous avons opté pour les choix suivants :

VI.1.4 Le choix des cibles

Après de nombreux tests, nous avons remarqué qu'il est possible de fonctionner avec deux cibles seulement, quel que soit le véhicule, et de les placer toujours de la même manière :

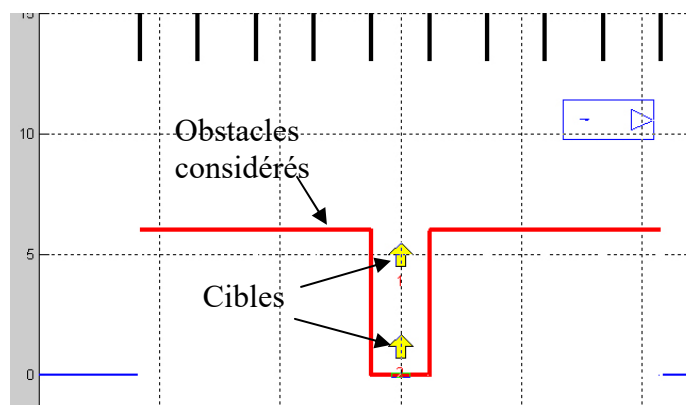


Figure 18 : Placement des cibles

Cela rend notre système de stationnement peu gourmand en calcul, ce qui permet de démarrer rapidement la manœuvre en mode automatique (ce qui n'était pas envisageable il y a quelques

années et ne l'est toujours pas aujourd'hui avec certains algorithmes nécessitant par exemple la définition d'une trajectoire très complexe).

VI.1.5 Le choix du contrôleur « actif »

Comme nous l'avions annoncé dans les chapitres de description des algorithmes de stabilisation utilisés, nous avons décidé de privilégier Astolfi pour la phase d'approche, et RMDS pour la fin de la manœuvre. Nous définissons donc le protocole suivant :

- le système démarre avec Astolfi
- si le véhicule ne rencontre pas d'obstacle, la manœuvre s'effectue complètement avec Astolfi (les cibles ont été choisies de manière que cela soit possible lorsque les conditions initiales sont idéales, ou approchantes)
- sinon, lorsque le véhicule rencontre un obstacle, RMDS prend le relais jusqu'à la fin de la manœuvre. Le véhicule effectuant alors, comme déciderait de le faire un conducteur, des manœuvres avant - arrière successives.

Remarque : les cibles sont les mêmes, ainsi que les règles pour les enchaîner, quelque soit le contrôleur « actif ». Par contre il est possible de définir des conditions finales plus restrictives avec RMDS, ce qui a pour conséquence un meilleur placement du véhicule, mais nécessite un temps plus grand.

VI.2 Résultats obtenus

Afin de rendre la simulation plus conviviale nous avons développé une interface 2D, qui correspond à la vue qui pourrait provenir d'une caméra filmant la scène d'en haut. Les résultats que nous présentons sont donc essentiellement des captures de cette interface.

Conditions initiales favorables (manœuvre directe)

