

05 OCT. 2001

EPM / RT – 01 / 03

STABILISATION D'UN TRACTEUR-
REMORQUE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE
DIFFÉRENTS CONTRÔLEURS

Bertrand LESOT
Département de Génie Électrique

projet dirigé par

Professeur Romano M. DeSantis
Professeur Richard Hurteau

Septembre 2001

gratuit

@2001
Bertrand Lesot
Tous droits réservés

Dépôt légal :
Bibliothèque nationale du Québec, 2001
Bibliothèque nationale du Canada, 2001

EPM / RT – 01 / 03

Stabilisation d'un tracteur-remorque : étude expérimentale de différents contrôleurs par : Bertrand Lesot
Département de génie électrique.
École Polytechnique de Montréal.

Toute reproduction de ce document à des fins d'études personnelle ou de recherche est autorisée à 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.peb@courriel.polymtl.ca

Ce rapport présente les principaux résultats des travaux expérimentaux sur l'exécution automatique de manœuvres de stationnement de véhicules autonomes qui ont été réalisés par l'auteur dans le cadre de son stage mené d'avril à août 2001 à l'École Polytechnique de Montréal. Ces travaux ont été effectués en collaboration avec Olivier Albouy, étudiant de l'ESIGELEC, lui aussi stagiaire d'avril à août 2001 à l'École Polytechnique de Montréal.

STABILISATION D'UN TRACTEUR - REMORQUE : ÉTUDE EXPERIMENTAL DE DIFFÉRENTS CONTRÔLEURS

Bertrand LESOT
Stagiaire de l'Ecole Centrale de Nantes
Ecole Polytechnique de Montréal

Ecole Polytechnique de Montréal
2900, boul. Édouard Montpetit, CP 6079-A
Montréal, Québec, Canada, H3C 3A7

Sommaire

Ce rapport concerne une étude expérimentale d'une nouvelle classe d'algorithmes pour le contrôle de véhicules autonomes (articulés et non articulés) qui ont récemment été proposés par la littérature scientifique et qui sont axés sur une approche de linéarisation exacte par rétroaction non linéaire. L'objectif est d'illustrer la mesure dans laquelle le comportement expérimental du véhicule en chaîne fermée est bien en concordance avec les propriétés de convergence, stabilité et robustesse prédites par la théorie et par les essais de simulation. L'étude a été effectuée en utilisant un banc d'essai constitué entre autre d'une version modifiée du robot mobile PIONEER_2 et d'une version modifiée du logiciel de contrôle SAPHIRA (produits commerciaux de la compagnie ACTIVMEDIA).

Les résultats obtenus illustrent bien la concordance recherchée entre prévisions théoriques et comportement expérimental. Cette concordance se produit malgré des différences considérables entre le comportement expérimental du véhicule en chaîne ouverte et le modèle mathématique utilisé pour la conception des algorithmes de contrôle. Ces résultats illustrent également, autant par voie de simulation que par voie expérimentale que le comportement induit par la nouvelle classe d'algorithmes est à la fois différent et complémentaire au comportement induit par des versions originales ou étendues d'autres algorithmes existants qui visent les mêmes objectifs que la nouvelle classe d'algorithmes en étude et qui sont basés sur la théorie de Lyapunov ou sur la logique floue.

STABILISATION D'UN TRACTEUR - REMORQUE : ÉTUDE EXPERIMENTAL DE DIFFÉRENTS CONTRÔLEURS

Bertrand LESOT
Stagiaire de l'Ecole Centrale de Nantes
Ecole Polytechnique de Montréal

TABLE DES MATIERES

I. Introduction	6
II. Banc d'essais.....	6
1. Système asservi.....	7
2. Système de contrôle-gestion.....	8
III. Modélisation et identification du système asservi	9
IV. Essais expérimentaux effectués avec l'algorithme BDL dans le cas d'un tracteur	11
V. Comparaison avec les algorithmes d'Astolfi et de Roger Jang.....	15
VI. Essais expérimentaux effectués avec l'algorithme BDL dans le cas d'un tracteur-remorque.....	20
VII. Comparaison avec des versions étendues des algorithmes d'Astolfi et de Roger Jang	22
VIII. Conclusion	25
Bibliographie.....	26

Liste des figures

Figure 1 : Structure du banc d'essais.....	7
Figure 2 : Le système asservi : a) tracteur ; b) tracteur-remorque	8
Figure 3 : Réponse du véhicule à un échelon de vitesse en translation (500 m/s et 200 mm/s).....	11
Figure 4 : Réponse du véhicule à un échelon de vitesse en rotation (60°/s et 30°/s)	11
Figure 5 : Manœuvre d'essai typique.....	12
Figure 6 : Parcours effectué par le tracteur lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme BDL	13
Figure 7 : Espace balayé par le tracteur lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme BDL.....	14
Figure 8 : Espace balayé par le tracteur lors d'une manœuvre simulée avec l'algorithme BDL en prenant en compte un retard dans le modèle du véhicule.....	14
Figure 9 : Parcours effectué par le tracteur lors de plusieurs manœuvres exécutées avec l'algorithme BDL (un retard de .8 sec a été introduit dans le modèle de simulation du véhicule).....	15
Figure 10 : Parcours effectué par le tracteur lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme Astolfi.....	16
Figure 11 : Espace balayé par le tracteur lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme Astolfi.....	17
Figure 12 : : Parcours effectué par le tracteur avec l'algorithme Astolfi (modèle de véhicule idéal).	17
Figure 13 : Espace balayé par le tracteur lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme Fuzzy	19
Figure 14 : Parcours effectué par le tracteur lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme Fuzzy	19
Figure 15 : Espace balayé par le tracteur-remorque lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme BDL	20
Figure 16 : Parcours du point guide effectué par le tracteur avec remorque lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme BDL (position initiale (1,2,90°,0°))	21
Figure 17 : Espace balayé par le tracteur-remorque lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme Astolfi	22
Figure 18 : Parcours du point guide effectué par le tracteur avec remorque lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme Astolfi (position initiale (1,2,90°,0°))	23
Figure 19 : Espace balayé par le tracteur-remorque lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme Fuzzy	24
Figure 20 : Parcours du point guide effectué par le tracteur avec remorque lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme Fuzzy (position initiale (1,3,90°,0°)).....	24

I. Introduction

Cette étude concerne les nouveaux algorithmes pour le contrôle des véhicules articulés qui ont récemment été proposés dans DeSantis 1998, et Bolzern DeSantis Locatelli 1999. À l'instar d'algorithmes existants, ces algorithmes font qu'un véhicule articulé parvient à suivre un chemin assigné (avec une vitesse elle aussi assignée) autant en marche avant qu'en marche arrière (Altafini 1999, Astolfi 1999, Fliess et al. 1995, Lamiroux Laumond 1998, Sampei et al. 1995, Samson 1995). En appliquant une séquence de manœuvres qui alternent la marche avant avec la marche arrière, ils permettent qu'un véhicule puisse être stabilisé dans une position et une orientation désirée.

L'intérêt de ces nouveaux algorithmes est dans l'utilisation originale de la technique de linéarisation exacte au sens entrée-sortie, dans l'exploitation de la notion de tracteur virtuel et dans une relative simplicité d'implantation. Les références DeSantis 1998, et Bolzern DeSantis Locatelli 1999 donnent une description détaillée de ces éléments caractéristiques ainsi qu'une démonstration théorique de stabilité. Elles fournissent également les résultats d'une grande quantité de tests de simulation mettant ainsi en évidence les propriétés de convergence, stabilité et robustesse. Il reste cependant que tous ces résultats n'ont pas été jusqu'à date validés par aucun résultat issu de tests expérimentaux.

L'objectif de ce rapport est de combler cette lacune. Pour ce faire, un banc d'essai centré sur l'utilisation d'un robot mobile commercial convenablement modifié a été mis au point. Les algorithmes ont été programmés en langage C sous un environnement informatique également commercial. Un grand nombre de tests expérimentaux ont été développés afin de voir dans quelle mesure le comportement du système expérimental suit de près le comportement prédit par les tests de simulation (plus de détails sur ces tests peuvent être trouvés dans Lesot 2001).

II. Banc d'essai

Le banc d'essai, représenté à la figure 1, est composé de quatre modules : un système asservi (le robot mobile Pioneer 2_DX, muni ou non d'une remorque), un système de gestion et de contrôle Saphira (guidage, interface), un système de positionnement, un système de communication entre le système asservi et le système de gestion. Le système Saphira et le Pioneer 2_DX sont des produits commerciaux de la compagnie ActivMedia). En fonction de la manœuvre requise par l'opérateur humain, le système de gestion envoie au système asservi une commande en vitesse longitudinale et en vitesse angulaire. Ces commandes sont alors appliquées au système asservi qui communique à son tour position et orientation au système de contrôle-gestion en fermant ainsi la boucle.

Notre mise au point du banc d'essais a concerné principalement l'implantation des algorithmes de contrôle en étude dans le système de gestion d'ActivMedia, et la modification du système asservi (ajout d'une remorque au Pioneer 2). Les modules de communication et d'estimation de position et d'orientation sont identiques à ceux fournis par la compagnie ActivMedia. Les modifications que nous avons introduites peuvent être brièvement décrites comme suit.

