EPM–RT–2003-14

UN VÉHICULE ROBOTISÉ POUR LE PROTOTYPAGE RAPIDE DE STRATÉGIES DE GUIDAGE INTELLIGENT

Cédric Demers-Roy, Julien Beaudry
Département de Génie électrique
École Polytechnique de Montréal

Novembre 2003

Poly

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

EPM/RT 2003-14

UN VÉHICULE ROBOTISÉ POUR LE PROTOTYPAGE RAPIDE DE STRATÉGIES DE GUIDAGE INTELLIGENT

Cédric Demers-Roy
École Polytechnique de Montréal

Julien Beaudry
École Polytechnique de Montréal

Projet dirigé par

Professeur Romano M. De Santis
Professeur Richard Hurteau
École Polytechnique de Montréal

Novembre 2003

©2003
Julien Beaudry, Cédric Demers-Roy
Romano DeSantis, Richard Hurteau
Tous droits réservés

Dépôt légal :
Bibliothèque nationale du Québec, 2003
Bibliothèque nationale du Canada, 2003

EPM-RT-2003-14
Un véhicule robotisé pour le prototypage rapide de stratégie de guidage intelligent
par : Julien Beaudry et Cédric Demers-Roy
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

Ce travail est la conséquence d'une précieuse collaboration entre les auteurs. Julien Beaudry a contribué surtout au niveau de la mise au point de l'architecture mécanique et électrique du véhicule en effectuant le design de sa géométrie et en choisissant l'ensemble des composantes électriques du véhicule (batteries, moteurs, carte d'alimentation). Cédric Demers-Roy s'est chargé de l'architecture informatique, de la mise en opération et de la validation de l'ensemble du système sous sa structure telle qu'elle est présentée dans ce rapport. Un grand merci est dû aux étudiants membres de SAE Robotique qui ont travaillé sur la conception et le test de SpinoS, le véhicule sur lequel est basé celui dont il est question dans ce rapport. Merci également aux techniciens de la Section Automation et Systèmes, Marie-Lyne Brisson (informatique) et Richard Grenier (mécanique et électrique), dont la collaboration a été essentielle à la réalisation du projet.

UN VÉHICULE ROBOTISÉ POUR LE PROTOTYPAGE RAPIDE DE STRATÉGIES DE GUIDAGE INTELLIGENT

Cédric Demers-Roy, Étudiant à la maîtrise

Julien Beaudry, Étudiant à la maîtrise

École Polytechnique de Montréal
Laboratoire d'Automation et Systèmes
2900, boul. Édouard-Montpetit, CP 6069, Succ. Centre-Ville
Montréal, Québec, Canada, H3C 3A7

Sommaire

Ce rapport décrit un véhicule mis en place au sein de la section Automation et Systèmes pour appuyer nos recherches sur les systèmes de guidage avancés. Ce véhicule est caractérisé par un module de locomotion électrique à courant continu avec traction indépendante sur les deux roues motrices. Il est également équipé d'un ordinateur embarqué dont l'opération en temps réel est centrée sur les progiciels Matlab, Simulink et XPC target. Son instrumentation d'ensemble (senseurs, module de communication sans fil, amplificateurs et unités électroniques de traitement) est conçue pour permettre une exploration rapide et efficace d'une grande variété de stratégies de contrôle qui ont récemment été proposées par la littérature scientifique dans le cadre des systèmes de guidage avancés.

UN VÉHICULE ROBOTISÉ POUR LE PROTOTYPAGE RAPIDE DE STRATÉGIES DE GUIDAGE INTELLIGENT

Cédric Demers-Roy, Étudiant à la maîtrise

Julien Beaudry, Étudiant à la maîtrise

Table des matières

Remerciements 1
Sommaire 2
I- Introduction 4
II- Structure matérielle 6
III- Structure opérationnelle 8
III- Structure informatique 9
IV- Modélisation 12
V- Évaluation expérimentale du comportement non modelé 19
5.1) Inter couplement entre les boucles de contrôle des vitesses linéaire et angulaire 19
5.2) Zone morte 19
5.3) Mesure des vitesses 21
VI- Exemple d'application : Guidage assisté d'un tracteur remorque 21
VII- Applications plus complexes 23
VIII- Conclusions 25
Bibliographie 26
ANNEXE I: Liste des symboles 27

Liste des figures

Figure 1 : Aspect physique du véhicule 7
Figure 2 : Une vue d'ensemble 7
Figure 3: Principales composantes..... 8
Figure 4: Structure opérationnelle 9
Figure 5: Interaction entre les ordinateurs hôte et cible..... 11
Figure 6: Code simulink assurant l'échange de données à l'intérieur de la boucle de contrôle des vitesses..... 11
Figure 7: Code assurant l'échange de données entre le PC hôte et le PC cible..... 12
Figure 8 : Modèle du module de locomotion..... 13
Figure 9 : Amplitude de la vitesse linéaire en régime permanent en fonction de l'amplitude d'une commande de propulsion en échelon 15
Figure 10 : Constante de temps de la réponse en vitesse linéaire en fonction de l'amplitude d'une commande en propulsion en échelon 16
Figure 11 : Réponse en vitesse linéaire à une commande de propulsion en échelon : comportement en simulation et comportement expérimental..... 16
Figure 12 : Amplitude de la réponse en régime permanent de la vitesse angulaire en fonction de l'amplitude du signal de commande de braquage en échelon 18
Figure 13 : Constante de temps de la réponse pour la vitesse angulaire en fonction de l'amplitude de la commande de braquage 18
Figure 14: Réponse à un échelon de commande en braquage : relation entre données simulées et expérimentales 18
Figure 15 : Différence de rotation entre les deux roues motrices pour une commande en boucle ouverte de même amplitude envoyée à chaque moteur..... 19
Figure 16 : Influence du frottement lors de commandes avec une faible amplitude 20
Figure 17 : Réponse en vitesse linéaire du véhicule à une commande sinusoïdale de très basse fréquence (expérimentation et simulation)..... 20
Figure 18 : Effet du filtrage sur la qualité du signal de vitesse linéaire..... 21
Figure 19 : Configuration du système pour un guidage assisté d'un tracteur remorque . 22

