

EPM-RT-2003-08

**GUIDAGE ASSISTÉ PAR ORDINATEUR D'UN
TRACTEUR REMORQUE**

Cédric Demers-Roy, François Miralles, Jean-François Olivier
Département de génie électrique
École Polytechnique de Montréal

Août 2003

Poly

EPM / RT – 2003 - 08

GUIDAGE ASSISTÉ PAR ORDINATEUR D'UN
TRACTEUR REMORQUE

Cédric Demers-Roy
École Polytechnique de Montréal

François Miralles
École des Mines d'Alès

Jean-François Olivier
ENSEEIH

Projet dirigé par

Professeur Romano DeSantis
Professeur Richard Hurteau

Août 2003

©2003
Romano DeSantis, Richard Hurteau
Tous droits réservés

Dépôt légal :
Bibliothèque nationale du Québec, 2002
Bibliothèque nationale du Canada, 2002

EPM-RT-2003-08

Guidage assisté par ordinateur d'un tracteur remorque

par : Cédric Demers-Roy, François Miralles et Jean-François Olivier

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.

Remerciements

Cette étude est le fruit d'un travail de collaboration entre ses trois auteurs. François Miralles et Jean-François Olivier se sont occupés surtout de la mise en place de l'interface graphique du banc d'essai, du logiciel de simulation, du design et du développement des tests, et de la rédaction du rapport. Cédric Demers-Roy a contribué à la mise en place du banc d'essai et a mis en place le robot mobile sur lequel ce même banc d'essai est centré.

Les auteurs tiennent à exprimer leur reconnaissance aux techniciens de la section Automation et Systèmes, madame Marie-Lyne Brisson et monsieur Richard Grenier, pour l'importante aide technique et informatique qui leurs a été généreusement et amicalement prodigué tout au long de ce projet.

GUIDAGE ASSISTÉ PAR ORDINATEUR D'UN TRACTEUR REMORQUE

Cédric Demers-Roy

Étudiant à la maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal

François Miralles

Stagiaire de l'Ecole des Mines d'Alès

Jean-François Olivier

Stagiaire de L'ENSEEIH

Ecole Polytechnique de Montréal

Laboratoire d'Automation et Systèmes

2900, boul. Edouard-Montpetit, CP 6079, Succ. Centre-ville

Montréal, Québec, Canada, H3C3A7

Sommaire

Cette étude concerne un système de guidage assisté qui permette de simplifier l'exécution de la part d'un conducteur des manœuvres requises par le stationnement en espace restreint d'un tracteur remorque. L'objectif est de valider d'une façon expérimentale le bon fonctionnement du système qui est prévu par la théorie. Cet objectif est poursuivi en mettant en place un banc d'essai approprié et en développant un certain nombre de tests autant expérimentaux que par voie de simulation.

Le système de guidage est conçu en appliquant des techniques récemment proposées par la littérature scientifique dans le cadre de l'asservissement de véhicules articulés. Le banc d'essai est centré sur un robot mobile mis au point au sein du Laboratoire d'Automation et Systèmes automatique de l'Ecole Polytechnique de Montréal et sur un environnement informatique pour la commande en temps réel basé sur Matlab, Simulink and XPC target. Les tests concernent, entre autres, l'exécution par voie manuelle et assistée de manoeuvres de stationnement à 90°.

Les résultats obtenus permettent d'établir la validation expérimentale recherchée.

GUIDAGE ASSISTÉ PAR ORDINATEUR D'UN TRACTEUR REMORQUE

Remerciements

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION	5
II. BANC D'ESSAI	6
II.1. Structure	6
II.2. Système asservi	7
II.3. Système de contrôle	8
II.4. Interface de commande et de visualisation	9
III. MODELISATION ET IDENTIFICATION DU SYSTEME ASSERVI	9
III.1. Modélisation	9
III.2. Identification du système asservi	11
IV. IMPLANTATION DU CONTROLEUR	13
IV.1. Contrôle manuel	13
IV.2. Contrôle assisté	14
V. SIMULATION ET EXPERIMENTATION	15
V.1. Comparaison des résultats en simulation et en expérimentation	15
V.2 Efficacité du contrôle assisté	21
VI. CONCLUSION	24
Bibliographie	25
ANNEXE : Une courte analyse du problème de déviation du robot pour une trajectoire rectiligne	26

Liste des figures

Figure 1: banc d'essai	6
Figure 2 : système asservi	8
Figure 3 : système de contrôle.....	9
Figure 4: schéma et paramètres du tracteur remorque	10
Figure 5 : essais en translation	12
Figure 6: essais en rotation.....	13
Figure 7: schéma bloc du contrôle en boucle fermée	13
Figure 8: trajectoire du robot pour l'Essai1	16
Figure 9: vitesse linéaire du robot pour l'Essai1.....	16
Figure 10: trajectoire du robot pour l'Essai2	17
Figure 11: vitesse angulaire du robot pour l'Essai2.....	17
Figure 12: trajectoire du robot pour l'Essai3	18
Figure 13: vitesse linéaire du robot pour l'Essai3.....	18
Figure 14: vitesse angulaire du robot pour l'Essai3.....	19
Figure 15: angle phi du robot pour l'Essai3.....	19
Figure 16: tension du moteur0 du robot pour l'Essai3	20
Figure 17: tension du moteur1 du robot pour l'Essai3	20
Figure 18: représentation de l'aire de garage.....	21
Figure 19 : poste de pilotage	22
Figure 20 : photo de l'aire de garage	22
Figure 21: tableau de résultats.....	23
Figure 22: essai en ligne droite, vitesse angulaire bruitée	26
Figure 23: déviation du robot en ligne droite.....	27

I. INTRODUCTION

Ce rapport fait partie d'un ensemble d'études sur le guidage de véhicules qui sont poursuivies depuis un certain nombre d'années au sein du Laboratoire d'Automation et Systèmes. L'objectif général de ces études est la mise en place de systèmes de contrôle avancé pour la conduite intelligente de véhicules terrestres (voir références [3-10]). Dans ce qui suit, nous considérons un système de guidage assisté qui permet de simplifier l'exécution de la part d'un conducteur des manœuvres requises par le stationnement en espace restreint d'un tracteur remorque. Ce système de guidage est mis au point en appliquant les techniques récemment proposées par Bolzern, DeSantis et Locatelli dans le cadre de l'asservissement de véhicules articulés. Notre objectif est de valider d'une façon expérimentale le bon fonctionnement du système qui est prévu par la théorie.

La référence citée fournit la description détaillée de la famille d'algorithmes qui a servi de base au développement de l'algorithme mis en place pour atteindre notre objectif. Rappelons tout simplement qu'il s'agit d'un certain nombre d'algorithmes qui permettent de faire suivre à un véhicule articulé autonome un chemin assigné (un cercle ou une droite) à une vitesse assignée en marche avant ou en marche arrière. Ces algorithmes font usage de la notion de tracteur virtuel et permettent de contrôler la dynamique des erreurs par une approche de linéarisation exacte au sens entrée-sortie. La référence citée fournit une démonstration de la stabilité de ainsi que nombre de résultats de simulation qui illustrent les propriétés de stabilité, de convergence et de robustesse de l'approche proposée.

L'algorithme à la base du système de guidage en étude, conçu pour être utilisé dans le cadre d'une assistance à la conduite, est lui aussi fondé sur les notions de tracteur virtuel et de linéarisation exacte au sens entrée-sortie. Son implantation a été réalisée en utilisant le logiciel toolbox xPC Target de Matlab [2] et en se servant d'un robot mobile mis en place au sein du Laboratoire d'Automation et Systèmes [3]. Comme dans le cas de l'article, les manœuvres se font à basse vitesse (dans notre cas une vitesse inférieure ou égale à 1.5m/s).

Avec notre système de guidage assisté, le conducteur peut moduler la vitesse ainsi que l'angle de braquage des roues du tracteur s'il est en marche avant ou bien l'angle entre le tracteur et la remorque s'il est en marche arrière. Un certain nombre de tests ont été mis en œuvre afin de vérifier s'il était plus facile de guider le véhicule avec l'assistance et dans quelle mesure les résultats obtenus en simulation rejoignent les résultats expérimentaux.

II. BANC D'ESSAI

II.1. Structure

Notre banc d'essai est constitué de trois modules : une interface de commande et de visualisation de l'état du système (volant d'arcade de Logitech et PC pour envoyer les commandes), le système asservi (robot mobile et remorque) et le système de contrôle (ordinateur embarqué).