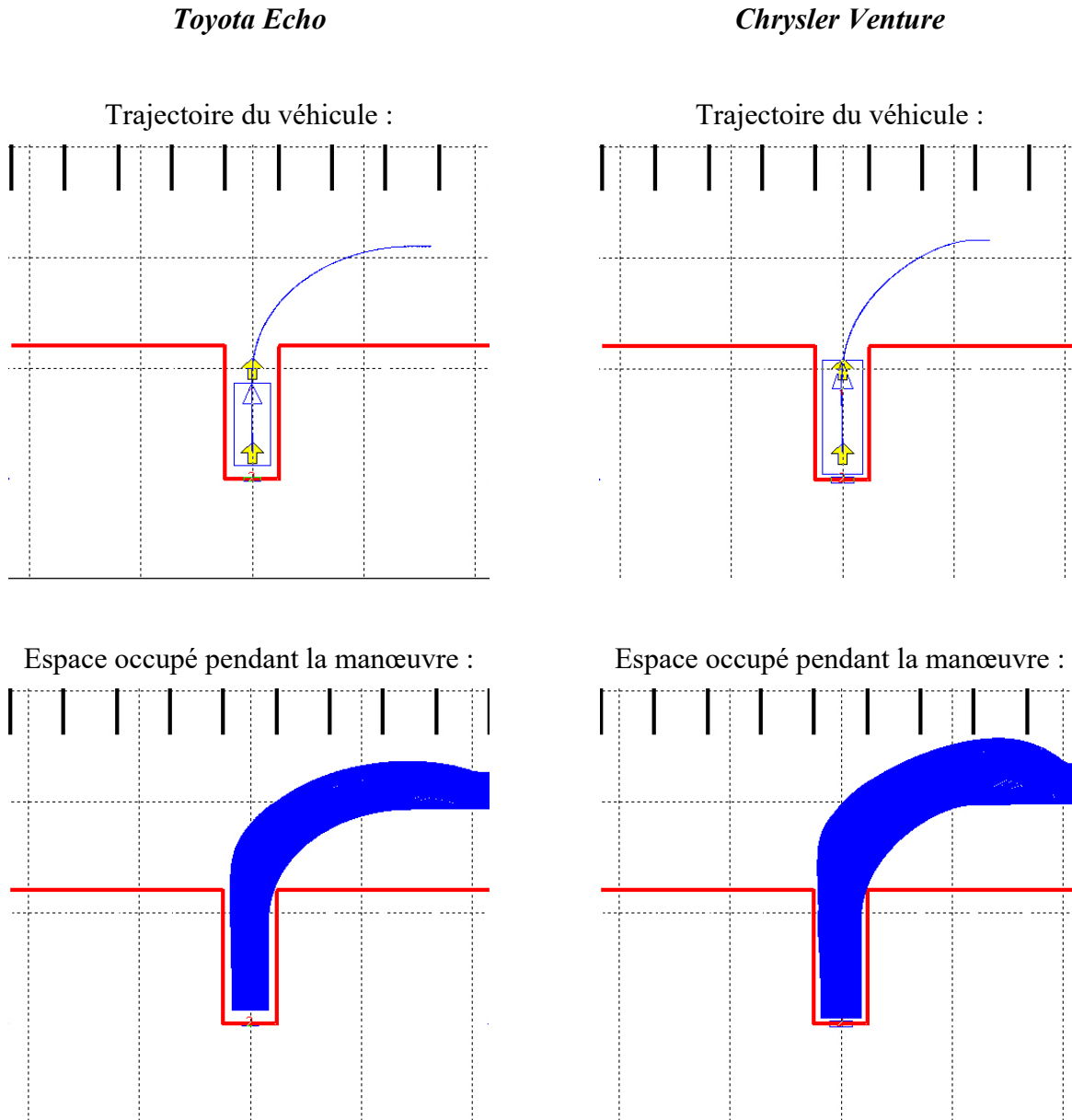


Figure 19 : Résultats obtenus avec conditions initiales favorables

Conditions initiales défavorables (besoin d'allers – retours)