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres caractéristiques du chariot et des moteurs..... 13
Tableau 2 : Valeurs de la vitesse linéaire en régime permanent et constante de temps, en fonction de l'amplitude d'une commande de propulsion en échelon 15
Tableau 3 : Valeurs de la vitesse angulaire en régime permanent et constante de temps, en fonction de l'amplitude de la commande de braquage en échelon 17
Tableau 4 : Valeurs théoriques et expérimentales pour les paramètres des fonctions de transfert des vitesses en fonction des commandes..... 17
Tableau 5 : Étude comparative d'aspects caractéristiques du véhicule proposé. 24

I- Introduction

Une variété de plus en plus riche de senseurs et de dispositifs de haute technologie (caméras, sonars, ordinateurs embarqués, navigateurs, unités de communication sans fil) est aujourd'hui disponible au sein du système de conduite d'un véhicule de transport routier (automobile, tracteur remorque, véhicules industriels). Cette disponibilité permet d'envisager l'introduction d'une panoplie d'options d'assistance à la conduite. D'une façon routinière et parmi d'autres, on peut penser aux options d'un braquage assisté, d'un maintien automatique de la vitesse de croisière, d'un contrôle automatique de la position latérale, de la planification en temps réel du chemin à parcourir, de la communication satellite bidirectionnelle, ainsi qu'à d'autres options similaires.

Il est à prévoir qu'à l'avenir cette tendance à un guidage de plus en plus intelligent du véhicule ne fera que s'accentuer pour éventuellement aboutir à des possibilités de guidage intelligent considérablement plus poussées que celles aujourd'hui disponibles. À titre d'exemple, on peut penser à une exécution automatique d'une mission complète de voyagement allant des manœuvres de démarrage au départ jusqu'aux manœuvres de stationnement en arrivée. Cette tendance, en partie tributaire des récents progrès technologiques dans le domaine de l'électronique et de l'informatique, est également en partie tributaire des efforts de recherche dans le domaine du contrôle et du traitement du signal qui sont consentis sans relâche, autant dans un contexte industriel que universitaire.

Ces efforts de recherche s'appuient souvent sur l'adoption de véhicules électriques de laboratoire de dimensions réduites, avec une géométrie équivalente à celle du véhicule de transport routier en considération, et convenablement instrumentés à cet effet. La littérature scientifique offre plusieurs exemples de tels véhicules autant dans le cadre d'une fabrication « maison » que d'une fabrication commerciale [1]. Bien qu'il soit important que ces véhicules aient une structure matérielle et informatique à la fois puissante, flexible et clairement documentée, il est en général difficile de rencontrer simultanément ces trois propriétés. Cette difficulté a été expérimentée au sein de notre section Automation et Systèmes où la recherche dans le domaine de la robotique mobile, qui date maintenant d'une quinzaine d'années [2,7,15], a été d'abord centrée sur l'utilisation d'un véhicule « maison » (le robot mobile RONA obtenu en instrumentant le module de locomotion d'une chaise motorisée pour handicapés [2, 3]) et ensuite sur l'utilisation d'un véhicule commercial (le robot mobile Pioneer_2DX de la compagnie ACTIVMEDIA [4-6]).

L'objectif de ce rapport est de décrire un véhicule électrique que nous avons récemment développé au sein de notre groupe afin de surmonter cette difficulté. De par sa structure informatique centrée sur l'utilisation des progiciels Matlab, Simulink et XPC target, ce véhicule hérite de la puissance, de la flexibilité et de la transparence d'opération et de documentation qui sont propres à ces progiciels. De plus, étant construit à partir d'un ensemble de modules disponibles commercialement, la documentation des éléments

constitutifs du véhicule et de son instrumentation peut être facilement retrouvée sur les sites Internet des fournisseurs de ces mêmes modules.

II- Structure matérielle

Les figures 1, 2 donnent une vue d'ensemble de la structure matérielle du véhicule que nous avons mis au point. Tout comme dans les véhicules utilisés dans les développements antérieurs (voir par exemple [4, 5, 7, 8, 9, 11, 15]), il s'agit d'un véhicule caractérisé par un module de locomotion électrique à courant continu avec traction indépendante sur les deux roues motrices. La figure 3 permet d'identifier les composantes électriques, électroniques et informatiques du véhicule.