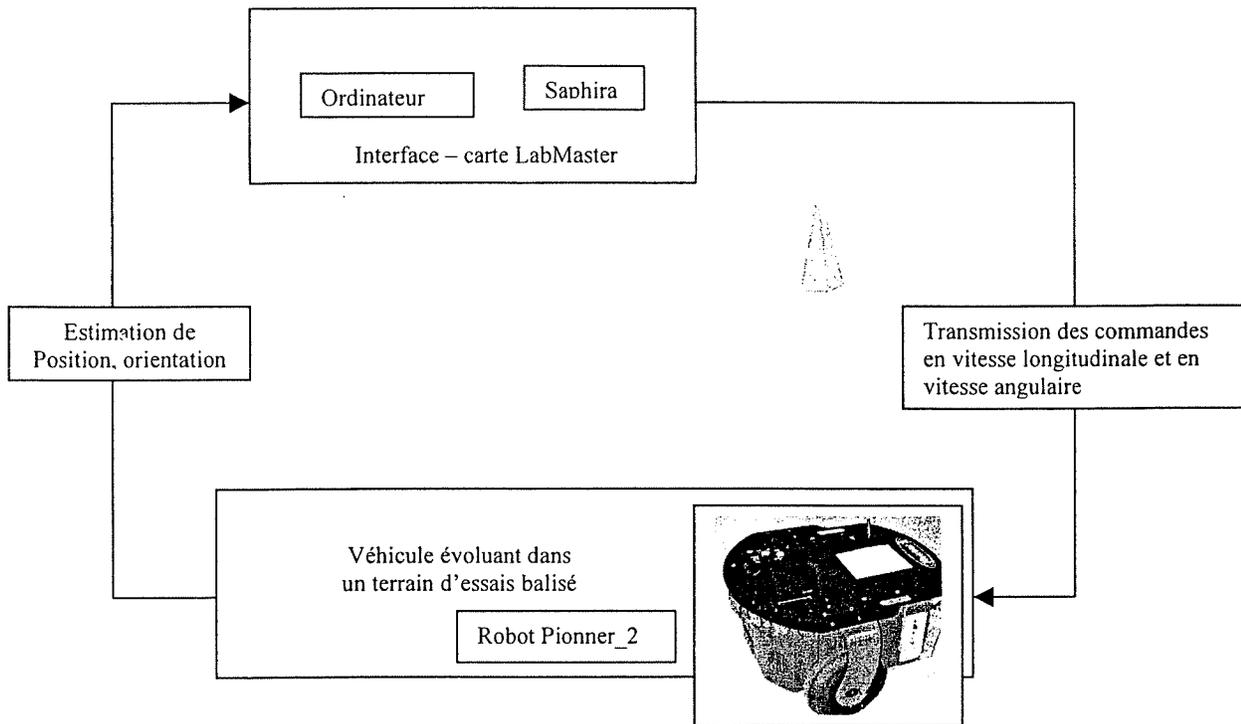


Figure 1 : Structure du banc d'essais

1. Système asservi

Le système asservi est constitué dans un premier temps par un tracteur, dans un deuxième temps par un ensemble tracteur-remorque (la remorque étant de fabrication maison). Le tracteur est représenté par le robot mobile Pioneer_2DX. Le véhicule mobile Pioneer_2 est constitué d'un corps dans lequel sont insérés : une antenne, 7 détecteurs de proximité, un microcontrôleur ayant pour processeur un Siemens 88C166 de 20 MHz, des boutons: marche-arrêt, *RESET*, *MOTORS* et un petit écran donnant le niveau de charge des batteries ainsi que l'état du robot : connecté ou non. Ses dimensions sont de 44 cm de long, 33 cm de large et 22 cm de haut. Son poids est de 9 kg. La vitesse longitudinale maximale atteinte par le robot est de 1.6 m/sec. La vitesse angulaire maximale, quant à elle, est de 300 degrés/sec. Une description plus détaillée de ce système peut être trouvée dans le manuel d'opération de la compagnie ActivMedia.

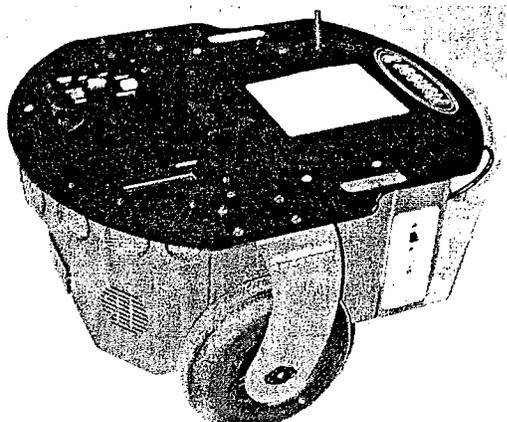


Figure 2 : Le système asservi : a) tracteur ; b) tracteur-remorque

La communication entre l'ordinateur et le robot est réalisée au moyen d'un émetteur-récepteur RF de 400 KHz. L'émetteur est branché sur un port série de l'ordinateur. Le récepteur est dans le robot. La période d'émission-réception utilisée est de 100 ms. Le robot se déplace grâce à deux moteurs indépendants reliés aux roues du robot (une structure géométrique qui est très populaire danses genre d'études et qui est identique à celle considérée dans De Santis Hurteau 1990, De Santis 1995). Les deux moteurs du robot sont liés à deux encodeurs permettant ainsi d'avoir la position (x, y , θ), la vitesse de translation et de rotation du robot au cours de ses déplacements.

Pour réaliser l'ensemble tracteur-remorque nous avons adjoint au robot Pioneer_2 une remorque ayant les mêmes dimensions que le robot (figure 2). Le joint d'articulation de la remorque est situé à 56 cm du centre de l'axe des roues de la remorque. La distance entre le joint d'articulation et l'essieu des roues motrices du tracteur est de 14 cm. Au point d'attache a été installé un encodeur optique (ORE38 de l'entreprise SUNX) qui permet de mesurer l'angle entre le tracteur et la remorque. Un tour d'axe de l'encodeur (360 degrés) correspond à 4096 impulsions. L'encodeur est relié par câble à une carte de conversion LabMaster branchée sur le port parallèle de l'ordinateur. Ce dispositif permet de récupérer le nombre d'impulsions de l'encodeur.

2. Système de contrôle-gestion

Le système de contrôle-gestion a été développé à l'intérieur de l'environnement Saphira sous lequel les commandes du robot sont écrites. Il s'agit de l'environnement qui est fourni par la compagnie ActivMedia. Il correspond à l'ensemble des programmes et des applications serveur – client qui peuvent être réalisés avec le robot mobile Pioneer_2. Saphira peut réaliser des tâches autant de bas niveau, de niveau intermédiaire et de haut niveau. Au niveau bas, Saphira procure un module d'interface avec le robot. Il communique avec lui récupérant les données que lui fournit le robot et lui envoyant des commandes pour le contrôler. Les instructions de bas niveau sont principalement : aller tout droit, aller à droite, aller à gauche, augmenter la vitesse, ralentir. Nous n'avons

utilisé que ce niveau de Saphira. Au niveau intermédiaire se trouvent des fonctions de contrôle de la navigation et d'interprétation des données des détecteurs. Enfin, le haut niveau correspond à la reconnaissance d'obstacles, et à des fonctions d'évitement d'obstacles ou encore de planification de trajectoires basées sur la logique floue.

Saphira comprend aussi une interface graphique (figure 5) qui permet de visualiser les déplacements du robot. Afin de mieux gérer et de mieux visualiser les résultats des tests expérimentaux nous avons ajouté à cette interface un important module complémentaire (décrit en détail dans Lesot 2001). Les différentes positions et orientations prises par le mobile pendant les expérimentations sont stockées dans des fichiers Matlab. Nous pouvons alors, connaissant le trajet du véhicule, le dessiner sur la fenêtre de visualisation de l'interface. Parallèlement, il est possible d'exécuter une simulation, de la sauvegarder et de la comparer avec la pratique expérimentale.

III. Modélisation et identification du système asservi

En concordance avec les travaux qu'on retrouve dans la littérature scientifique (cf. DeSantis 1998, Bolzern DeSantis et Locatelli 1999), nous modélisons le tracteur et l'ensemble tracteur-remorque en termes d'un module dynamique suivi par un module cinématique. Les modules dynamiques du tracteur et du tracteur-remorque sont pris comme identiques. La fonction de transfert entre la vitesse en translation acquise par le robot et la vitesse requise par le système de contrôle est modélisé par une fonction du premier ordre :

$$H_1(s) = \frac{k_{long}}{1 + \tau_{long} \cdot s}$$

où k_{long} et τ_{long} sont deux paramètres (un gain statique et une constante de temps) dont les valeurs ont été déterminées par voie d'identification. De même, la fonction de transfert entre la vitesse en rotation acquise et la vitesse requise est modélisée par une fonction du premier ordre :

$$H_2(s) = \frac{k_{ang}}{1 + \tau_{ang} \cdot s}$$

où k_{ang} et τ_{ang} sont deux paramètres (un gain statique et une constante de temps) dont les valeurs ont été déterminées par la suite.

Le module cinématique du tracteur est décrit avec les équations suivantes :

$$x_1 = \cos(\theta) \cdot V_u$$

$$y_1 = \sin(\theta) \cdot V_u$$

$$\dot{\theta}_1 = \omega$$

ou x_1 représente l'abscisse du point mitoyen de l'essieu des roues motrices du tracteur (point guide), y_1 l'ordonnée de ce même point et θ_1 l'angle d'orientation du tracteur par rapport au repère absolu; V_u représente la vitesse longitudinale du véhicule et ω sa vitesse angulaire.

Le module cinématique du tracteur-remorque est modélisé par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{\sin(\varphi)}{l_2} & -\frac{l_2 + c \cdot \cos(\varphi)}{l_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_u \\ \omega \end{bmatrix}$$

où φ est l'angle entre la remorque et le tracteur.

Les valeurs des constantes géométriques du véhicule l_1, l_2 et c ont été déterminées par une mesure directe. Les valeurs des constantes de temps ont été déterminées par voie d'identification en soumettant le véhicule à des essais en translation et en rotation (réponse à un échelon). Cela a mis en évidence le fait que la durée des régimes transitoires des vitesses varie en fonction de la valeur de la commande en vitesse. La période d'échantillonnage pour tous les essais est de 100 ms. Les essais ont été réalisés avec des marquages au sol afin de s'assurer de la validité des données de position et d'orientation fournies par le système de navigation du robot. Il s'est avéré que ces données étaient très fiables.