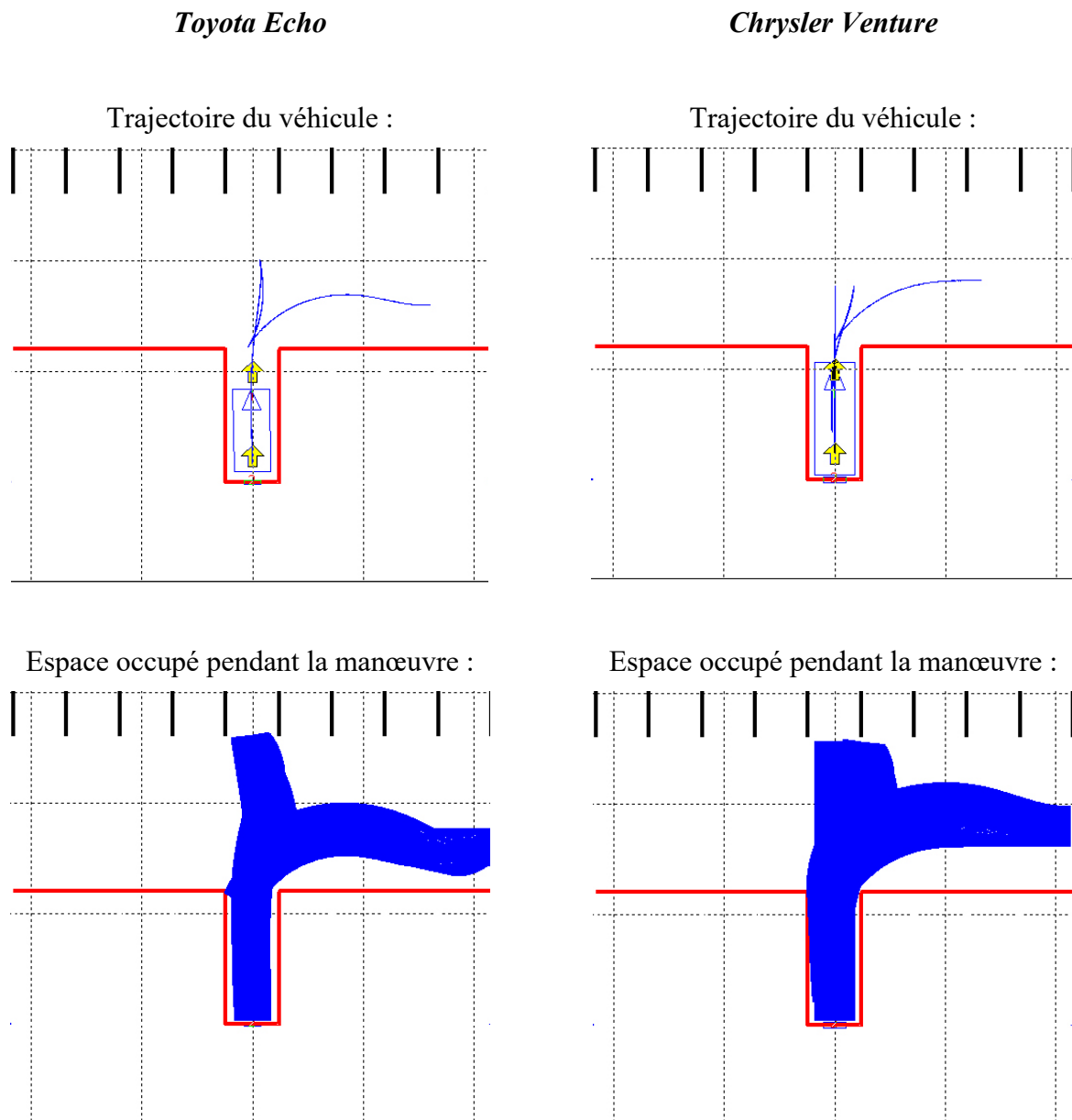


Figure 20 : Résultats obtenus avec conditions initiales défavorables

Après avoir constaté l'efficacité de notre système de contrôle avec des conditions initiales favorables ou non, nous avons déterminé les zones de conditions initiales conduisant au stationnement direct, ou avec allers – retours, ou encore à une impossibilité de stationner le véhicule.