Pour fins de présentation, ces composantes peuvent être pensées comme regroupées à l'intérieur de cinq modules :

1) **Un chariot** avec une configuration géométrique caractérisée par deux roues motrices au milieu et deux roues folles localisée l'une à l'avant et l'autre à l'arrière (figure 2); le centre de masse est localisé sur l'axe conjuguant les deux roues motrices;
2) **Un module de locomotion** regroupant amplificateurs, moteurs, encodeurs et cartes d'interface (figure 3). En réponse aux tensions de commande appliquées à l'entrée des deux amplificateurs, les moteurs de ce module fournissent la force de propulsion et le couple de braquage nécessaires pour moduler la vitesse linéaire et angulaire du chariot; la sortie de ce module est représentée par les angles de rotation de ses roues motrices.
3) **Un module de contrôle des vitesses** qui produit les tensions nécessaires pour que les vitesses linéaires et angulaires du chariot assument des valeurs désirées. Cette fonction est effectuée au moyen d'un ordinateur embarqué et des cartes d'acquisition/consigne nécessaires pour lire les sorties des encodeurs optiques installés sur le module de locomotion et pour envoyer les tensions de commande aux entrées de l'amplificateur.
4) **Un module d'alimentation** qui fournit les tensions régularisées requises pour le fonctionnement des autres modules (figure 3).
5) **Un module de guidage haut niveau** (contrôleur de 2ème niveau) qui fournit au module de contrôle les valeurs désirées pour les vitesses linéaire et angulaire. Cette fonction est effectuée au moyen d'un ordinateur localisé à l'extérieur du véhicule. Sa configuration précise dépend de l'application particulière en étude.