En envoyant au robot une commande en vitesse de translation égale à un échelon de 500 mm/s et 200 mm/s on obtient la réponse illustrée par la figure 3. On observe que pour la commande en vitesse de 500 mm/s, la stabilisation se fait au bout de 1.2 secondes alors que pour 200 mm/s, il faut au moins 3 secondes. Ainsi, la vitesse se stabilise beaucoup moins vite à 200 mm/s qu'à 500 mm/s.

En envoyant au robot une commande en vitesse de rotation égale à un échelon de 60°/s et 30°/s on obtient la réponse illustrée par la figure 4. En considérant que la vitesse est stabilisée lorsqu'elle reste dans une marge de [0 +10] degrés, on peut alors considérer que la stabilisation pour une commande de 60 deg/s apparaît au bout de 1.2 secondes et pour 30 deg/s au bout de 2 secondes. Ainsi la stabilisation à 60 deg/s est plus rapide qu'à 30 deg/s. En considérant que la vitesse est stabilisée lorsqu'elle reste dans une marge de [0 +10] degrés, on peut alors considérer que la stabilisation pour une commande de 60 deg/s apparaît au bout de 1.2 secondes et pour 30 deg/s au bout de 2 secondes. Ainsi la stabilisation à 60 deg/s est plus rapide qu'à 30 deg/s. À partir des ces résultats nous considérons raisonnable de donner aux constantes de temps les valeurs précédemment citées.

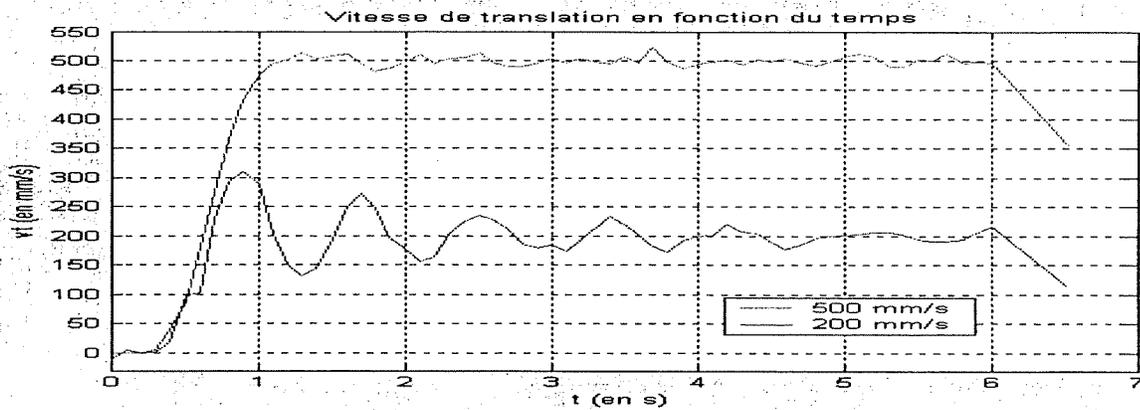


Figure 3 : Réponse à un échelon de vitesse en translation (500 mm/s et 200 mm/s)

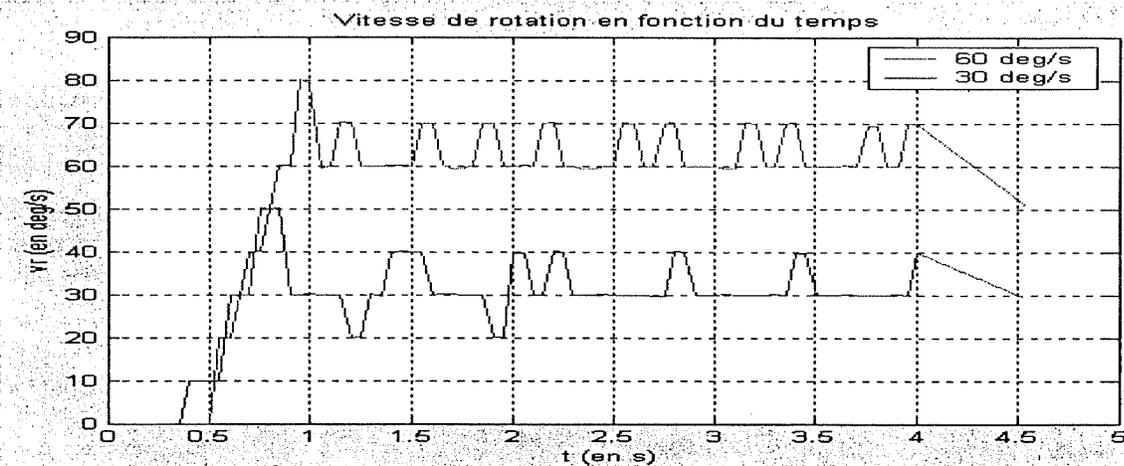


Figure 4 : Réponse du véhicule à un échelon de vitesse en rotation (60°/s et 30°/s)

IV. Essais expérimentaux effectués avec l'algorithme BDL dans le cas d'un tracteur

Le principe d'opération de la famille d'algorithmes de contrôle en étude (auquel nous ferons référence avec l'appellation BDL) est d'envoyer une commande de vitesse longitudinale et une commande de vitesse angulaire pour que le véhicule s'aligne sur la droite verticale d'équation $x = 0$. Le déplacement du véhicule a été limité entre les droites horizontales $y = 0$ et $y = 10$ pour le tracteur seul et entre les droites d'équation $y = 0$ et $y = 15$ pour le tracteur muni d'une remorque. Ainsi, le véhicule se rapproche de son état désiré ($x = 0$, $y=0$, orientation=90 degrés) en effectuant tour à tour des manœuvres de marche avant puis de marche arrière en s'alignant sur la droite verticale ($x = 0$). Chacune

de ces manœuvres est effectué en utilisant l'algorithme décrit en détail dans les références citées (en particulier Bolzern DeSantis et Locatelli 1999).

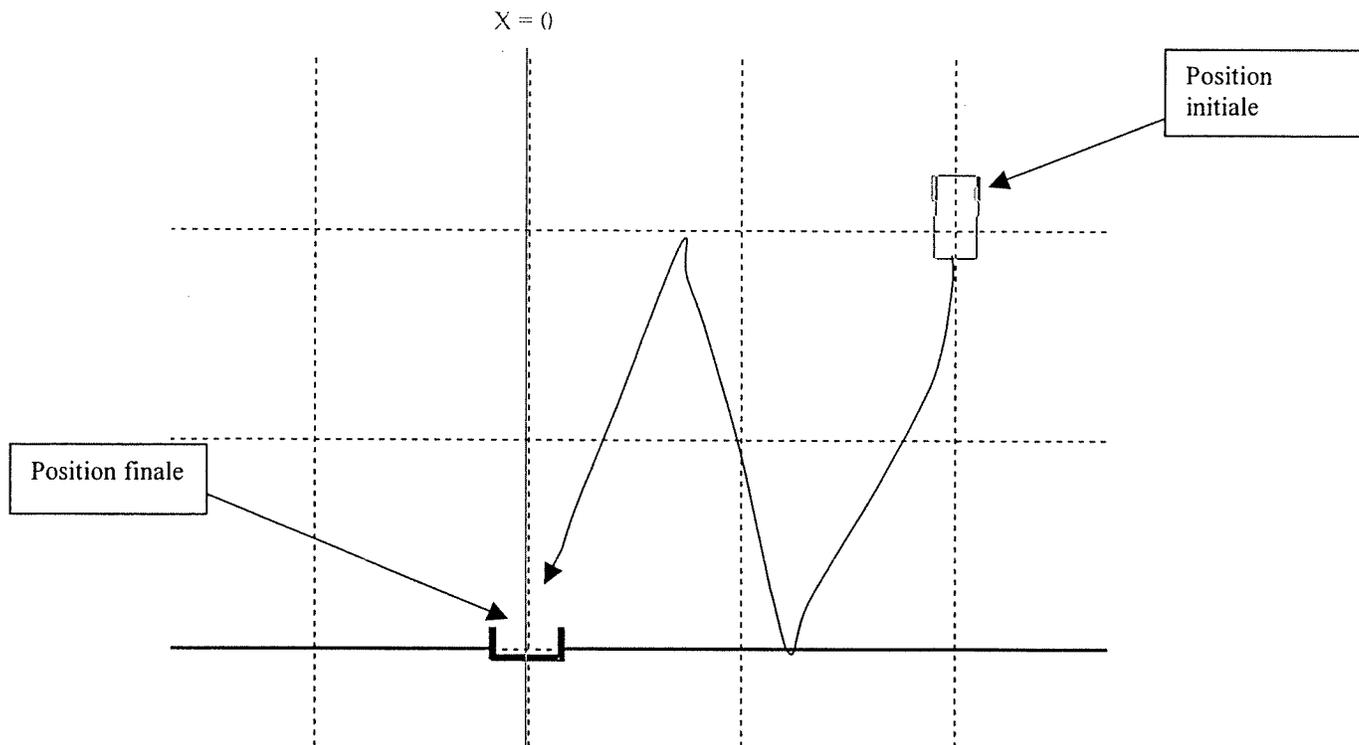


Figure 5: Manœuvre d'essai typique

De nombreuses expérimentations ont été réalisées avec diverses configurations initiales. Leurs résultats ont ensuite été comparés aux résultats de simulation. Il s'est avéré que les résultats expérimentaux sont très rapprochés des résultats de simulation.