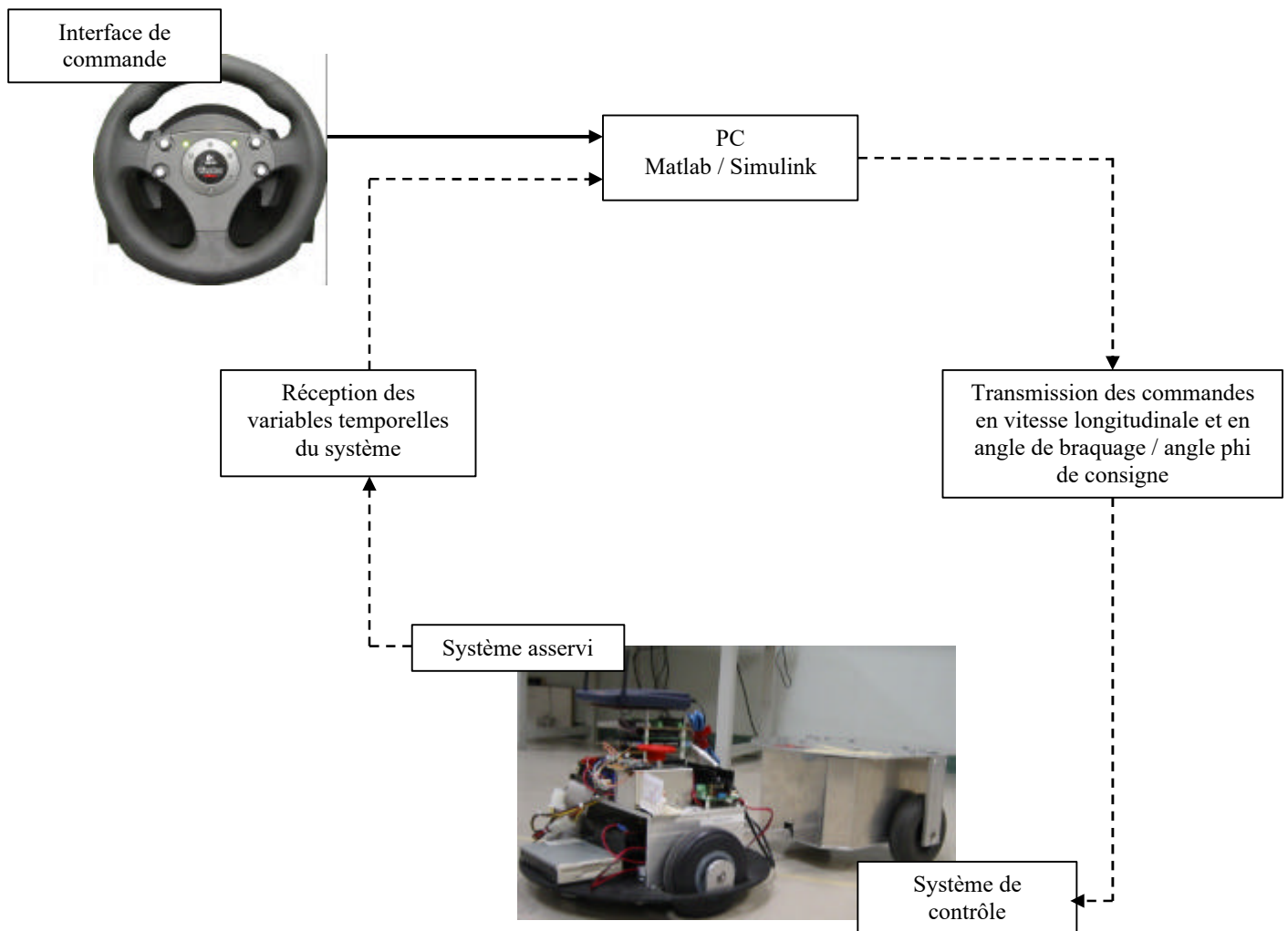


Figure 1: banc d'essai

Les commandes appliquées au véhicule avec le volant (vitesse et consigne d'angle) sont envoyées par un PC au système de contrôle temps réel. La communication entre l'interface de commande et le système asservi est prise en charge par Matlab au travers

d'un réseau ethernet. La liaison entre l'ordinateur embarqué (serveur) et le PC qui envoie les commandes (client) se fait par un réseau sans fil selon la norme i802.11b.

II.2. Système asservi

Le système asservi est constitué d'un tracteur et d'une remorque développés au sein de la section Automation et Systèmes de l'École Polytechnique de Montréal par Cédric Demers-Roy [4]. Dans sa forme générale, ce robot est comparable au robot Pioneer_2 de ActivMedia Robotics que nous avons utilisé dans des «études antérieures» (consulter anonymous [1] pour le manuel du robot Pioneer_2).

Le tracteur est un robot mobile circulaire à roues indépendantes tel que représenté à la figure 1. Ce robot a la même structure géométrique que celle décrite (entre autres références) dans Bolzern, De Santis, Locatelli (2001) pour un véhicule à une remorque. Le poids de l'ensemble robot-remorque est de 18.6Kg. La vitesse longitudinale maximale du robot est de 2.4m/s. Sa vitesse de rotation maximale est de 44rad/s. Un bouton à trois positions permet de mettre le robot en marche avant, à marche arrière, ou bien à l'arrêt (recharge des batteries). Un bouton industriel d'arrêt d'urgence permet la mise hors tension des moteurs en tout temps afin d'assurer la sécurité. Une jauge permet de vérifier l'état de charge des batteries.

Le système est équipé d'un ordinateur embarqué basé sur un Pentium 333MHz (carte mère VIPER 830 de Teknor) avec 256Mo de mémoire vive. L'échange de données entre les différentes cartes d'interface et la carte mère se fait via un BUS PC-104 (PC-104+ aussi disponible). Un disque dur MicroDrive de 1Go est intégré au système pour le système d'exploitation et les données. Un lien sans fil (Netgear modèle ME-102) lui permet d'intégrer un réseau i802.11b et ainsi profiter d'une liberté accrue. Le robot comporte un encodeur optique (résolution de 500 imp/tr, i.e. 0.72°) intégré sur chacun de ses deux moteurs (Pitmann modèle GM9234E475). On peut ainsi retrouver la position et l'orientation du robot (x, y, theta) par odométrie. Un encodeur optique Santron d'une résolution de 1024 imp/360°, donne l'angle entre le tracteur et la remorque.

Pour les interfaces, les impulsions sont lues par une carte d'acquisition industrielle de la société Advanced Computer Systems communiquant via le bus PC-104 (carte ACS-Tech80 modèle 5912). Le pilote qui permet la communication entre cette carte et le système temps réel (xPC Target) a été programmé en C par Cédric Demers-Roy. Les signaux de commande sont envoyés aux moteurs via une carte de sortie numérique (Quartz-MM10 de Diamond Systems) selon le codage PWM (Pulse Width Modulation). Le pilote de cette carte se retrouve dans la librairie de l'environnement xPC Target. L'amplification du signal est réalisée par une carte de pont en H de la compagnie MESA Electronics (MESA-7125). La source de tension est un ensemble de deux batteries (acide-plomb modèle LC-R127R2P de Panasonic) de 12 Volts en série. Cet ensemble est relié à une carte d'alimentation (modèle HE 104 de la société TRI-M Engineering) permettant d'obtenir +5 Volts et +12 Volts régulés. Seuls les moteurs sont directement alimentés par les batteries.

La communication entre le robot et le module de commande se fait par le protocole TCP/IP. Le système asservi reçoit ainsi les consignes de manière asynchrone. Cependant, les calculs sur le robot sont effectués d'une façon synchrone en conformité avec les possibilités offertes par l'environnement à temps réel de xPC Target.

La remorque est de longueur réglable. Nous avons pris une longueur de 40cm. Cette longueur est assez courte par rapport à la longueur totale du système. Cela a pour effet d'augmenter la difficulté du contrôle.

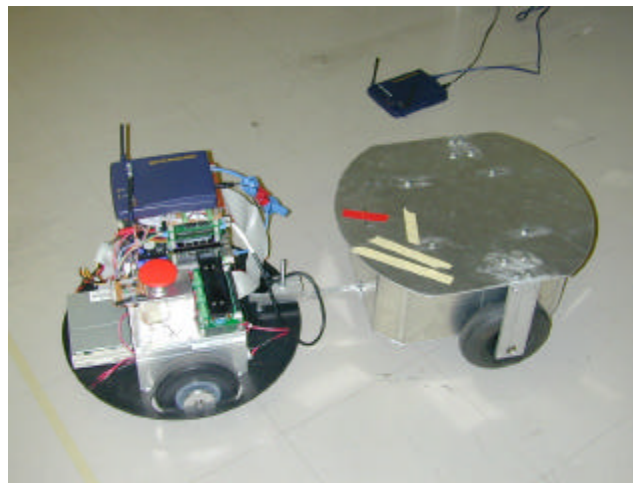


Figure 2 : système asservi

II.3. Système de contrôle

Pour implanter le système de contrôle du véhicule, nous avons utilisé le module de prototypage rapide xPC Target de Matlab. Tel qu'illustré par la figure 3, le système temps réel qui tourne sur l'ordinateur embarqué comporte deux boucles fermées : une boucle fermée de simulation et une boucle fermée qui intègre le véhicule réel. Les boucles fermées ont été programmées sous Simulink. Le modèle obtenu a ensuite été converti en système temps réel avec la toolbox Real-time Workshop de Matlab ciblé sur xPC Target. Ce système occupe 12% de temps CPU. Faire tourner une boucle fermée simulée et une boucle fermée qui inclue le système réel en même temps sur le même système permet de comparer les résultats avec précision.