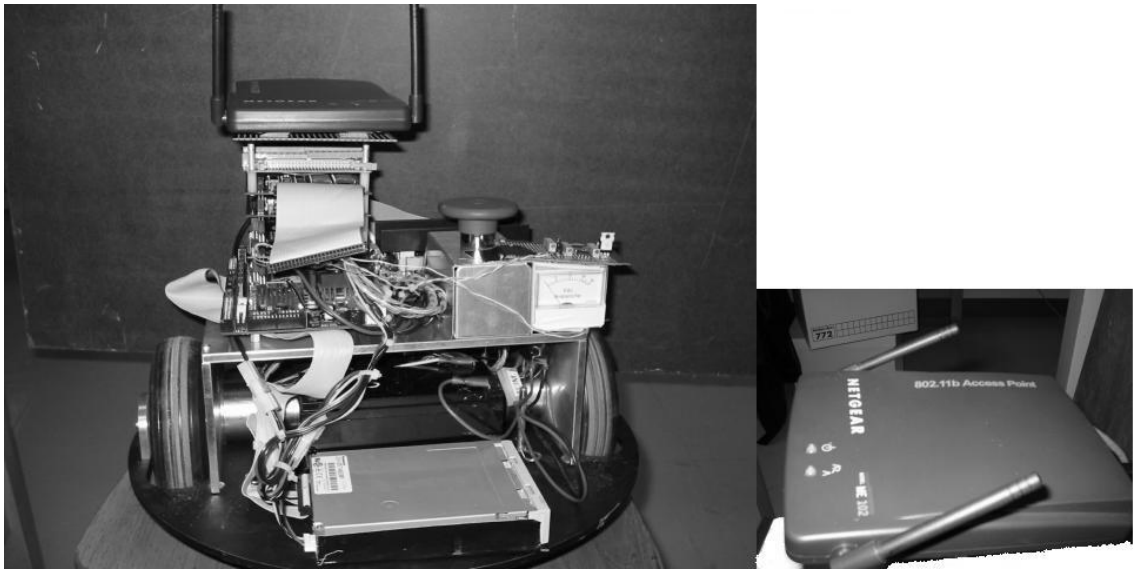

Figure 1 : Aspect physique du véhicule

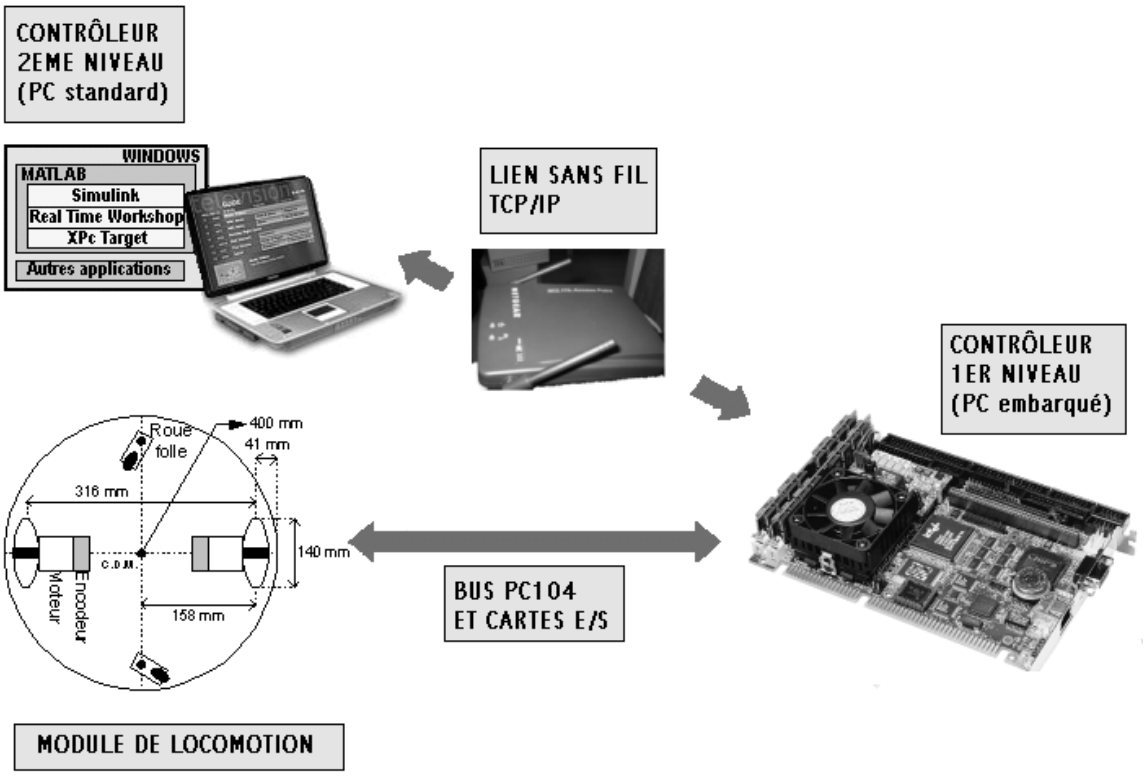

Figure 2 : Une vue d'ensemble

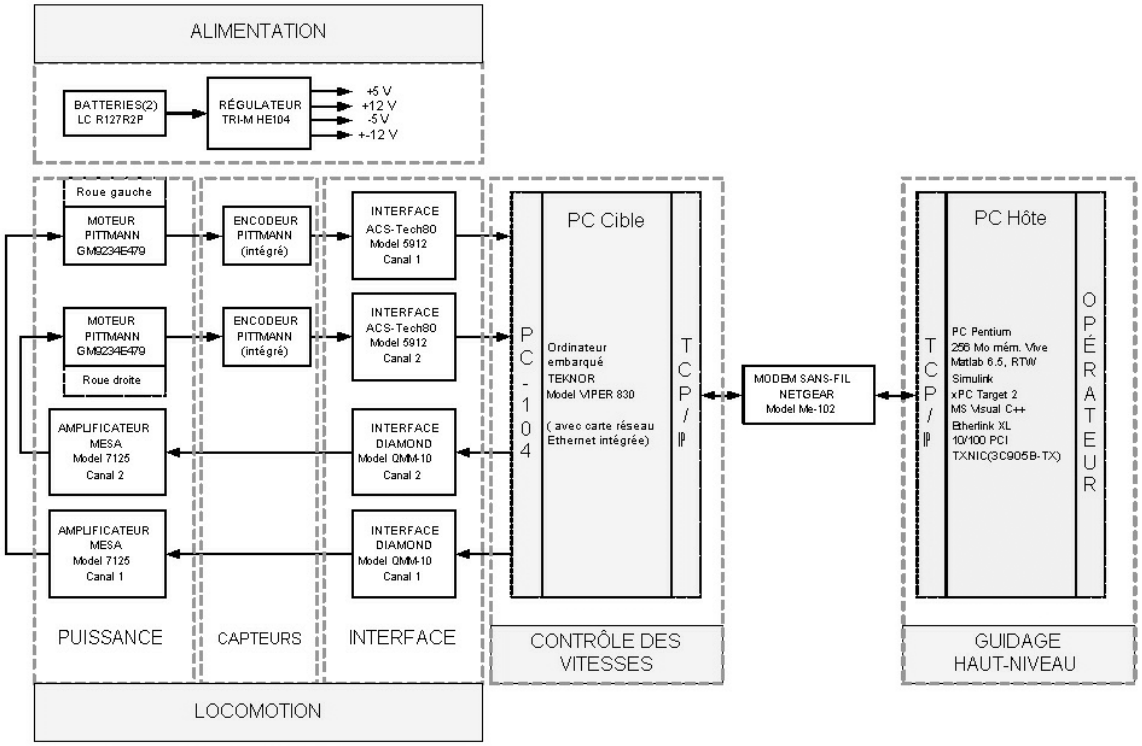

Figure 3: Principales composantes

III- Structure opérationnelle

D'un point de vue opérationnel, le fonctionnement global du système peut être mieux décrit en faisant référence à la figure 4. Un opérateur communique au module de guidage de haut niveau la nature de la mission à accomplir. En fonction de cette mission et de l'état du véhicule, ainsi que de l'état éventuel d'autres éléments entourant le véhicule, ce module détermine et transmet au module de contrôle des vitesses les valeurs désirées pour la vitesse linéaire et angulaire. À son tour, ce dernier module procure au module de locomotion les tensions nécessaires pour que ces vitesses soient effectivement atteintes par le chariot (et donc par l'ensemble du véhicule).