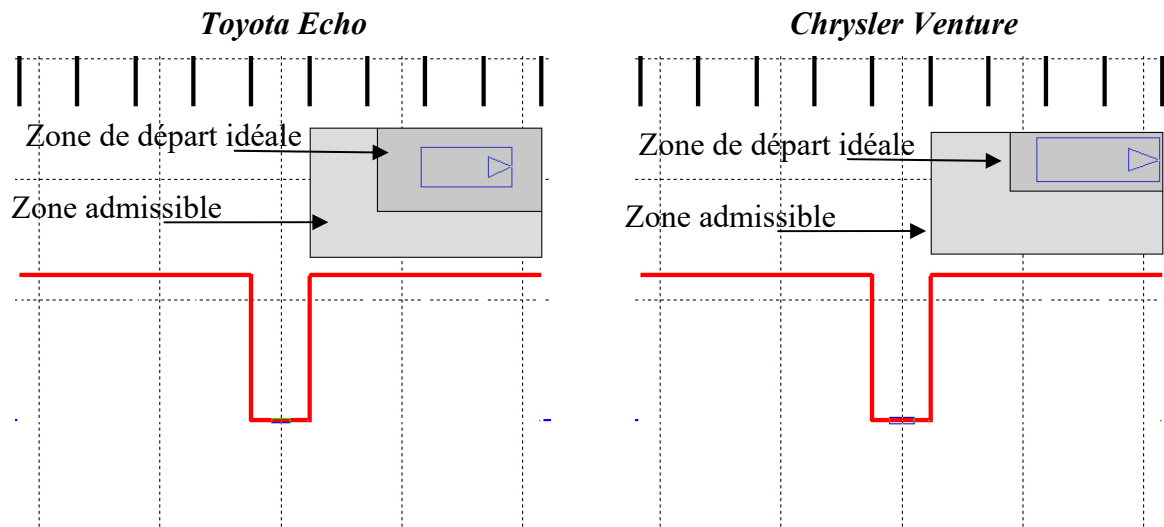


Figure 21 : Zones de départ idéales et admissible
(pour chaque véhicule)

VI.3 Discussion des résultats en simulation

Les simulations effectuées prouvent que notre système de stationnement autonome est efficace. Il arrive à stationner les deux véhicules en étude, quelles que soient les conditions initiales, avec les seules contraintes (réalistes) que le conducteur ait dépassé la place libre avant d'enclencher le mode automatique (ce qui est indispensable à la reconnaissance du terrain), et que le véhicule soit suffisamment éloigné des rangées de places de parking pour pouvoir tourner.

De plus, le véhicule piloté par notre système de stationnement se comporte de manière identique à la méthode enseignée par les écoles de conduite :

- reculer en décrivant un arc de cercle vers la place (roues braquées à fond)
- puis redresser les roues et rentrer verticalement dans la place
- si vous avez tourné trop tôt ou trop tard, avancer pour aligner le véhicule avec la place et reculer dans la place.

Et on retrouve les conditions initiales favorables avec le conseil suivant :

- placer le véhicule à environ 1m (une demi – largeur de véhicule) des places opposées avant de commencer la manœuvre

La simulation de notre système, ainsi que la comparaison avec les techniques de conduite, permettent donc de conclure que l'approche par les algorithmes d'Astolfi et de RMDS est justifiée et intéressante pour la problématique de stationnement autonome des véhicules. On peut également observer une belle complémentarité des algorithmes, la zone permettant de se stationner avec Astolfi seul (appelée zone de départ idéale) est relativement restreinte (surtout dans le cas d'un gros véhicule), alors que la zone pour laquelle les deux algorithmes travaillent

ensemble arrivent à stationner le véhicule est étendue à son maximum, comme elle le serait en mode manuel.

VII. CONCLUSION

Comme le montrent les résultats en simulation, ainsi que les validations partielles en expérimentation avec le robot, notre objectif de mettre en place un système autonome de stationnement ayant pour base les approches d'Astolfi et de R. M. DeSantis pour la stabilisation des véhicules a été atteint.

De plus, durant notre étude nous avons remarqué et prouvé que les algorithmes d'Astolfi et RMDS étaient adaptés à ce problème et s'avéraient complémentaires l'un de l'autre lors de leur utilisation en espace restreint. Ils présentent beaucoup d'avantages.

D'un point de vue implantation ces algorithmes sont intéressants car peu gourmands en calcul lors de l'initialisation du système autonome (définition de cibles au lieu d'une trajectoire), et l'utilisation de capteurs peu onéreux suffit pour la détection des obstacles (des capteurs similaires sont déjà dans les véhicules modernes). Même si les ordinateurs embarqués dans les voitures sont de plus en plus efficaces, les solutions nécessitant le moins de puissance seront souvent privilégiées pour des questions de coût.