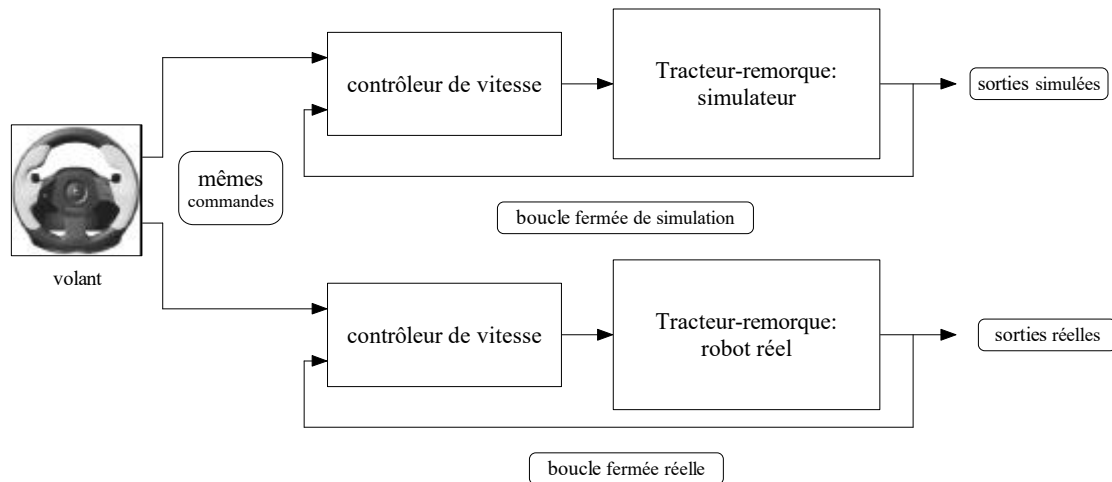


Figure 3 : système de contrôle

II.4. Interface de commande et de visualisation

Matlab avec la toolbox xPC Target constituent l'interface qui nous a permis de communiquer avec le système temps réel (ajustement des gains du contrôleur, envoi et récupération des données). Pour commander le robot, nous avons utilisé un volant d'arcade de Logitech, une interface grand public. Le volant est branché sur le port de jeu du PC hôte. Les signaux en entrée sont lus par un modèle Simulink. Les commandes sont ensuite envoyées au système de contrôle temps réel du robot. Dans le même temps, le modèle Simulink du PC hôte reçoit les données du véhicule (position, vitesses calculées par odométrie, tensions de commande). Nous utilisons ces données pour visualiser les déplacements du robot sur une interface graphique que nous avons modifié en prenant comme base la démonstration de Matlab sltbu.mdl. Il est ainsi possible de visualiser le comportement du robot lors de l'expérience et d'enregistrer les données relatives à cette expérience.

III. MODELISATION ET IDENTIFICATION DU SYSTEME ASSERVI

III.1. Modélisation

Conformément aux travaux que l'on retrouve dans la littérature scientifique (voir par exemple De Santis 1998, Bolzern DeSantis et Locatelli 1999), le modèle de notre tracteur-remorque se décompose en deux modules connectés en série.

Le premier concerne la dynamique du tracteur-remorque (module identique à celui d'un tracteur simple) et est composé de deux fonctions de transfert du premier ordre. La première fonction de transfert qui relie la vitesse linéaire acquise par le robot que l'on

notera $v(s)$ dans le domaine de Laplace et la vitesse linéaire requise par le système de contrôle (que l'on appelle aussi propulsion) notée $U_1(s)$ s'écrit :

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

Où K_v et τ_v sont respectivement le gain statique et la constante de temps en translation dont les valeurs ont été déterminées par voie d'identification. La seconde fonction de transfert qui relie la vitesse angulaire acquise $\omega(s)$ et la vitesse angulaire requise (que l'on appelle aussi braquage) $U_2(s)$ s'écrit :

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

Où K_ω et τ_ω sont respectivement le gain statique et la constante de temps en rotation dont les valeurs ont également été identifiées par la suite.

Le second module concerne la cinématique du tracteur remorque dont les paramètres géométriques et les variables sont définis sur la figure suivante :

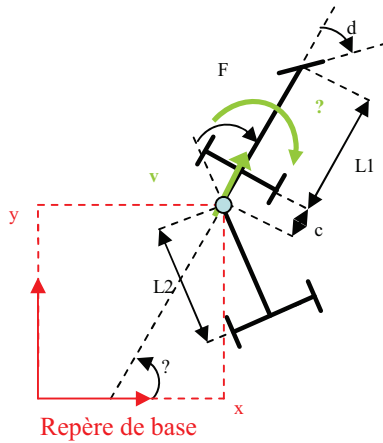


Figure 4: schéma et paramètres du tracteur remorque

Les variables temporelles de notre tracteur remorque définies sur la figure 4 sont :

- l'abscisse et l'ordonnée $x(t)$ et $y(t)$ d'un point guide du tracteur par rapport à un repère fixe
- la vitesse linéaire du tracteur $v(t)$
- la vitesse angulaire du tracteur $\omega(t)$
- l'angle entre le repère fixe et le tracteur $\theta(t)$ (orientation du véhicule)
- l'angle entre l'axe longitudinal et la (ou les) roue(s) avant(s) du véhicule $\delta(t)$ (angle de braquage du véhicule).

- l'angle entre le tracteur et la remorque $\phi(t)$

Ces paramètres sont :

- la longueur du tracteur L_1
- la longueur de la remorque L_2
- la distance du point d'attache de la remorque aux roues arrières du véhicule c

Ainsi les équations cinématiques du tracteur remorque s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{\sin(\phi)}{L_2} & -\frac{L_2 + c \cdot \cos(\phi)}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}$$

III.2. Identification du système asservi

Les valeurs des constantes géométriques du véhicule L_1, L_2 et c ont été déterminées par mesure directe. Nous avons mesuré $L_1 = 0.4m$, $c = 0.2m$ et pris $L_2 = 0.4m$ la longueur de la remorque étant réglable. Les valeurs des gains et des constantes de temps du véhicule ont été déterminées en boucle ouverte en appliquant des échelons de tension en entrée des moteurs. Les essais en translation ont été effectués avec le véhicule composé du tracteur et de la remorque. Les essais en rotation ont été effectués sur le tracteur seulement, le robot tournant alors sur lui-même. Nous avons estimé en première approximation que nous pouvions négliger l'influence de la remorque dans un tel mouvement. Pour ces essais et dans toute la suite de l'étude, la période d'échantillonnage est de 1ms.

En plus de permettre l'identification des paramètres, ces essais montrent deux choses. Premièrement, les valeurs des gains et des constantes de temps des fonctions de transfert des moteurs dépendent des commandes en tension. A très basse vitesse les forces de frottement semblent avoir une plus grande influence relativement à la force de propulsion engendrée par les moteurs. Par ailleurs, les forces de frottement ont une plus grande influence en translation qu'en rotation. Deuxièmement, comme les moteurs du robot ne sont pas strictement identiques, une même tension appliquée sur chacun d'eux n'induit pas forcément un mouvement rectiligne. Sur une distance de 7m nous obtenons une déviation de l'ordre de 50cm.

Comme nous ne disposons pas encore de système de navigation, les conditions initiales du véhicule sont ajustées au jugé et au mieux. Nous considérons que le régime transitoire est atteint quand la vitesse se stabilise dans un intervalle de $[0, 0.1]$ m/s. Par la méthode graphique, nous avons déterminé les constantes de vitesse linéaire pour une commande en tension de $+10V$ $+10V$, on obtient les valeurs:

$$K_v = 0.046 V.m/s$$

$$\tau_v = 0.87s$$

Pour une commande de +15V +15V, on obtient les valeurs :

$$K_v = 0.054 V.m/s$$

$$\tau_v = 0.92s$$

Nous avons finalement choisi comme paramètres des valeurs moyennes :

$$K_v = 0.05 V.m/s$$

$$\tau_v = 0.9s$$

Sur la figure 5, on peut voir que les résultats de simulation correspondent bien à l'expérience pour la plage de vitesse qui sera utilisé par la suite. De la même manière nous avons déterminé les paramètres de la fonction de transfert en rotation en prenant cette fois des commandes inversées. Nous obtenons les valeurs :

$$K_\omega = 0.25 V.m/s$$

$$\tau_\omega = 0.26s$$

Encore une fois les résultats coïncident avec la simulation comme on peut s'en rendre compte sur la figure 6.