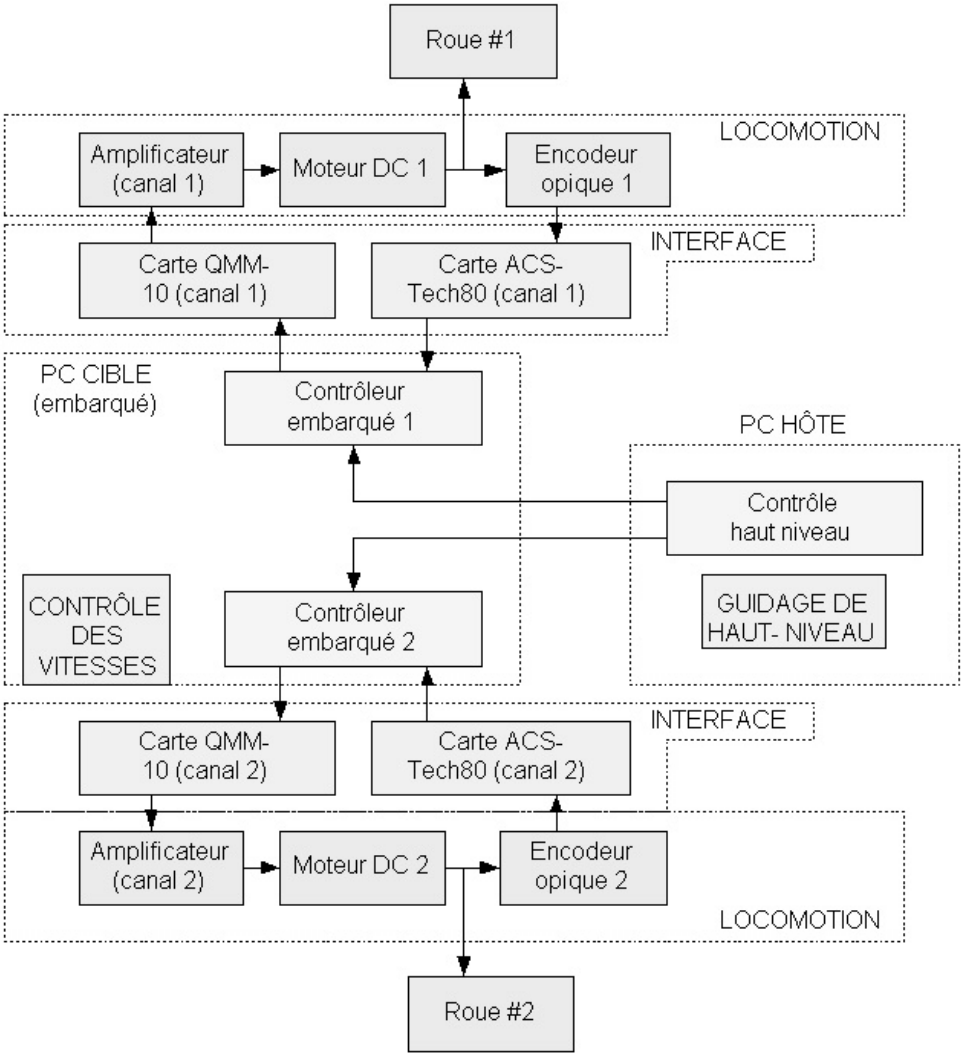

Figure 4: Structure opérationnelle

III- Structure informatique

D'un point de vue informatique, l'instrumentation disponible pour le guidage du véhicule est centrée autour d'un PC localisé à l'extérieur du véhicule, d'un PC embarqué, et du progiciel MatLab-Simulink-xPCTarget [18] (figures 2, 3). Les deux PC sont utilisés dans la configuration hôte-cible qui est propre au progiciel MatLab-Simulink-xPC Target.

Dans le PC localisé à l'extérieur du véhicule (qui joue le rôle de l'hôte) on retrouve le module de guidage « haut niveau ». Ce PC est basé sur un processeur Intel Pentium avec 256 Mo de mémoire vive et il est équipé avec les éléments suivants :

- Matlab 6.5 avec Real Time Workshop [12, 13, 14]
- Simulink

- xPCTarget 2
- Microsoft Visual C++ 6.0
- Carte Ethernet 3 COM Etherlink XL 10/100PCI TX NIC (3C905B-TX)

Dans le PC embarqué (cible) on retrouve le module de contrôle des vitesses. Ce PC est lui aussi basé sur un processeur Intel Pentium avec 256 Mo de mémoire vive, mais dans sa version embarquée (soit plus petit et moins énergétivore). Il est équipé avec les éléments suivants :

- Une carte 5912 de ACS-Tech80 (entrées pour la lecture des encodeurs)
- Une carte QMM-10 de Diamond Systems (sortie PWM pour les commandes de vitesse)
- Une carte Ethernet avec pilote NE2000 (le pilote Ethernet de la cible est important pour xPC Target)
- Une unité de lecture de disque 3”1/2 (avec disque de démarrage spécifique)

La figure 5 illustre les liens de communication entre les deux ordinateurs. Nous complétons la description de cette structure informatique en introduisant les suivantes remarques :