Considérons le cas d'un test où la position initiale du robot est $x = 1$, $y = 2$ et $\theta = 45^\circ$. On s'aperçoit sur la courbe du bas de la figure 6 (expérimentation) que le robot dépasse légèrement les limites (ici la zone d'évolution est comprise entre 0 et 1 mètre) et que la valeur de la commande angulaire lors du changement de sens de marche du robot est plus importante en expérimentation qu'en simulation. Ainsi, en expérimentation, le robot effectue moins de mouvements d'aller-retour (convergence plus rapide) qu'en simulation. De manière générale, la trajectoire suivie par le robot Pioneer_2 est moins lisse qu'en simulation, on observe certains à-coups dus à de brusques variations angulaires. De plus, la trajectoire effectuée par le robot présente un retard par rapport au chemin simulé.

L'espace balayé par le véhicule durant son déplacement est représenté à la figure 7. Cela nous donne une idée de l'espace que le mobile va occuper durant son déplacement. Cette trajectoire est souple mais la convergence se fait en plusieurs aller-retour. Ainsi, le mobile balaie une surface plutôt importante lors de son parcours. Nous pouvons modifier les gains k_v et k_p pour que le robot soit plus agressif et converge plus rapidement.

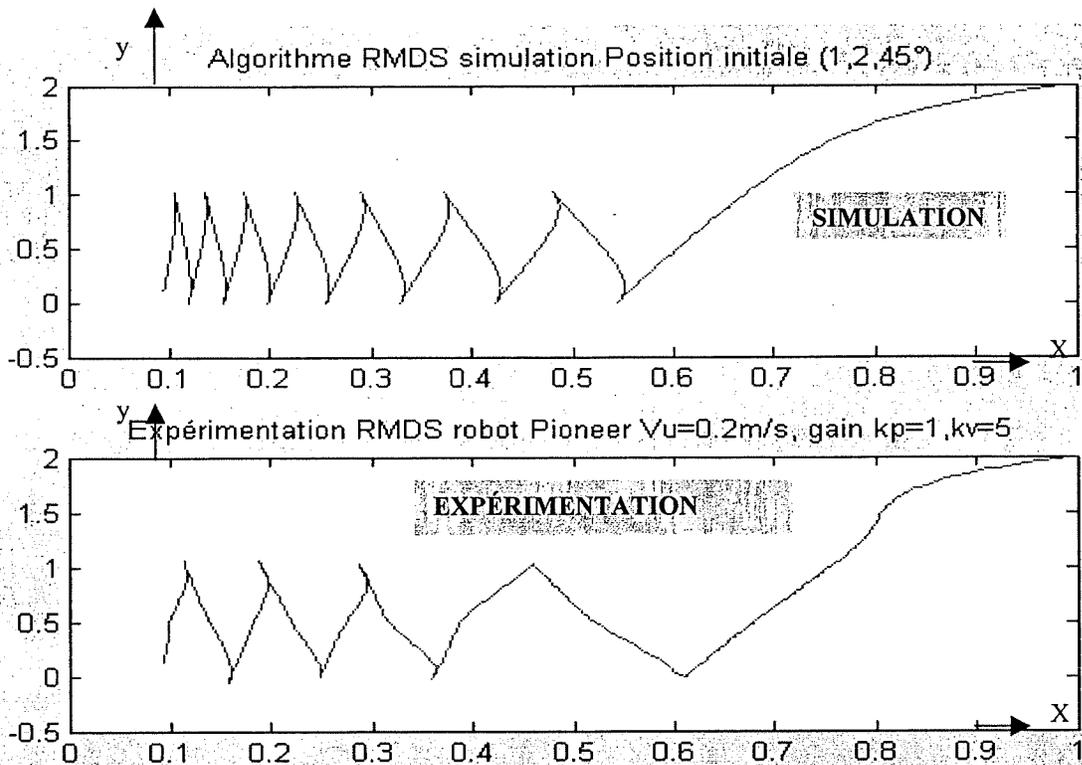


Figure 6 : Parcours effectué par le point-guide du tracteur lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme BDL

La trajectoire obtenue de manière expérimentale est retracée sur le coté droit de la figure 7. Elle est proche de la trajectoire simulée en dépit du modèle non parfait du robot. Cela montre une bonne robustesse de l'algorithme. Le retard entre la trajectoire simulée et les trajectoires obtenues en expérimentation est nettement visible. Nous avons estimé que le retard était de l'ordre de l'ordre de 0.8 seconde. Si nous prenons en compte un simple retard en simulation, on observe que le véhicule met un certain temps avant d'appliquer la commande de vitesse angulaire. Cela est montré par la figure 8. Les limites sont maintenant respectées, le robot évolue dans l'espace borné par les deux droites horizontales $y = 0$ et $y = 1$.

Superposons les mesures expérimentales (représentées par des courbes en trait plein) avec la trajectoire simulée (représentée sous forme d'étoiles) sur la figure 9. Le contrôleur a été implanté sur le robot, il permet à ce dernier de réaliser une manœuvre en espace restreint et de l'amener à la position finale voulue. La comparaison simulation-expérimentation est très satisfaisante, surtout lorsqu'on considère une modélisation plus fine du robot (prise en compte de retard dans l'application des commandes de vitesse).

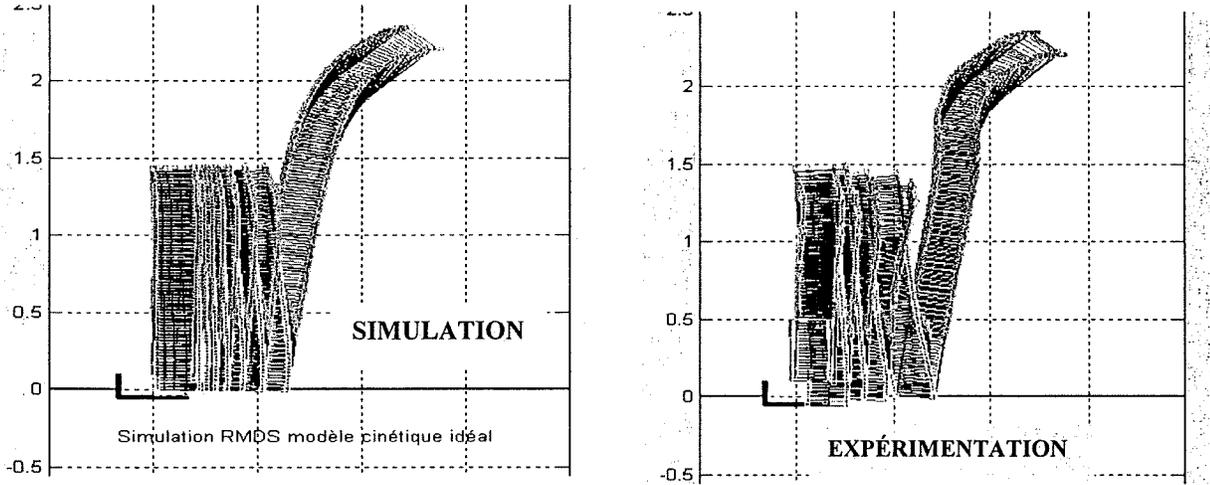


Figure 7 : Espace balayé par le tracteur lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme BDL

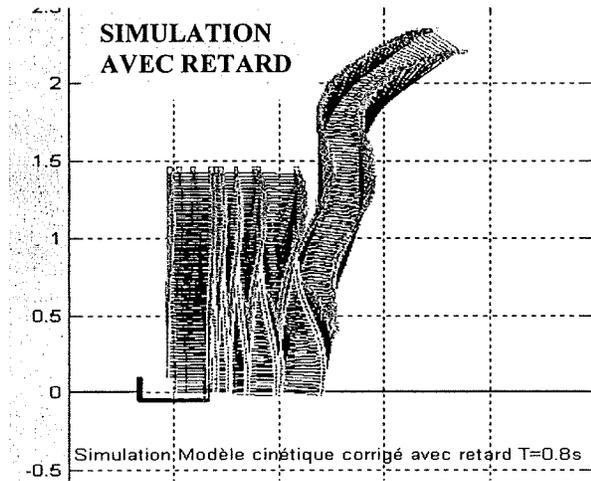


Figure 8 : Espace balayé par le tracteur lors d'une manœuvre simulée avec l'algorithme BDL en prenant en compte un retard dans le modèle du véhicule

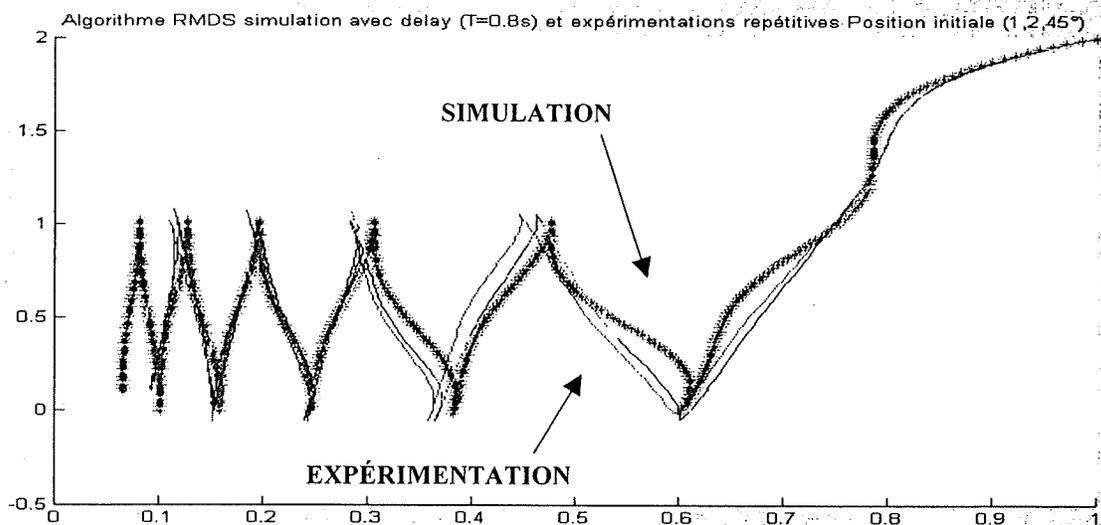


Figure 9 : Parcours effectué par le tracteur lors de plusieurs manœuvres exécutées avec l'algorithme BDL (un retard de .8 sec a été introduit dans le modèle de simulation du véhicule)

V. Comparaison avec les algorithmes d'Astolfi et de Roger Jang

Il est intéressant de comparer le comportement induit par l'algorithme BDL avec celui induit par des algorithmes de stabilisation visant les mêmes objectifs qui ont été proposés par d'autres auteurs. Nous considérerons en particulier l'algorithme de stabilisation proposé par Astolfi qui est conçu en appliquant la théorie de Lyapunov [voir une description détaillée dans Astolfi 1999] et l'algorithme de Roger Jang qui est basé sur une utilisation de la logique floue et qui est décrit dans le module sltbu.mdl de Matlab [voir une description détaillée dans Jang 2000]. La nature diverse de ces algorithmes suggère que la poursuite d'une comparaison entre ces algorithmes soit effectuée non pas avec l'objectif d'en établir une hiérarchie de supériorité, mais plutôt avec l'intention d'en mettre en évidence leur complémentarité.