D'un point de vue comportement, la trajectoire empruntée par le véhicule est proche de celle que dicterait un conducteur. Le système n'est donc pas déroutant, accentuant la confiance du conducteur et son envie d'utiliser cette assistance. Comme nous n'avons pas pu effectuer de tests réels, nous ne savons pas si les conducteurs jugent le système utile, mais le fait que la compagnie Toyota ait commercialisé un système semblable prouve qu'il y a indéniablement un marché pour ces assistances.

Les perspectives d'avenir sont elles aussi intéressantes, car sur la base de capteurs de distance (sonar, caméra + traitement) il est facile d'envisager la prise en compte d'obstacles faiblement mobiles, de la même manière que les obstacles fixes sont gérés dans cette étude. Il est également envisageable d'ajouter d'autres règles au superviseur, plus souples pour l'enchaînement des contrôleurs ou la gestion des obstacles, afin de se rapprocher encore davantage des manœuvres effectuées par un conducteur.

BIBLIOGRAPHIE

- [AST99] Astolfi, A., Exponential Stabilization of a Wheeled Mobile Robot Via Discontinuous Control, *Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, March 1999, Vol. 121, pp 121-125
- [BEA03] Beaudry, J., Demers-Roy, C., Un véhicule robotisé pour le prototypage rapide de stratégie de guidage intelligent, EPM-RT-2003-14, Département de Génie Electrique, Ecole Polytechnique de Montréal
- [BOL01] Bolzern, P., De Santis, R.M., Locatelli, A., An Input-Output Linearization Approach to the Control of an N-Body Articulated Vehicle, *Trans of the ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, September 2001, Vol. 123, pp 309-316
- [DEM03] Demers-Roy, C., Miralles, F., Olivier, J.-F., Guidage assisté par ordinateur d'un tracteur remorque, EPM-RT-2003-08, Département de Génie Electrique, Ecole Polytechnique de Montréal
- [DES95] De Santis, R.M., Modeling and Path-Tracking Control for a Mobile Wheeled Robot with a Differential Drive, *Robotica*, Vol. 13, September 1995, pp 401-410
- [DES04] De Santis, R.M., Commande des Systèmes Robotiques, Manuel du cours ELE6207, Deuxième édition, Ecole Polytechnique de Montréal, Janvier 2004
- [JAN02] Jang, R., Démonstration "Backing Truck" de Matlab, Fuzzy Logic Toolbox, accessible via la commande "sltbu", 1993, révision 1.13 Avril 2002, Copyright The Mathworks, Inc
- [LAU02] Lauffenburger, J.-P., Contribution à la surveillance temps-réel du système « conducteur – véhicule - environnement » : élaboration d'un système intelligent d'aide à la conduite, Mémoire pour l'obtention du titre de Docteur de l'Université de Haute Alsace, Décembre 2002
- [LES01] Lesot, B., Stabilisation d'un tracteur remorque : étude expérimentale de différents contrôleurs, EPM-RT-2001-03, Département de Génie Electrique, Ecole Polytechnique de Montréal
- [LO03] Lo, Y.K., Rad, A.B., Wong, C.W., Ho, M.L., Automatic Parallel Parking, *Intelligent Transportation Systems*, IEEE Proceedings, October 2003, Vol. 2, pp 1190-1193
- [PAR96a] Paromtchik, I.E., Laugier, C., Autonomous Parallel Parking of a Nonholonomic Vehicle, *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, NJ, USA, pp 13-18, 1996

- [PAR96b] Paromtchik, I.E., Laugier, C., Motion Generation and Control for Parking and Autonomous Vehicle, Proc. Of the IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, Minneapolis, USA, pp 3117-3122, April 1996
- [RAM04] Rambaud, D., Exécution assistée par ordinateur de manœuvres de stationnement en espace restreint, Rapport de projet de fin d'études, ESISAR, Ecole Polytechnique de Montréal, Juillet 2004

L'École Polytechnique se spécialise dans la formation d'ingénieurs et la recherche en ingénierie depuis 1873



École Polytechnique de Montréal

**École affiliée à l'Université
de Montréal**

Campus de l'Université de Montréal
C.P. 6079, succ. Centre-ville
Montréal (Québec)
Canada H3C 3A7

www.polymtl.ca