1) La mise au point de l’ensemble du logiciel de contrôle (autant pour le contrôleur de 1er niveau que pour le 2ème niveau) est effectuée sur le PC hôte. La partie logicielle concernant le contrôle des vitesses et l’interaction avec le système contrôlé (supervision, réglage des paramètres) est par la suite transférée dans le PC cible via le lien TCP/IP.
2) Le noyau xPC Target assure un fonctionnement synchrone pour les calculs effectués sur le PC cible, mais pas nécessairement pour l’échange de données entre PC hôte et PC cible.
3) Afin de prévenir que les délais de transmission entre les deux ordinateurs puissent influencer d’une façon imprévisible la dynamique de la boucle et ainsi mettre en danger la stabilité, la boucle fermée pour le contrôle en temps réel du véhicule est entièrement localisée sur le PC cible (contrôle de premier niveau).
4) Durant l’exécution de la commande en temps réel, il y a échange de données entre le PC cible et le PC hôte. La cible envoie des données relatives à l’état du système asservi et l’hôte des données relatives aux valeurs de consigne des variables contrôlées.
5) L’interaction entre le PC hôte et le PC cible est effectuée au moyen du lien sans fil. L’interaction entre le PC cible et le système asservi est effectuée par voie de cartes d’interface appropriées (figures 3, 6).
6) La figure 6 illustre le code Simulink relatif à la lecture des entrées et la consigne de données de la part du contrôleur des vitesses; la figure 7 illustre le code assurant la liaison entre PC hôte et PC cible. La signification des symboles utilisés dans ces figures (ainsi que dans les figures à venir et dans le corps du rapport) est définie dans la liste des symboles donnée en annexe.