Algorithme de contrôle Astolfi. Occupons nous d'abord de l'algorithme d'Astolfi. La position initiale du robot est $x = 1$, $y = 1$ et $\theta = 90^\circ$; la position désirée est $x = 0$, $y = 0$ et $\theta = 90^\circ$. La figure 14 offre l'évolution du déplacement du tracteur en simulation et l'évolution du robot Pioneer_2 en expérimentation. Le tracé en simulation est bien lisse, la commande angulaire est douce, tandis qu'en expérimentation, la commande de vitesse angulaire est plus brusque et moins progressive. On note quelques à-coups dans le déplacement du mobile. On remarque mieux cela en étudiant l'espace occupé par le véhicule en phase de simulation d'une part et en phase d'essais d'autre part. En phase de simulation, le déplacement est plutôt "joli", dans le sens où le chemin est

direct et l'évolution angulaire est progressive et souple. Les essais avec Pioneer_2 montrent des chemins moins réguliers.

Les simulations considèrent un véhicule idéal sur lequel les lois de commandes sont instantanément appliquées et cela sans modification. Les essais, quant à eux, mettent en évidence l'influence du comportement non idéal du robot qui est bien éloigné du modèle idéal de véhicule utilisé pour les simulations (voir figures 3 et 4). Néanmoins, la convergence en pratique du Pioneer_2 et la correspondance de la trajectoire expérimentale avec la trajectoire prévue montrent la robustesse de l'algorithme Astolfi.

En superposant sur une même figure 12, le chemin emprunté par le robot en théorie et en pratique, nous nous apercevons mieux de la correspondance simulation-expérimentation. D'une manière générale, le déplacement est fluide et souple. Le but est atteint rapidement. Notons néanmoins que si l'orientation initiale est défavorable, le robot réalise en pratique des trajectoires plus complexes et moins directes. Cependant, ces trajectoires sont toujours convergentes vers la position finale, ce qui montre une bonne robustesse du contrôleur. La comparaison simulation-expérimentation révèle des résultats bien concordants.

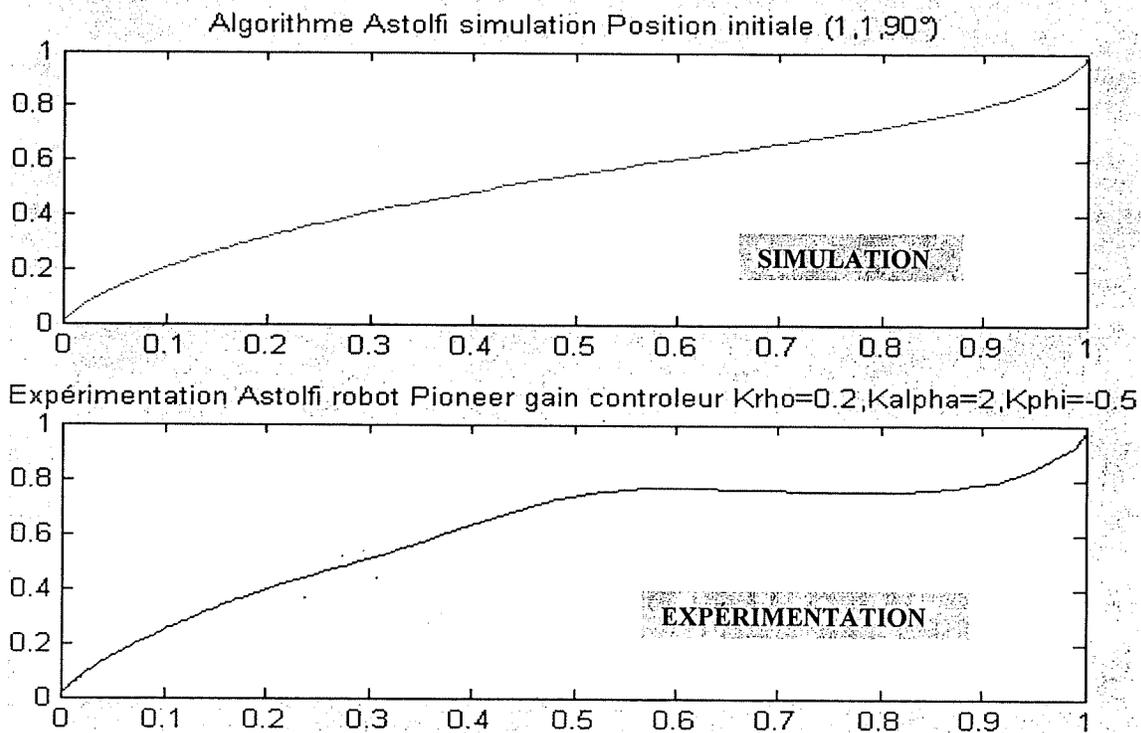


Figure 10 : Parcours effectué par le tracteur lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme Astolfi

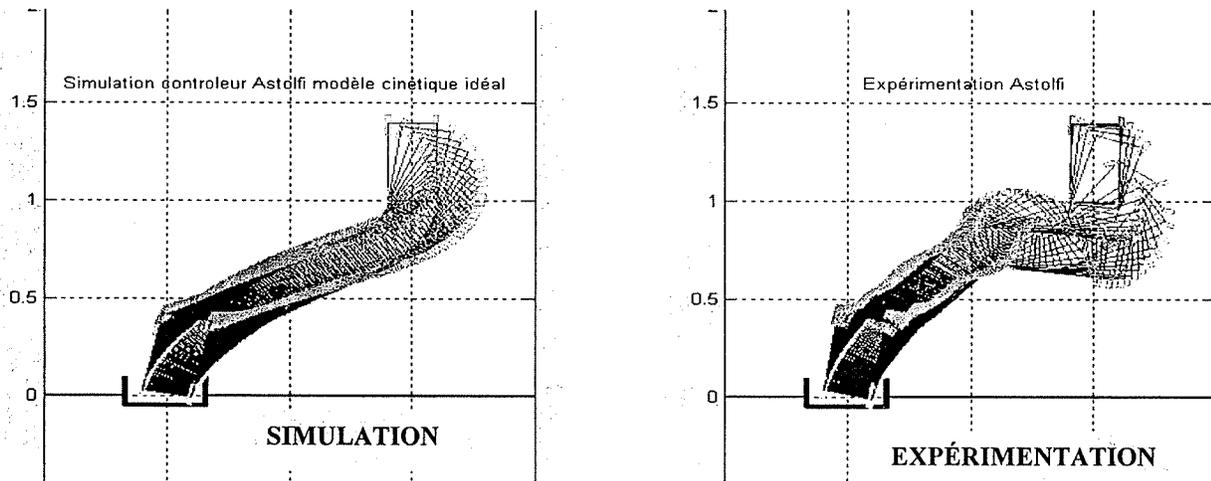


Figure 11 : Espace balayé par le tracteur lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme Astolfi

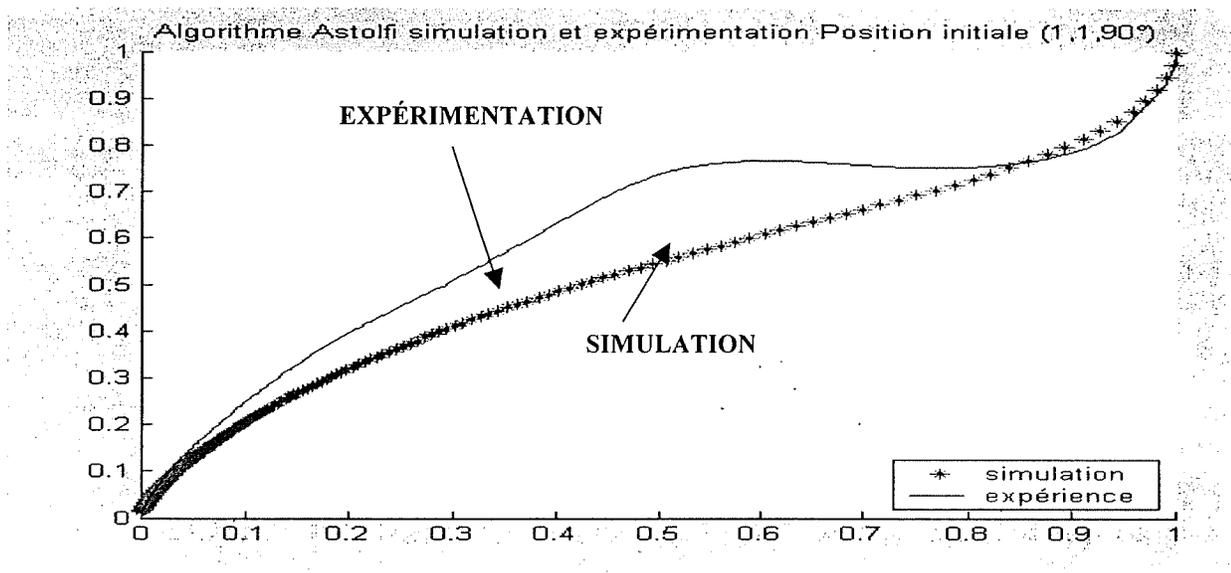


Figure 12 : Parcours effectué par le tracteur avec l'algorithme Astolfi (modèle de véhicule idéal).