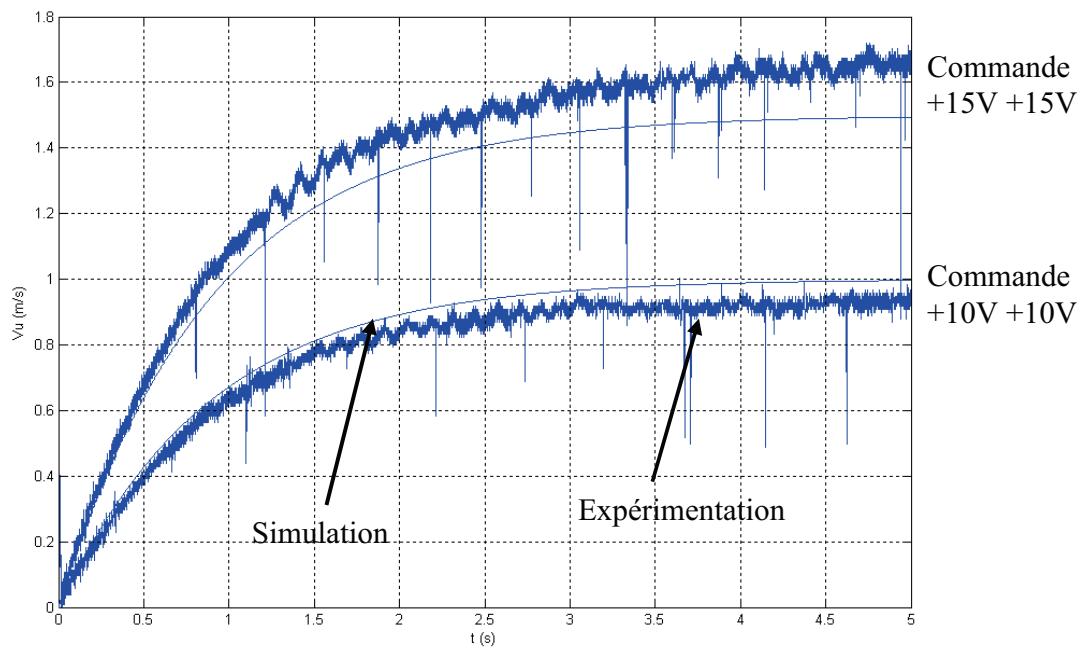


Figure 5 : essais en translation

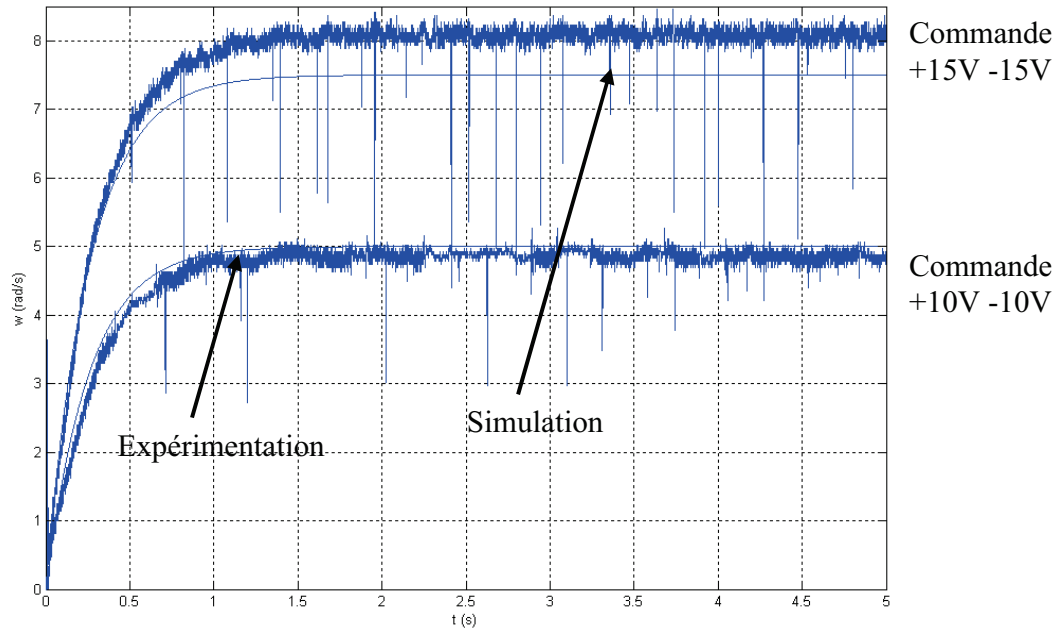


Figure 6: essais en rotation

IV. IMPLANTATION DU CONTROLEUR

Notre schéma de contrôle est le suivant :

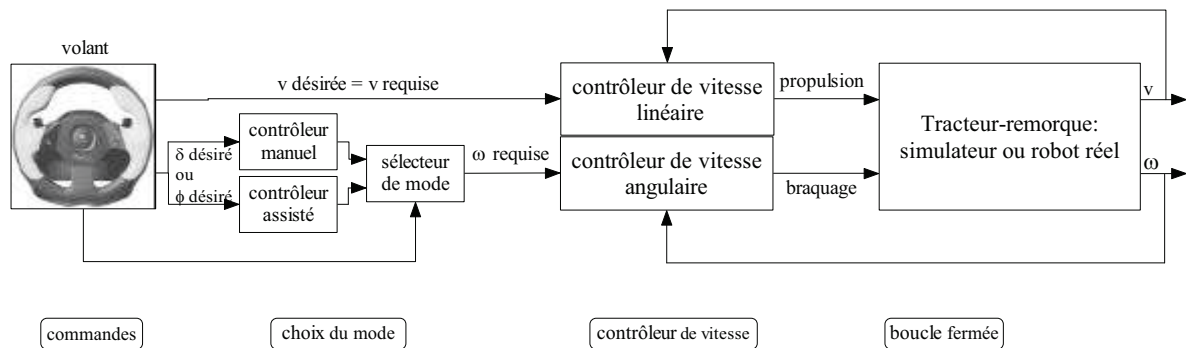


Figure 7: schéma bloc du contrôle en boucle fermée

IV.1. Contrôle manuel

Si l'utilisateur choisit de piloter le robot en mode manuel (le choix se fait au joystick) alors il commande sa vitesse linéaire et son angle de braquage (angle virtuel puisque l'on a à faire à un robot à roues indépendantes). Puis le contrôleur manuel transforme l'angle de braquage désiré δ_{des} en vitesse angulaire requise. Finalement les variables que reçoit le contrôleur de vitesse sont :

$$v^* = v_{des}$$

$$\omega^* = \sigma \cdot \frac{v_{des} \cdot \tan(\delta_{des})}{L_1}$$

ou σ est le signe de v_{des}

Ensuite le contrôleur de vitesse s'assure que les vitesses acquises par le tracteur-remorque convergent bien vers les valeurs désirées. En effet les deux contrôleurs PID-DualLoop permettent d'obtenir les dynamiques désirées en boucle fermée avec une anticipation sur la consigne.

Ce type de contrôle est classique et fonctionne très bien pour un tracteur, le problème est qu'il n'assure pas la stabilité du tracteur remorque en marche arrière. Ainsi on va devoir adopter un autre contrôle.

IV.2. Contrôle assisté

L'utilisateur peut opter pour un contrôle assisté qui va l'aider pour guider le tracteur remorque en marche arrière. Dans ce cas il va toujours commander sa vitesse linéaire mais au lieu de commander l'angle de braquage il va directement commander l'angle entre le tracteur et la remorque. Ainsi en marche arrière il aura l'impression de conduire comme si c'était la remorque qui était devenue le tracteur : c'est le principe du tracteur virtuel. C'est le contrôleur assisté dans ce cas qui va transformer l'angle ϕ_{des} en vitesse angulaire requise. En effet en considérant le contrôle auxiliaire:

$$u^* = \dot{\phi} = -\frac{1}{L_2} (v_{des} \cdot \sin(\phi_{des}) + (c \cdot \cos(\phi_{des}) + L_2) \cdot \omega)$$

Il suffit de poser:

$$u^* = -K_1(\phi_{des} - \phi) - K_2 \int (\phi_{des} - \phi) dt$$

Pour obtenir une dynamique de l'erreur $e = \phi_{des} - \phi$ désirée :

$$\dot{e} + K_p \cdot e + K_i \int e dt = 0$$

Finalement les variables que reçoit le contrôleur de vitesse sont :

$$v^* = v_{des}$$

$$\omega^* = \frac{-L_2}{c \cdot \cos(\phi_{des}) + L_2} \left(u^* + \frac{v_{des} \cdot \sin(\phi_{des})}{L_2} \right)$$

Ce dernier s'assure que les vitesses acquises par le tracteur remorque convergent bien vers les valeurs désirées comme dans le cas du contrôle manuel.