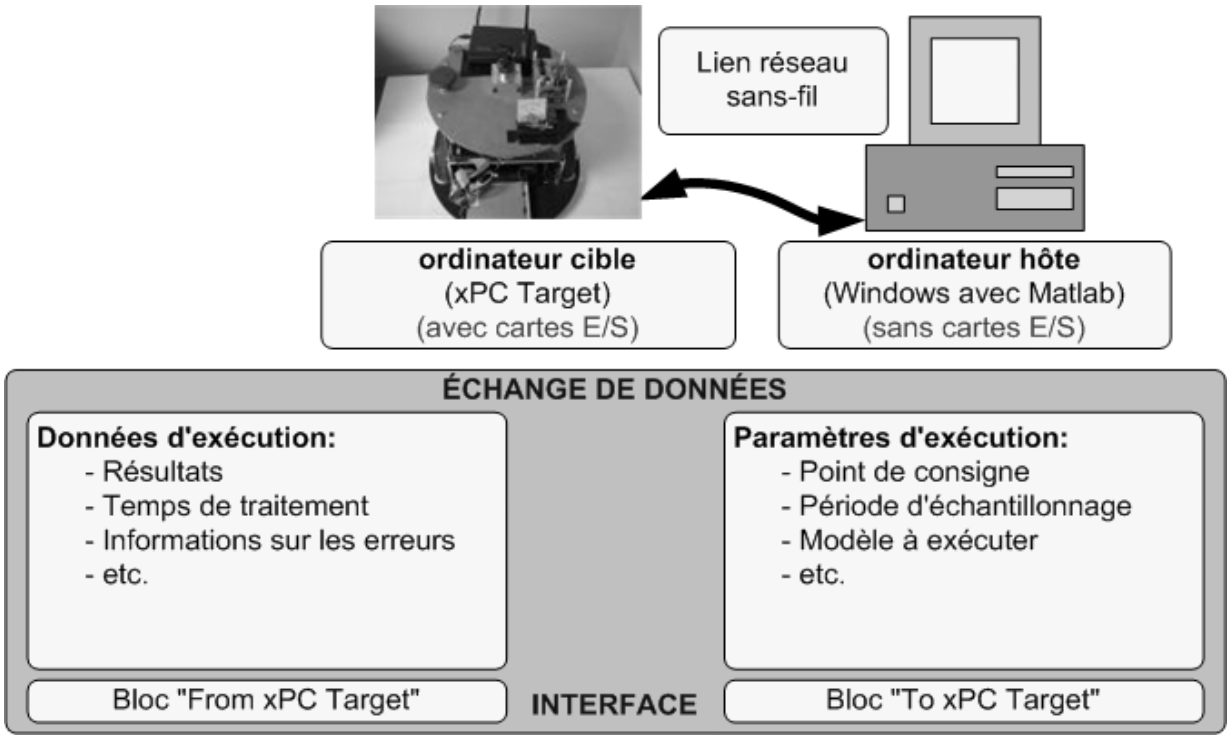

Figure 5: Interaction entre les ordinateurs hôte et cible

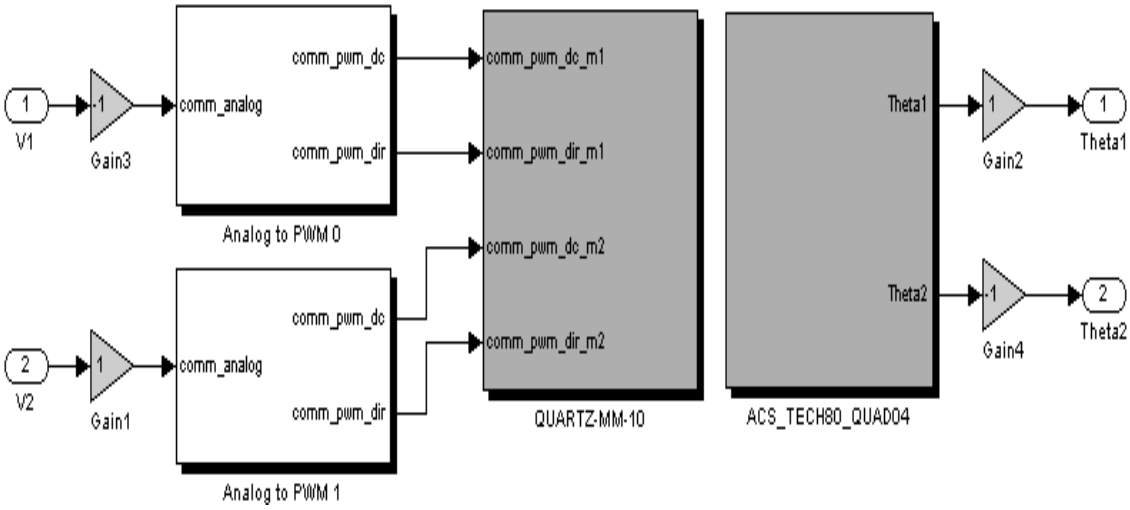

Figure 6: Code simulink assurant l'échange de données à l'intérieur de la boucle de contrôle des vitesses

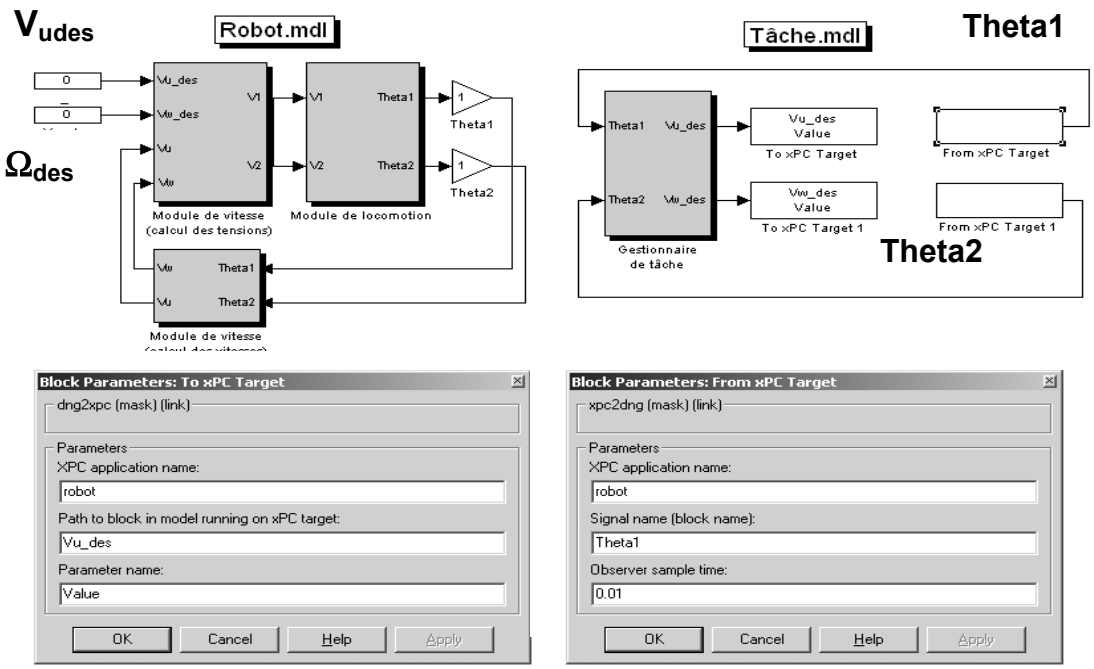

Figure 7: Code assurant l'échange de données entre le PC hôte et le PC cible

IV- Modélisation

Un modèle mathématique pour l'ensemble du module de locomotion du véhicule est développé dans la référence [7]. Ce développement est effectué sous les hypothèses d'absence de glissements latéral et d'une parfaite symétrie longitudinale (autant mécanique qu'électrique) du véhicule. Le modèle qui en résulte est représenté par le schéma bloc de la figure 8.

La valeur des différents paramètres intervenant dans ce schéma dépend des caractéristiques géométriques et mécaniques du véhicule ainsi que des spécifications électriques des moteurs. Ces éléments sont regroupés dans le tableau 1. L'unité de contrôle de premier niveau (pour l'entraînement des vitesses linéaire et angulaire) est constituée de deux contrôleurs PID. La constitution du contrôleur de deuxième niveau dépend quant à elle de l'application spécifique pour laquelle le véhicule sera utilisé.

Les gains K_v et K_Ω , et les constantes de temps, τ_V et τ_Ω caractérisant les deux fonctions de transfert à la figure 8, ont été identifiés en effectuant les deux séries d'essais qui suivent.