Algorithme de contrôle basé sur la Logique Floue. Considérons maintenant l'algorithme de Roger Jang. Soit la position initiale du robot $x = 2$, $y = 3$ et $\theta = 90^\circ$; la position désirée est $x = 0$, $y = 0$ et $\theta = 90^\circ$. La comparaison entre l'expérimentation et la simulation est illustrée par les figures 13 et 14. On observe que les deux courbes sont semblables excepté lorsque le robot est dans la zone considérée comme proche par l'algorithme Fuzzy ($y < 1$ m). Dans cet intervalle le robot prend un angle supérieur à celui de la simulation et s'éloigne du point d'arrivée (0,0). Cette déviation provient du contrôleur, nous avons dû prendre des conditions d'arrêts larges afin que le robot s'arrête bien quand il est à proximité de la cible.

Les différents essais montrent que le robot a un comportement très proche de celui de la simulation. Les tests de répétitivité valident le fait que le robot est stable dans le temps pour un même déplacement. Cependant, lorsque le mouvement implique des changements d'angles plus brusques, un léger écart se crée. Cet écart provient peut-être du temps de réaction du robot Pioneer_2.

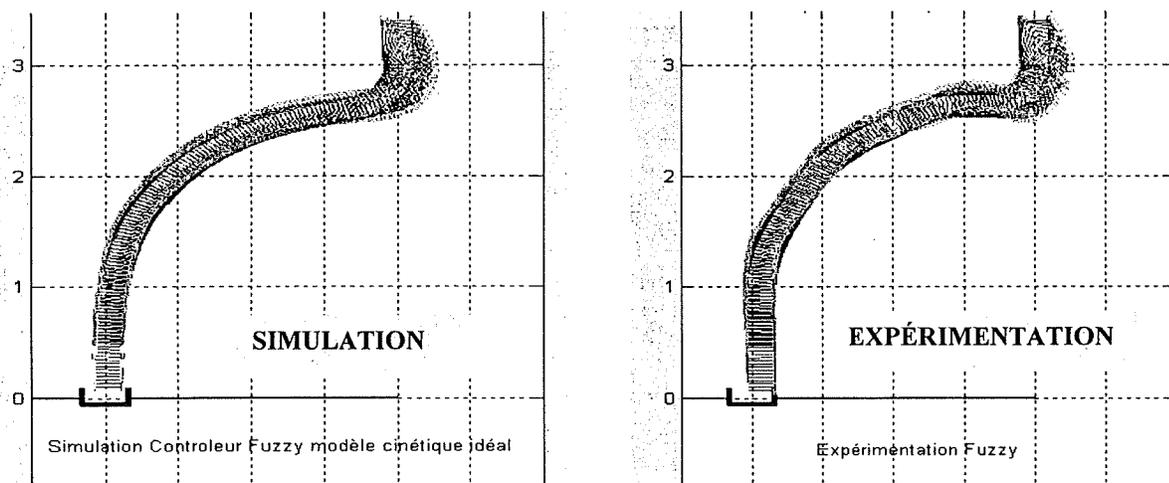


Figure 13 : Espace balayé par le tracteur lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme de Roger Jang

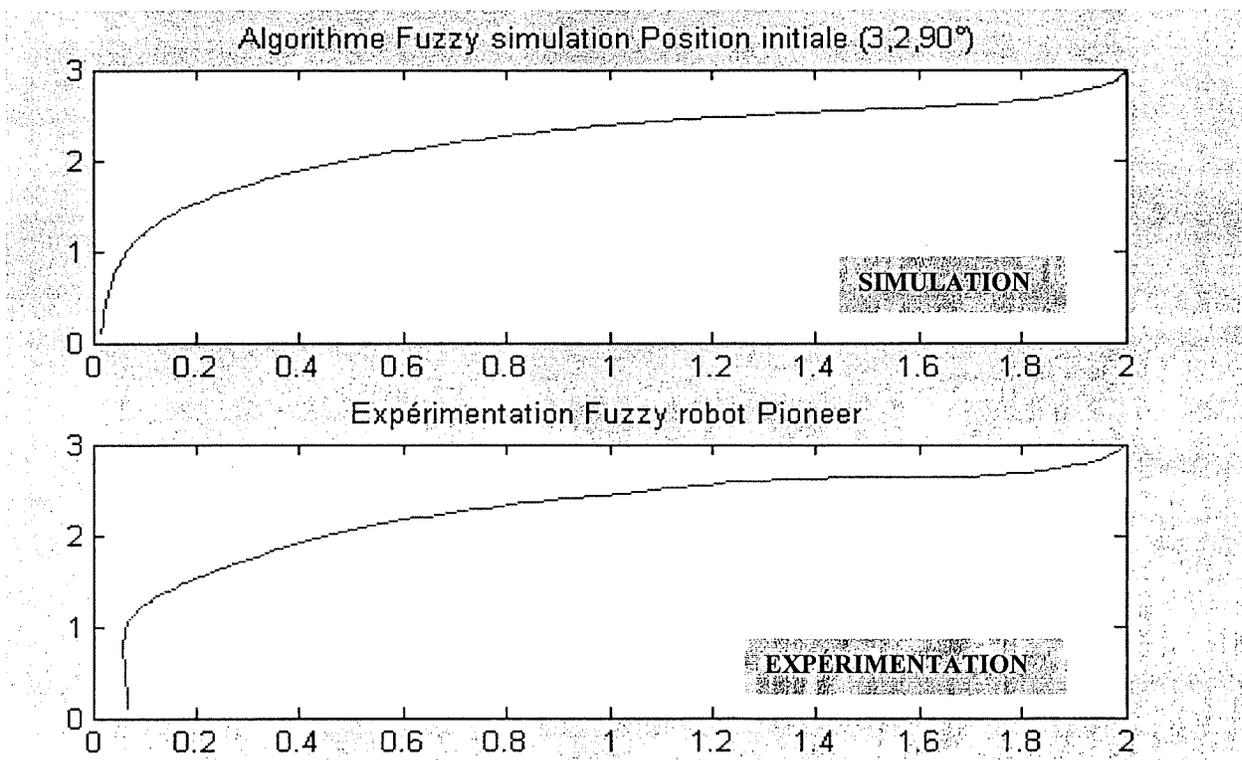


Figure 14 : Parcours effectué par le tracteur lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme de Roger Jang

VI. Essais expérimentaux effectués avec l'algorithme BDL dans le cas d'un tracteur avec remorque

Pour effectuer les tests expérimentaux décrits dans les sections qui suivent le robot Pioneer_2 a été modifié par l'ajout d'une remorque de longueur l_2 de 0.56 m. Le système articulé qui en résulte possède un offset c de 0.14 m. Les algorithmes étudiés dans le cas d'un tracteur seul ont été modifiés en utilisant la notion de tracteur virtuel définie dans De Santis 1998 et Bolzern De Santis Locatelli 1999.

Dans le cas spécifique du contrôleur BDL la modification effectuée est précisément celle décrite dans ces références. Les gains de l'algorithme ont été choisis comme suit : $k_{pback} = 0.5$, $k_{vback} = 2.5$, $k_{pav} = 0.1$, $k_{vav} = 2.5$. Les limites de déplacement entre le sens marche avant et le sens marche arrière est : $y = 2$ m et $y = 0$ m. La commande en vitesse longitudinale du tracteur sera telle que la vitesse de la remorque soit égale à ± 0.2 ms^{-1} suivant qu'on est en marche avant ou arrière.

Pour la position initiale $(1, 2, 90^\circ, 0^\circ)$, l'espace balayé par le véhicule lors de la phase de simulation et lors de la phase d'expérimentation est représentée à la figure 15.