Ce contrôle constitue le cœur du projet et nous allons nous efforcer de démontrer tant par la simulation que par la pratique qu'il est fonctionnel et surtout qu'il permet d'aider le conducteur en marche arrière.

V. SIMULATION ET EXPERIMENTATION

V.1. Comparaison des résultats en simulation et en expérimentation

Nous avons effectué une série d'essais afin de vérifier dans quelle mesure le comportement du robot en simulation correspondait au comportement réel. Rappelons que pour cela, nous faisons tourner deux boucles fermées sur le PC embarqué : une boucle fermée qui contient le robot réel et une boucle fermée qui correspond au système simulé. Ainsi les mêmes commandes sont appliquées au même moment sur le système réel et le système simulé (cf. figure 2).

Le principe est d'envoyer une commande de vitesse longitudinale et un angle de braquage constants au véhicule. Les conditions initiales sont identiques pour tous nos tests : $(x_0, y_0, \theta_0, \phi_0) = (0, 0, 0, 0)$

Essai 1: Suivi d'une ligne droite en marche arrière avec assistance

On peut voir que les résultats expérimentaux se rapprochent beaucoup des résultats de simulation. En expérimentation la trajectoire du point guide de la remorque dévie légèrement par rapport à la trajectoire prévue. Nous avons identifié deux causes à l'origine de cette déviation.

Premièrement, les moteurs du robot ne réagissent pas de la même manière aux tensions appliquées en entrée. Pour corriger cette différence, il faudrait introduire une boucle de correction sur les tensions appliquées aux moteurs en fonction de l'erreur de vitesse de rotation de ces moteurs. Deuxièmement, nous ne disposons pas d'un moyen fiable pour initialiser l'angle phi entre la remorque et le véhicule à 0. Dans le cas d'un angle phi même légèrement différent de 0, le véhicule dévie.

Notons aussi le fait que le véhicule se déplace plus loin en simulation car notre modèle n'intègre pas les forces de frottement.

Guidage assisté par ordinateur d'un tracteur remorque

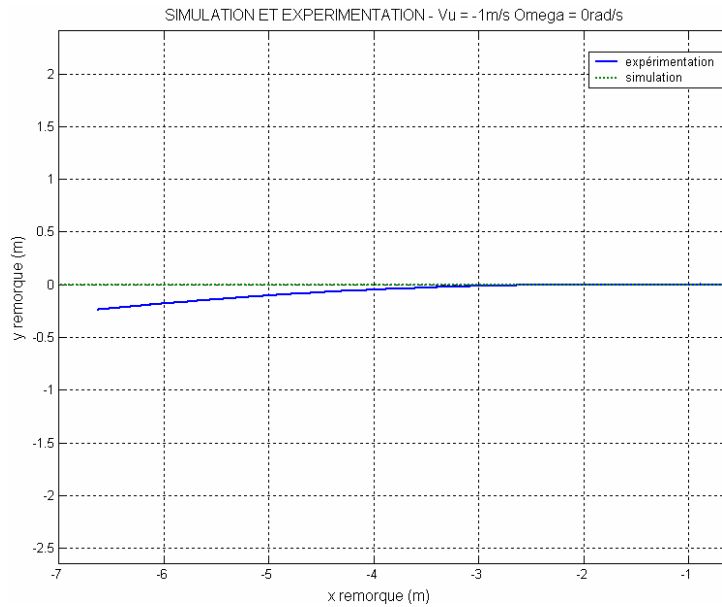


Figure 8: trajectoire du robot pour l'Essai1

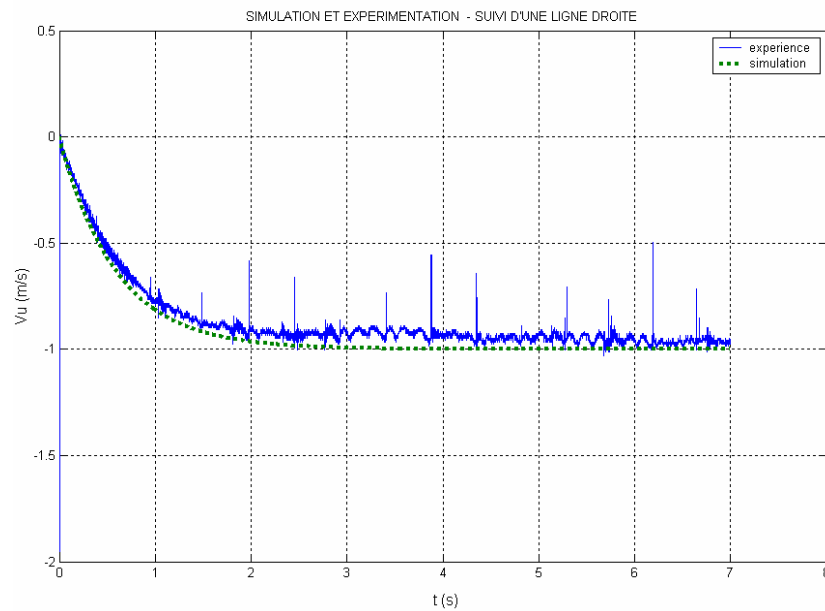


Figure 9: vitesse linéaire du robot pour l'Essai1

Essai 2: Suivi d'un cercle en marche arrière avec assistance

Cet essai a été réalisé en plaçant en consigne d'entrée une consigne de vitesse constante de -1m/s et un angle de braquage lui aussi constant de 35° . Là encore les résultats expérimentaux rejoignent assez bien les résultats de simulation. Il est à noter que les

écarts entre le cercle réel et le cercle simulé sur la figure 10 sont en partie dus aux frottements négligés dans le modèle de simulation ce qui induit une vitesse angulaire réelle plus faible (figure 9) pour les mêmes commandes. On observe alors un cercle réel de rayon plus élevé puisque le robot réel tourne moins vite que le robot simulé.

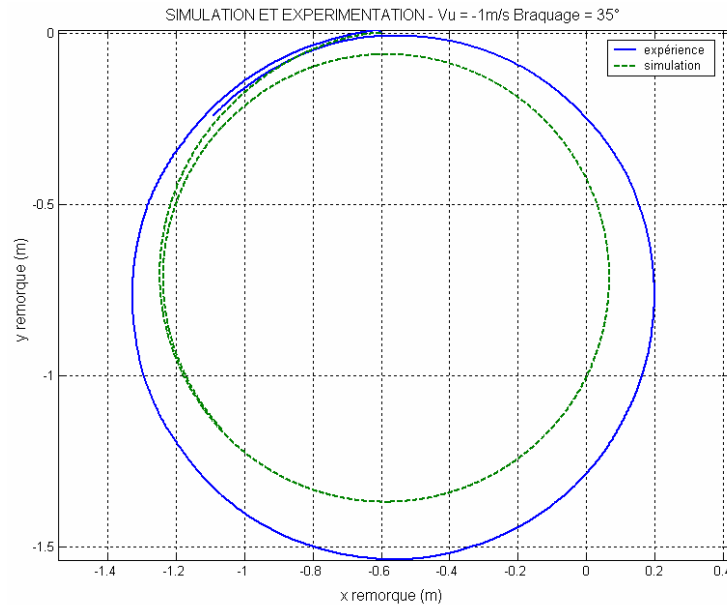


Figure 10: trajectoire du robot pour l'Essai 2

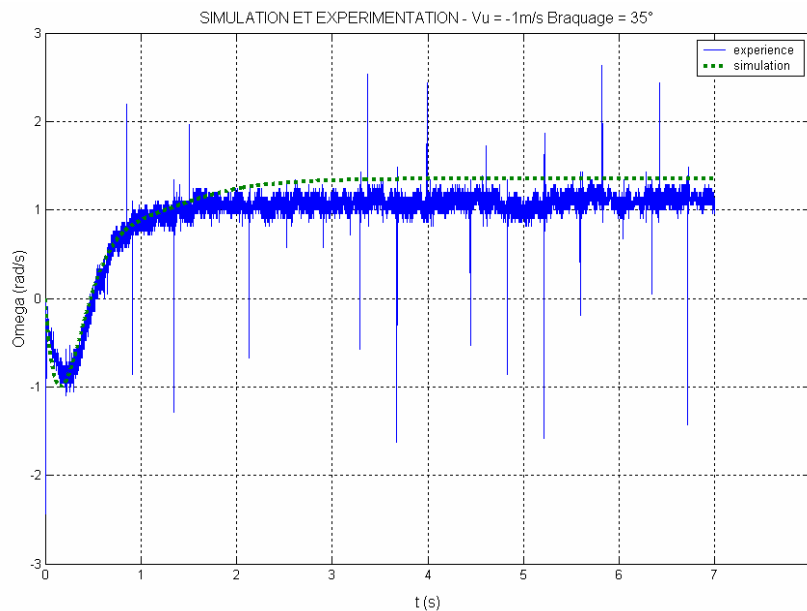


Figure 11: vitesse angulaire du robot pour l'Essai 2

Essai 3: Tâche de garage en marche arrière en mode assisté

Lors de cet essai le véhicule a été conduit avec le volant. L'algorithme d'assistance permet d'avoir une trajectoire formée de droite et d'arc de cercle si l'on tient une certaine consigne de braquage avec le volant. De cette manière on peut obtenir une trajectoire telle que celle représentée à la figure 12. Cet essai est intéressant puisque contrairement aux essais précédents, nous sollicitons plus le système. Il a des variations de vitesse longitudinale et de vitesse de rotation. Ce test se rapproche donc plus du cas pratique.