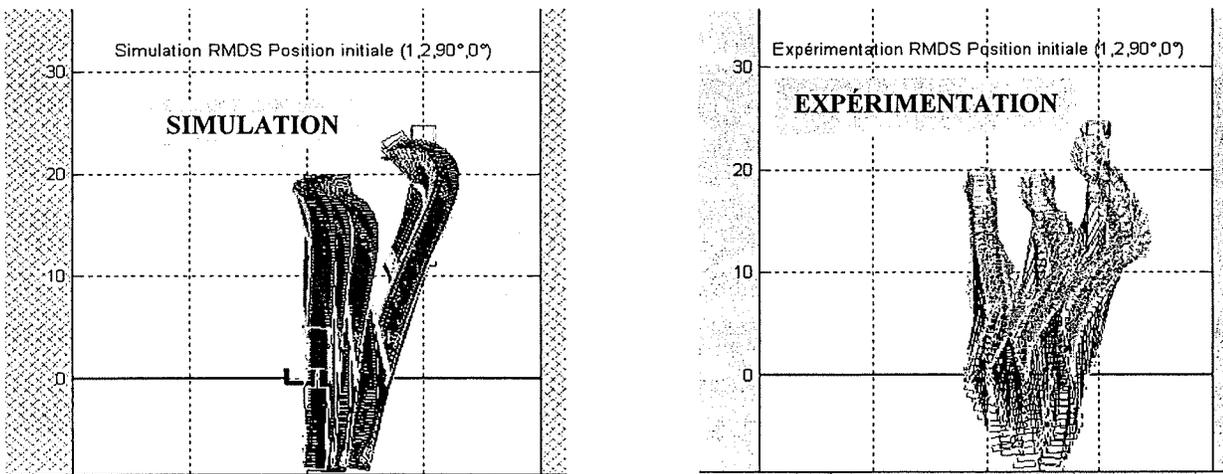


Figure 15 : Espace balayé par le tracteur-remorque lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme BDL

La figure 15 montre qu'autant les résultats de simulation que les résultats expérimentaux sont à l'effet qu'une simple manœuvre de marche arrière ne suffit pas au système pour atteindre la position finale souhaitée. Bien qu'on observe une certaine différence entre la simulation et l'expérimentation ces résultats sont dans l'ensemble bien en harmonie dans la mesure où ils concordent dans la conclusion que le système aboutit à la position désirée en un nombre restreint d'aller-retour et en balayant une surface d'occupation relativement similaire. D'autre part, la trajectoire expérimentale du tracteur est beaucoup plus arrondie que celle simulée. Ceci semble être dû au retard qu'a le robot lors de l'exécution des commandes, ce qui est instantané en simulation.

Par ailleurs, la remorque reliée au tracteur Pioneer_2, n'a pas une trajectoire aussi lisse qu'en simulation. En effet, la liaison remorque-robot est imparfaite. Un angle entre le tracteur et la remorque se crée lorsque le robot Pioneer_2 pousse la remorque (marche arrière). Le contrôleur doit sans cesse tenter de corriger cette perturbation.

Nous pourrions essayer de modifier les gains du contrôleur ou considérer un modèle de véhicule qui tiendrait compte de certaines imperfections du robot. Ainsi, nous verrions, comme lors des essais d'asservissement en parcours d'un tracteur seul, que la simulation et l'expérimentation sont quasiment semblables. La simulation donne un aperçu qualitatif très précieux du déplacement du robot et de la remorque.

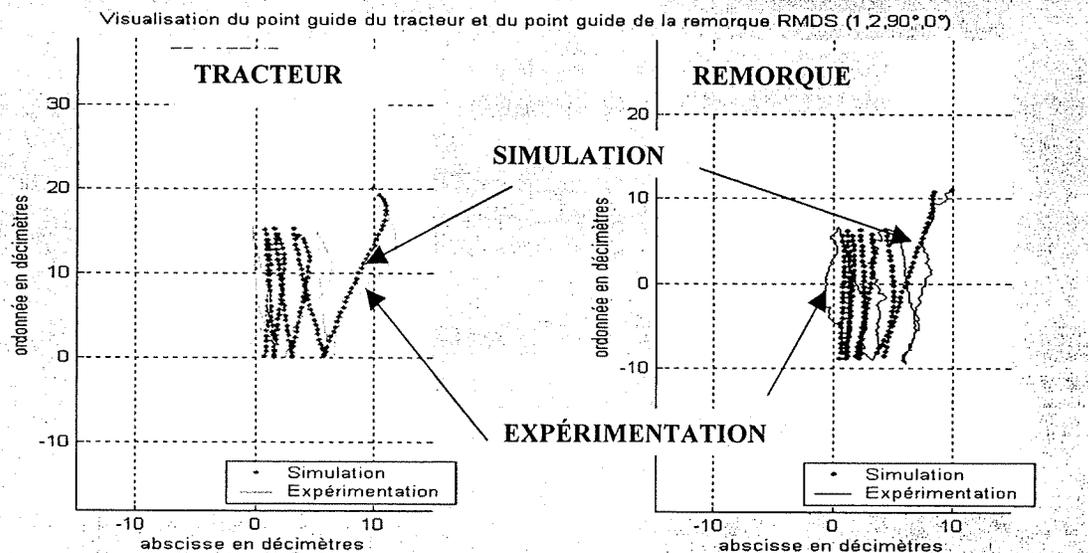


Figure 16 : Parcours du point guide effectué par le tracteur avec remorque lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme BDL (position initiale (1,2,90°,0°))

VII. Comparaison avec des versions étendues des algorithmes d'Astolfi et de Roger Jang

Dans leur version originale les algorithmes Astolfi et Fuzzy ne sont pas applicables pour le contrôle d'un véhicule articulé (tracteur et remorque). Nous les avons donc modifiés en utilisant la technique du tracteur virtuel proposé dans Bolzern De Santis et Locatelli 1999. En marche avant le tracteur tire la remorque et l'algorithme original peut être utilisé. Par contre, en marche arrière, nous avons considéré la remorque comme étant un tracteur virtuel. Les contrôleurs ainsi modifiés calculent dans un premier temps, la commande en vitesse angulaire et la commande en vitesse longitudinale à appliquer au tracteur virtuel. Dans un deuxième temps, ils évaluent la commande en translation et la commande en rotation à donner au tracteur pour que la remorque (tracteur virtuel) ait les valeurs précédemment établies.

Algorithme de contrôle d'Astolfi modifié. Les gains du contrôleur ont été choisis égaux à : $k_p = 0.05$, $k_\alpha = 0.4$ et $k_\varphi = -0.07$. En considérant la situation initiale $(1, 2, 90^\circ, 0^\circ)$, nous obtenons les résultats illustrés à la figure 17.

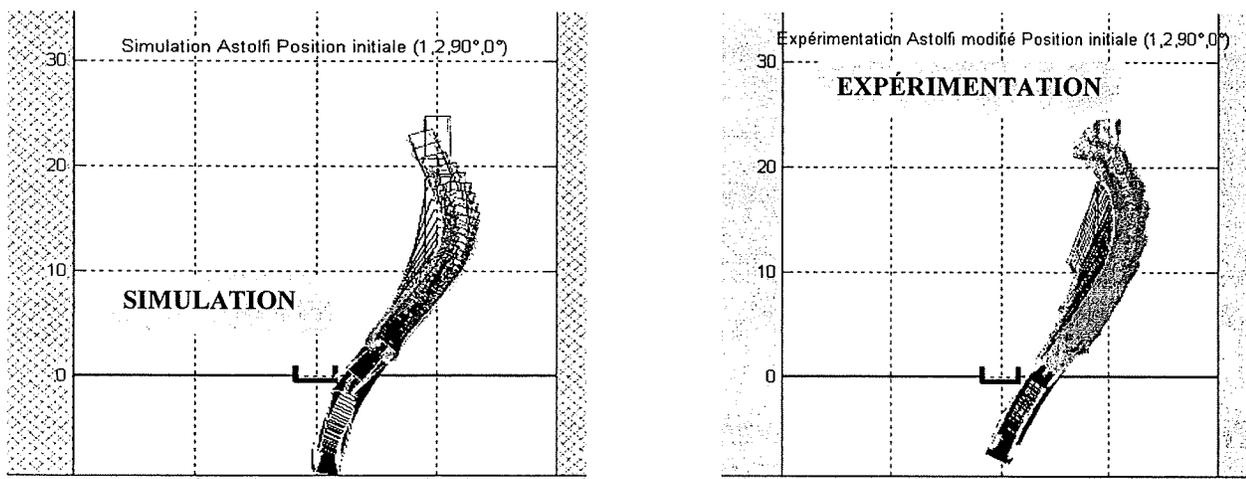


Figure 17 : Espace balayé par le tracteur-remorque lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme Astolfi

En termes de point-guide sur le tracteur (milieu de l'essieu arrière) et de point guide sur la remorque (milieu de l'essieu arrière), nous obtenons les trajectoires illustrées à la figure 18. Les courbes obtenues en phase de simulation d'une part et en phase de tests d'autre part sont quasiment identiques. Une légère différence est notable au début du mouvement lorsque le robot n'a pas atteint la vitesse demandée initialement (régime transitoire), alors qu'en simulation la vitesse est immédiatement égale à la vitesse demandée (pas de transitoire modélisé ici).

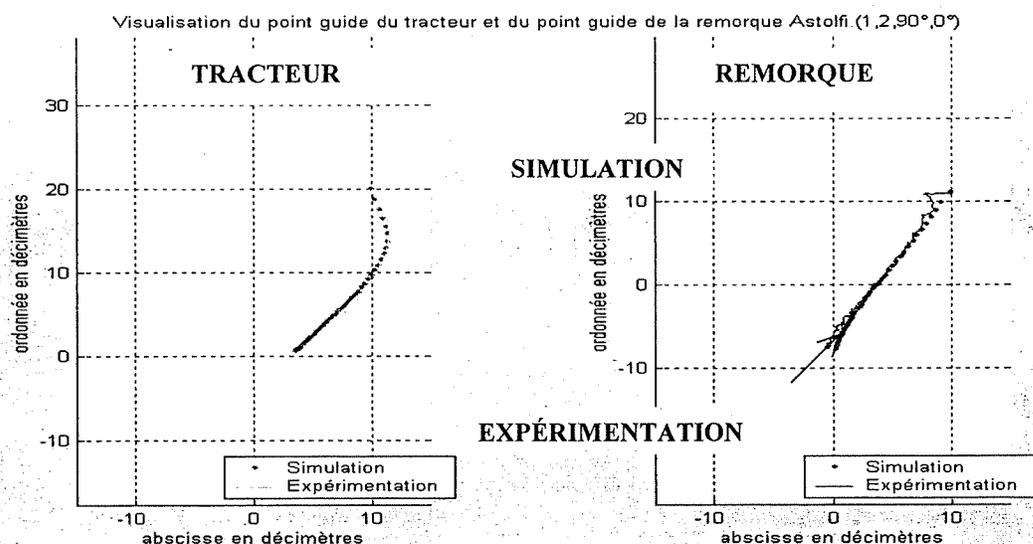


Figure 18 : Parcours du point guide effectué par le tracteur avec remorque lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme d'Astolfi (position initiale $(1,2,90^\circ,0^\circ)$)

Algorithme de contrôle avec Logique Floue (modifié)

Dans le cas de l'algorithme de contrôle avec logique floue modifié encore une fois en appliquant la technique du tracteur virtuel, nous obtenons les résultats illustrés aux figures 19 et 20. Clairement, autant la simulation que l'expérimentation suggèrent que trajectoire de la remorque est plutôt oscillante. Cela s'explique par le fait que la version du contrôleur avec logique floue que nous utilisons est basée sur des commandes angulaires fortes. Il induit des écarts importants par rapport à la trajectoire désirée qu'il faut ensuite compenser. Or, la compensation étant trop forte, une recompensation corrective également forte dans le sens inverse s'ensuit.