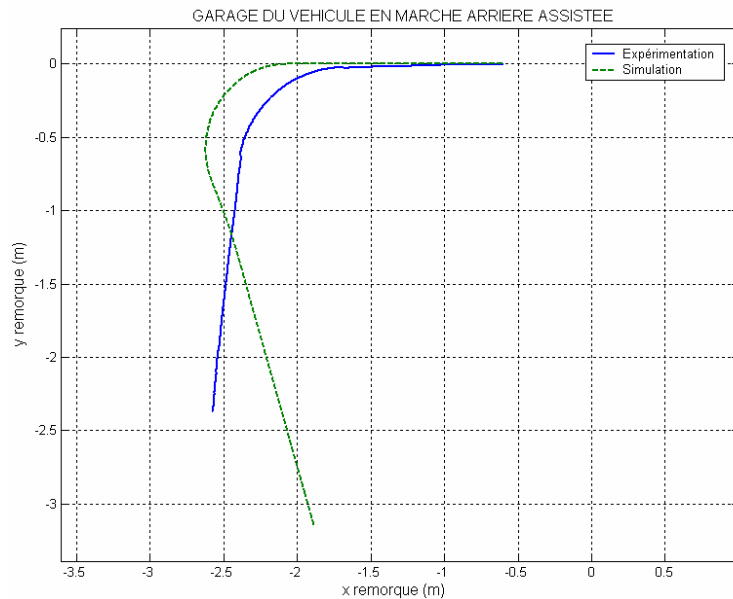


Figure 12: trajectoire du robot pour l'Essai3

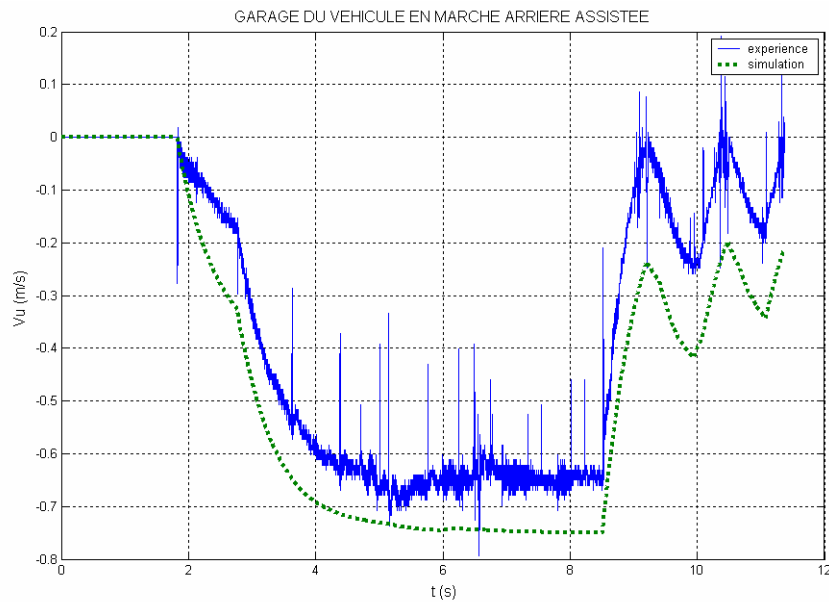


Figure 13: vitesse linéaire du robot pour l'Essai3

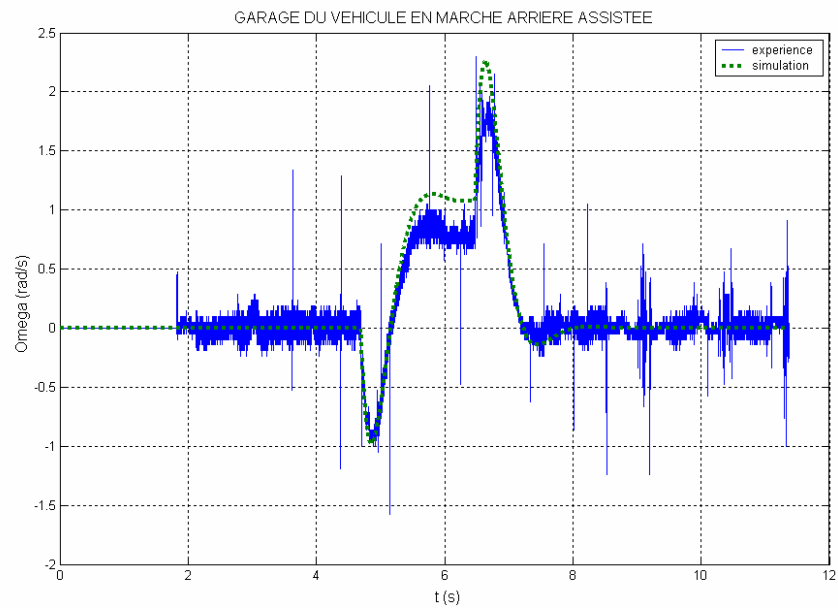


Figure 14: vitesse angulaire du robot pour l'Essai3

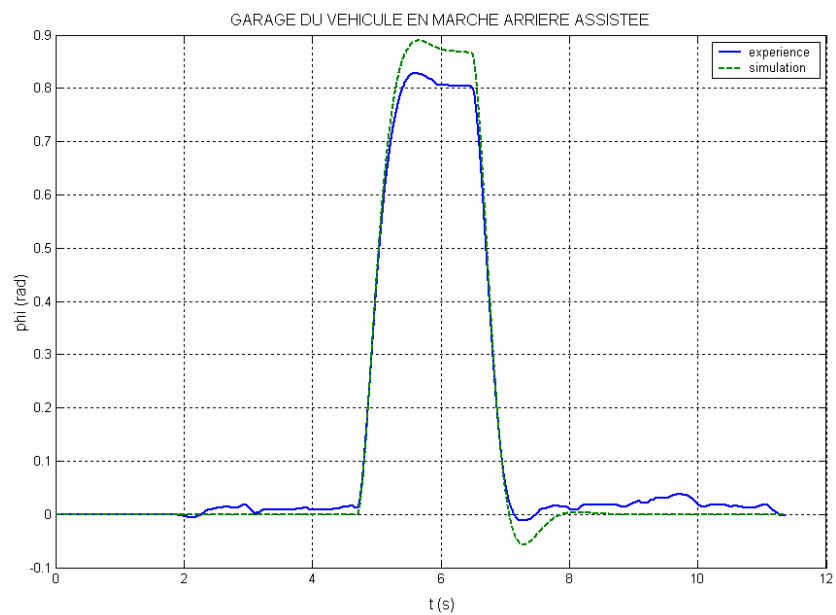


Figure 15: angle phi du robot pour l'Essai 3

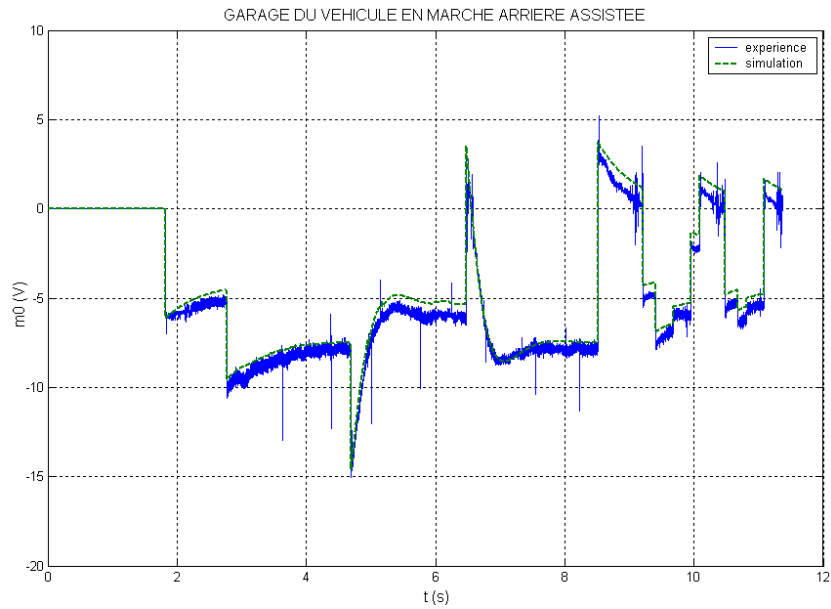


Figure 16: tension du moteur0 du robot pour l'Essai 3

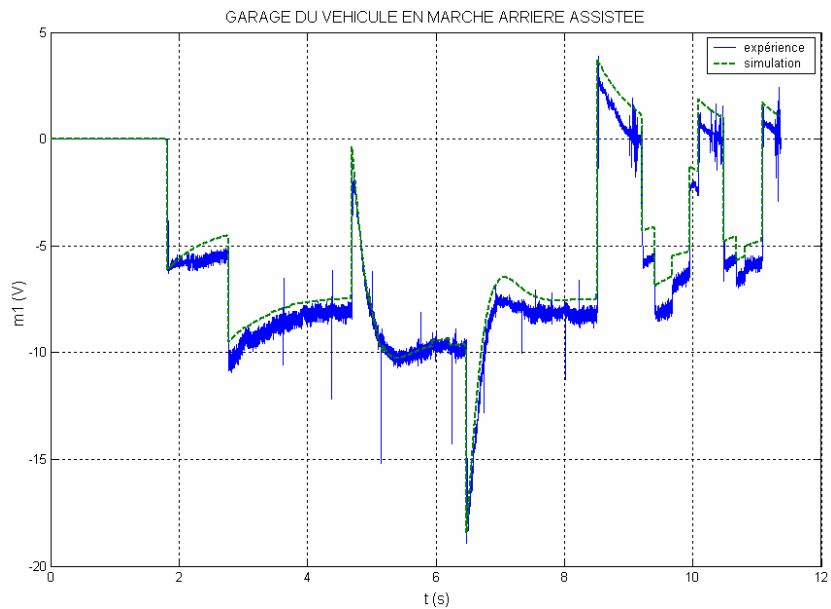


Figure 17: tension du moteur1 du robot pour l'Essai 3

Les courbes des tensions appliquées aux moteurs en simulation et en expérimentation sont très rapprochées. Ainsi dès lors que le modèle diffère du système réel, une action identique pour chacun n'aura pas le même effet. Le système de contrôle ne peut apparemment pas corriger la différence de comportement des moteurs ou des roues (le problème n'a pas été clairement identifié puisque le robot en est encore à ses premiers tests).

V.2 Efficacité du contrôle assisté

Afin de montrer l'efficacité du contrôle assisté par rapport au contrôle manuel nous avons réalisé une série de tests de garage du robot en marche arrière.

Protocole expérimental :

Le but de l'expérience est de garer le robot et sa remorque en marche arrière depuis le départ jusqu'au parking entre les deux chaises comme on peut le voir sur la figure ci-dessous :

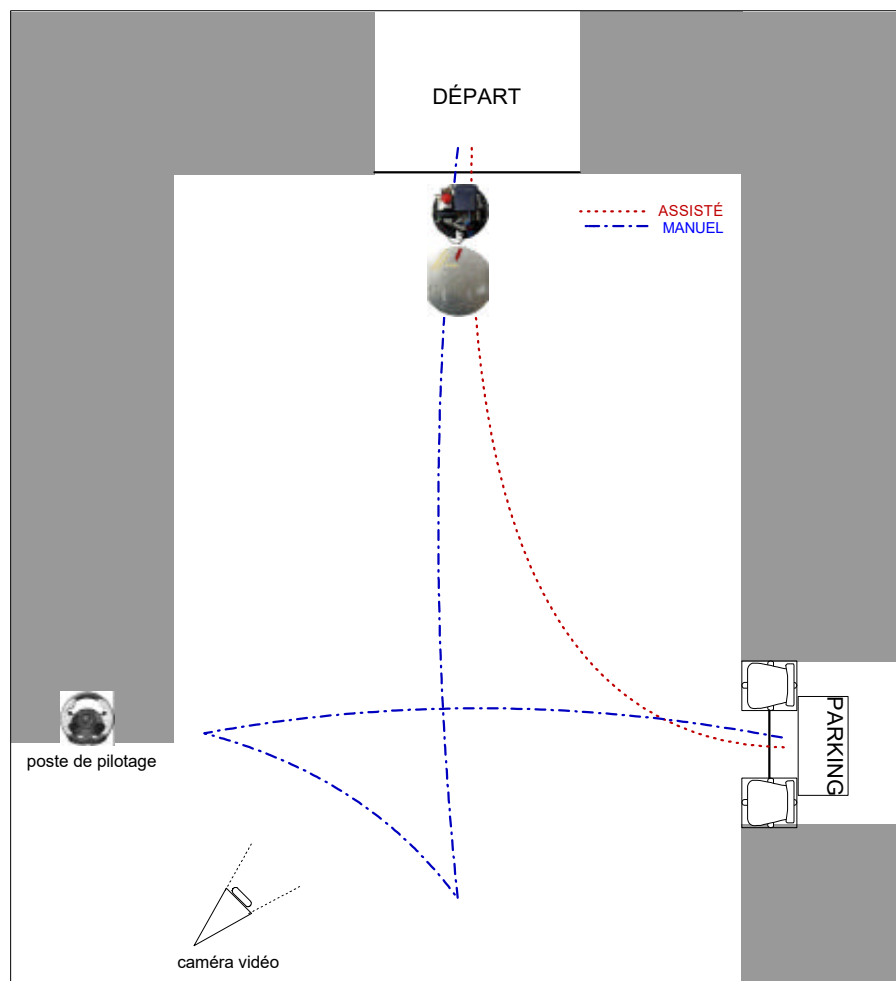


Figure 18: représentation de l'aire de garage

Le poste de pilotage est installé de telle sorte que le pilote puisse aisément voir toute l'aire de garage et on se sert d'une caméra vidéo et d'un chronomètre pour enregistrer toutes les données nécessaires. Le pilote doit réaliser deux manœuvres de garage, l'une en mode manuel et l'autre en mode assisté pour qu'il se rende compte de la différence entre les deux contrôles.

Guidage assisté par ordinateur d'un tracteur remorque



Figure 19 : poste de pilotage



Figure 20 : photo de l'aire de garage

Résultats :

Huit personnes ont participé à notre expérience et à chaque fois nous avons noté le temps de garage et le nombre de manœuvres effectuées, en comptant une manœuvre supplémentaire à chaque fois que le véhicule avance et recule de nouveau. Nous avons regroupé les résultats dans le tableau ci-dessous :

pilote	Avec assistance		Sans assistance	
	Nombres de manœuvres	temps	Nombres de manœuvres	temps
1	1	15s	8	2min08s
2	1	30s	4	1min30s
3	1	13s	6	45s
4	1	9s	5	1min15s
5	1	13s	6	1min43s
6	2	23s	abandon	abandon
7	2	18s	7	1min13s
8	1	11s	5	1min

Figure 21: tableau de résultats

Deux observations ressortent de ce tableau. Tout d'abord il faut en moyenne cinq à six fois plus de temps pour se garer en mode manuel et ensuite il est impossible de se garer en une seule manœuvre en mode manuel alors qu'en mode assisté c'est presque toujours le cas. En effet avec le mode assisté on peut se garer avec une trajectoire courbe en allant assez vite comme on peut le voir sur le schéma de l'aire de parking, tout comme si on allait en avant; les pilotes qui ont mis deux manœuvres pour se garer ont mal visé la zone entre les chaises, ce n'est pas dû à une défaillance du contrôle.

Par contre pour se garer en mode manuel il faut aller beaucoup plus lentement afin de pouvoir contrer efficacement les réactions de la remorque. L'erreur pour certains pilotes a été de vouloir se diriger directement vers le parking car la remorque s'est tout de suite mise de biais. Une des meilleures trajectoires à adopter en mode manuel et représentée sur le schéma de l'aire de parking. En fait il faut s'efforcer de reculer droit puis se réorienter en avançant et enfin reculer en ligne droite vers le parking. Les pilotes qui ont essayé d'adopter cette technique ont se sont garés plus rapidement que les autres.

Conclusion :

Au vu de ces résultats il est clair que le contrôle assisté constitue une aide non négligeable au conducteur de tracteur remorque car il diminue conséquemment le temps de garage et limite le nombre de manœuvres ce qui peut-être pertinent dans un espace restreint. Cette assistance est d'autant plus utile pour les novices en matière de maniement de véhicules articulés.

VI. CONCLUSION

Un système d'assistance à la conduite d'un tracteur remorque, développé en utilisant l'approche récemment proposée dans Bolzern, DeSantis et Locatelli 2001, a été implanté dans un banc d'essai constitué d'un robot mobile développé au sein du Laboratoire d'Automation et Systèmes de L'Ecole Polytechnique de Montréal.

Les résultats autant de simulation qu'expérimentaux que nous avons obtenus ont permis de : 1) valider l'efficacité pratique de l'approche théorique adopté ; 2) démontrer l'utilité du système de conduite assistée par ordinateur dans l'exécution de tâches de stationnement d'un tracteur remorque.

La validation expérimentale a été conclusive au dépit de la présence d'écarts importants entre le comportement du véhicule physique et le comportement du modèle mathématique utilisé pour la conception du contrôleur. Ces écarts, dus surtout à la présence dans le robot d'un fort frottement dans les roues ainsi que d'asymétries notables autant au niveau des moteurs que des roues, n'ont pas empêché d'établir d'une façon claire la supériorité du contrôle assisté par rapport au contrôle manuel lors des manœuvres de stationnement en marche arrière avec remorque.

Bibliographie

1. Anonymous 2001, Saphira Manual, ActivMedia Robotics. Anonymous 2003, xPC Target manual, MathWorks, Inc.
2. Anonymous 2003, xPC Target manual, MathWorks, Inc.
3. 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 '01, vol. 123, N.3, p.309-316).
4. Demers-Roy, C., Conception matérielle et logicielle d'un robot mobile destine au prototypage rapide d'algorithmes de commande, Rapport interne du Laboratoire d'Automation et Systèmes, École Polytechnique de Montréal, juin 2003 (22 pages).
5. De Santis, R.M., Modeling and Path-Tracking for a Load-Haul-Dump Vehicle, **Trans of the ASME J. of Dynamic Systems Measurement and Control**, Vol. 119, march '97, pp. 110-118.
6. DeSantis, R.M., Path-Tracking for a Tractor-Trailer-Like Robot, **Int. Journal of Robotic Research**, Vol.13, n.6, Dec '94, pp. 533-544).
7. De Santis,R.M., Benon, L., Hurteau, R., Gressani,L., Exécution Autonome de la Part d'un Tracteur-Remorque de Manœuvres Circulaires ou Rectilignes, **3^{ième} Conférence Internationale sur l'Automatisation Industrielle**, Montréal, Juin 1999
8. De Santis, R.M., Hurteau, R., Leroy, J., Asservissement en Parcours d'un Tracteur-Remorque : Une Étude Comparative de Différents Contrôleurs, **3^{ième} Conférence Internationale sur l'Automatisation Industrielle**, Montréal, Juin 1999
9. DeSantis, R.M., Hurteau, R., Alboui, O., Lesot, B., 2002, Experimental Stabilization of Tractor and Tractor-Trailer Like Vehicles, **Proc. of the IEEE ISICO2**, Vancouver, Oct 27-30, 2002, pp.188-193.
10. DeSantis, R.M., Bourgeot, J.M., Todeschi, J.N., Hurteau, 2002, Path-Tracking for Tractor-Trailers with Hitching of Both the On-Axle and the Off-Axle Kind, **Proc. Of the IEEE ISICO2**, Vancouver, Oct 27-30, 2002, pp. 206-211.
11. Perrinot, O., DeSantis, R.M., Dumaine, M., Hurteau, R., **Odometry and DGPS Integrated Navigation for Ground Vehicles**, Int. Conference on Field and Service Robotics, Helsinki University of technology, **June 2001**.

ANNEXE : Une courte analyse du problème de déviation du robot pour une trajectoire rectiligne

Au cours des expériences, nous avons remarqué que même en boucle fermée le véhicule ne pouvait suivre une trajectoire en ligne droite avec une consigne de braquage nulle et une vitesse de l'ordre de 1m/s. Le véhicule déviait de sa trajectoire à raison de 50cm sur une distance de 7m. Rappelons que notre boucle fermée était constituée d'un contrôleur PID sur la vitesse longitudinale et d'un autre contrôleur PID sur la vitesse de rotation.

Pour une trajectoire en ligne droite, le signal de la vitesse de rotation, en théorie nulle, est très bruité. Dès lors notre contrôleur de vitesse de rotation est incapable de détecter et corriger la légère déviation du robot.

La figure 22 représente la différence des signaux sortant directement des encodeurs du système réel. On peut voir que cette différence ne cesse d'augmenter au cours du trajet pour arriver, après un parcours de 3.80m, à une différence de 0.5rad soit une quarantaine d'impulsions. Pour corriger la déviation, c'est certainement à ce niveau qu'il faudrait agir, par exemple en plaçant un correcteur sur l'erreur entre la différence réelle et la différence attendue des positions angulaires des encodeurs.

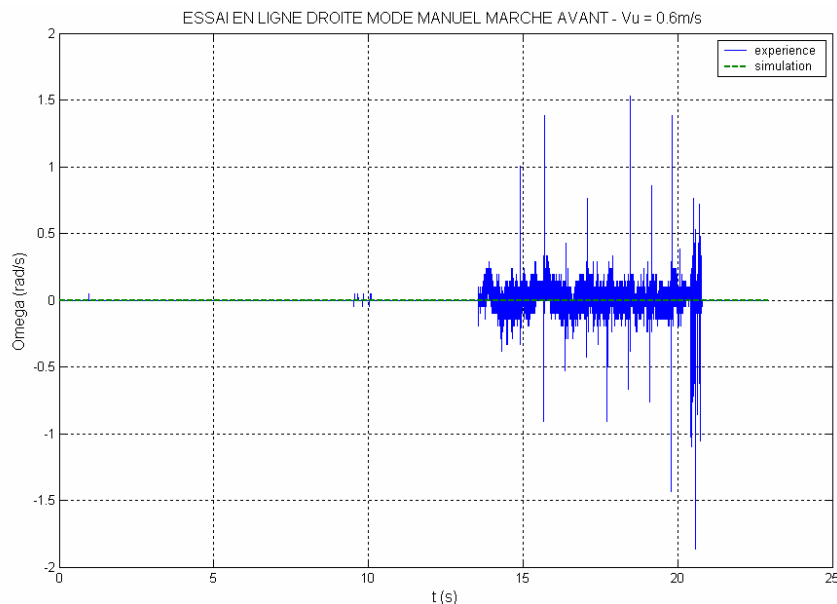


Figure 22: essai en ligne droite, vitesse angulaire bruitée

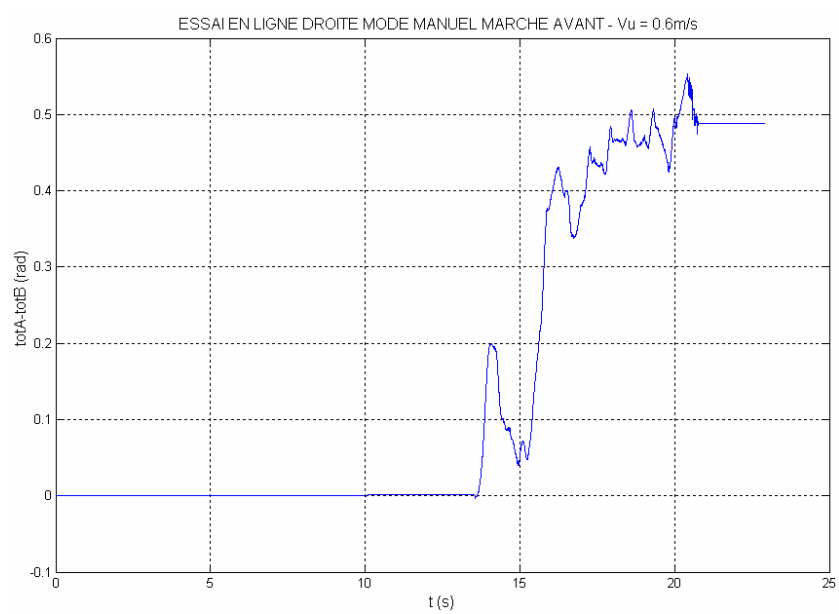


Figure 23: déviation du robot en ligne droite

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