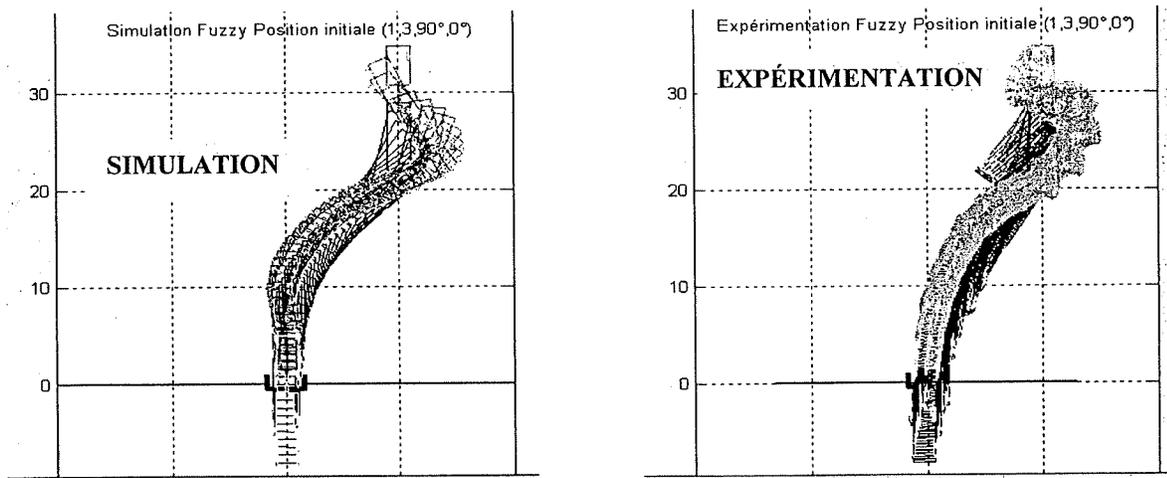


Figure 19 : Espace balayé par le tracteur-remorque lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme Fuzzy

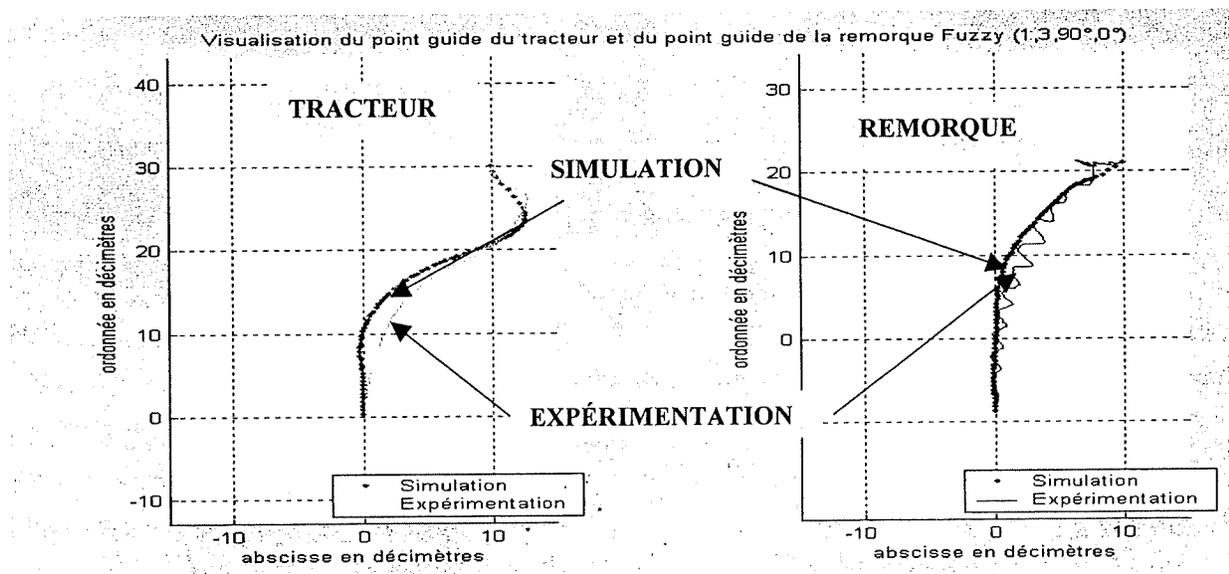


Figure 20 : Parcours du point guide effectué par le tracteur avec remorque lors d'une manœuvre exécutée avec l'algorithme avec Logique Floue (position initiale $(1,3,90°,0°)$)

VIII. Conclusion

Les algorithmes décrits dans De Santis 1998 et dans Bolzern De Santis et Locatelli 1999 ont été implantés dans un banc d'essai concernant la stabilisation d'un robot mobile représenté par Pioneer 2 (un robot commercial de la compagnie ActivMedia) ainsi que d'un robot articulé obtenu en ajoutant une remorque au Pioneer 2. Les résultats effectués en utilisant ce banc d'essai ont permis d'obtenir une validation expérimentale des résultats théoriques de stabilité et de convergence publiés dans les références citées ainsi qu'une validation expérimentale de l'efficacité de la notion de tracteur virtuel proposée dans ces mêmes références.

Ces résultats ont permis également de constater la bonne concordance qui existe entre le comportement expérimental du système de stabilisation et le comportement prévu par voie de simulation. Cette concordance se produit malgré une différence importante entre le comportement réel du robot en chaîne ouverte et le modèle mathématique utilisé pour le simuler. Elle suggère que des développements ultérieurs du système de stabilisation et d'asservissement en parcours basés sur ces algorithmes pourront d'une façon bien crédible être effectués par voie de simulation.

La validité de la notion de tracteur virtuel a été également confirmée par voie de son application expérimentale aux algorithmes d'Astolfi et de Roger Jang. Cette application montre comment en utilisant la notion de tracteur virtuel des algorithmes de stabilisation conçus pour des robots mobiles non articulés peuvent être efficacement modifiés afin de les rendre applicables à des robots mobiles articulés.

Bibliographie

1. Anonimous 2001, **Saphira Operation Manual**, ACTIVMEDIA Robotics, (www.infotech.tu-chemnitz.de/~robotik-ag/dokumente/Saphira.pdf).
2. Astolfi, A., 1999, Exponential Stabilization of a Wheeled Mobile Robot Via Discontinuons Control, **ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**, Vol.121 pages 121-125.
3. Bolzern, P., DeSantis, R.M., Locatelli, A., 1999, **An input-output linearization approach to the control of a n-body articulated vehicle**, Politecnico di Milano – Dipartimento di elettronica e informazione, Rapporto interno 99-35. (à paraître dans **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**).
4. DeSantis, R.M., 1998, **Path-tracking for articulated vehicles via exact and Jacobian Linearization**, Proc. IAV '98, Madrid, Spain.
5. DeSantis, R.M., 1997, **Path-tracking for a tractor trailer via input/output linearization**, Tech Rep. EPM/RT-97/18.
6. DeSantis, R.M., 1994, Path-Tracking for a Tractor-Trailer-Like Robot, **Int. Journal of Robotic Research**, Vol.13, n.6, Dec '94, pp. 533-544).
7. DeSantis, R.M., 1995, Modeling and Path-Tracking Control for a Mobile Wheeled Robot with a Differential Drive, **Robotica**, Vol. 13, Sept '95, pp. 401-410.
8. De Santis, R.M., Hurteau, R., 1990. On the Motion Control of Electric AGVs, **Automazione e Instrumentazione**, vol. 3, pp. 137 à 150, 1990.
9. Fliess M., Lévine J., Martin P., Rouchon P. 1995. Flatness and Defect of Nonlinear Systems: Introductory Theory and Examples, **Int. J. Control**, vol.61, pp.1327-1361.
10. Lamiroux, F., Laumond, J.P., 1998, A Practical Approach to Feedback Control for a Mobile Robot with Trailer, Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, Leuven, May 1998.
11. Lesot, B., 2001, **Exécution automatique de manœuvres de stationnement pour véhicule autonome – Simulation et Expérimentation**, Ecole Polytechnique de Montréal, rapport de stage.
12. Jang, R.,2000, A Fuzzy Controller for a truck backer-upper, **Copyright 1994-2000 The MathWorks, Inc.** (Matlab R12/toolbox/fuzzy/demo/ sltbu.mdl (Backing a truck).
13. Sampei, M., Tamura, T., Kobayashi, T., Shibui, N., 1995. Arbitrary Path-Tracking Control of Articulated Vehicles Using Nonlinear Control Theory, **IEEE Trans on Control Technology**, Vol.3, N.1, March 1995, pp. 125-13.
14. Samson, C., 1995, Control of Chained Systems Application to Path Following and Time Varying Point-Stabilization of Mobile Robots, **IEEE Trans on Automatic Control**, Vol. 40, N.1, January 1995, pp. 64-77.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00263583 5

École Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, Succ. Centre-ville
Montréal (Québec)
H3C 3A7