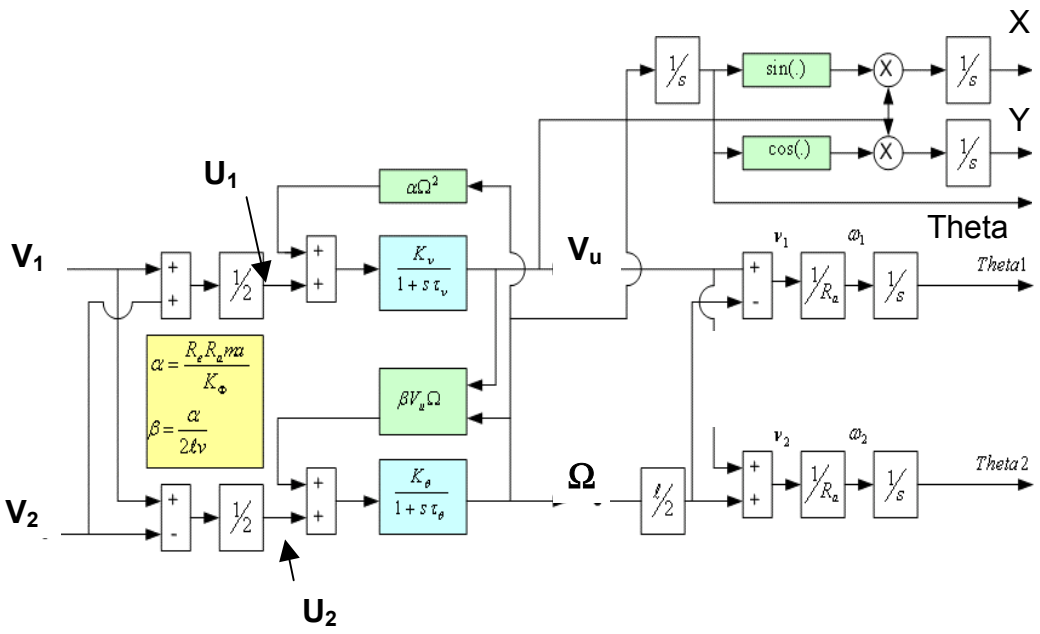

Figure 8 : Modèle du module de locomotion

Tableau 1 : Paramètres caractéristiques du chariot et des moteurs

PARAMÈTRE	SYMBOLE	VALEUR
CHARIOT		
Distance axe des roues – centre de masse	a	0 m
Masse du véhicule	m	15 kg
Distance entre les roues arrière	lv	0.334 m
Rayon des roues motrices	Ra	0.07 m
MOTEURS		
Tension de référence des batteries	E	24 V
Constante de couple	K_Φ	n*0.0459 N.m/A
Constante de force contre électromotrice	K_p	n*0.0459 V/(rad/s)
Résistance interne	R_e	2.49 Ohms
Vitesse maximale sans charge	w_{max}	44.4 rad/s
Couple maximal absolu	T_{PK}	2.10 N.m
Couple maximal en régime continu	T_C	0.43 N.m
Couple de friction	T_F	0.0483 N.m

Coefficient de frottement visqueux	b	2.6×10^{-6} N.m/(rad/s)
Ratio d'engrenage	n	11.5
Résolution de l'encodeur	cnts	500 imp./tour

Série d'essais no 1 : Identification des paramètres concernant la commande en vitesse linéaire

Cette série d'essais est caractérisée par les éléments suivants.

Objectif : déterminer les paramètres de la fonction de transfert liant la commande en propulsion U1 avec la vitesse linéaire Vu du véhicule (gain statique K_v et constante de temps τ_v).

Protocole : application de la part du contrôleur de vitesse d'une commande de propulsion U1 en échelon et enregistrement des valeurs des angles de rotation des roues motrices, Theta1 et Theta2; calcul de la vitesse Vu à partir des angles Theta1 et Theta2. Afin de mieux explorer le comportement non linéaire du système, nous considérons plusieurs valeurs de U1.

Résultats : les résultats se retrouvent aux figures 9, 10 et 11, ainsi que dans le tableau 2.

Discussion : de ces résultats on peut observer que :

1) les valeurs des paramètres les plus aptes à faire que le modèle soit représentatifs des résultats d'un essai spécifique dépendent de l'amplitude de la commande de propulsion, U1 (figures 9, 10)
2) Les valeurs des paramètres les plus compatibles avec l'ensemble des amplitudes de U1 considérées (-24, +24 Volt) sont : K_v=0.098 m/sec*volt, τ_v=0.68 sec .
3) La correspondance entre le comportement expérimental et le comportement prévu par le modèle utilisant ces paramètres est satisfaisante (figure 11).
4) La présence de friction dans les roues fait que ces valeurs diffèrent des valeurs qu'on obtiendrait en utilisant les formules théoriques proposées à la référence [7]. Ces formules sont basées sur les paramètres du moteur et du chariot fournis par le tableau 1. Le tableau 4 permet de comparer les résultats expérimentaux et théoriques obtenus.

Tableau 2 : Valeurs de la vitesse linéaire en régime permanent et constante de temps, en fonction de l'amplitude d'une commande de propulsion en échelon

V1 (Volts)	V2 (Volts)	Amplitude de la réponse en régime permanent (mètres/seconde, résultat expérimental)	Amplitude de la réponse en régime permanent (mètres/seconde, résultat de simulation)	Constante de temps (secondes, résultat expérimental)	Constante de temps (secondes, résultat de simulation)
8	8	0.68724	0.77589	0.647	0.700
10	10	0.92696	0.96996	0.675	0.700
12	12	1.1103	1.1639	0.697	0.700
16	16	1.6223	1.5517	0.635	0.700
20	20	2.105	1.9356	0.659	0.700
24	24	2.3191	2.3279	0.679	0.700
-12	-12	-1.0804	N/D	0.741	N/D
-24	-24	-2.3381	N/D	0.740	N/D

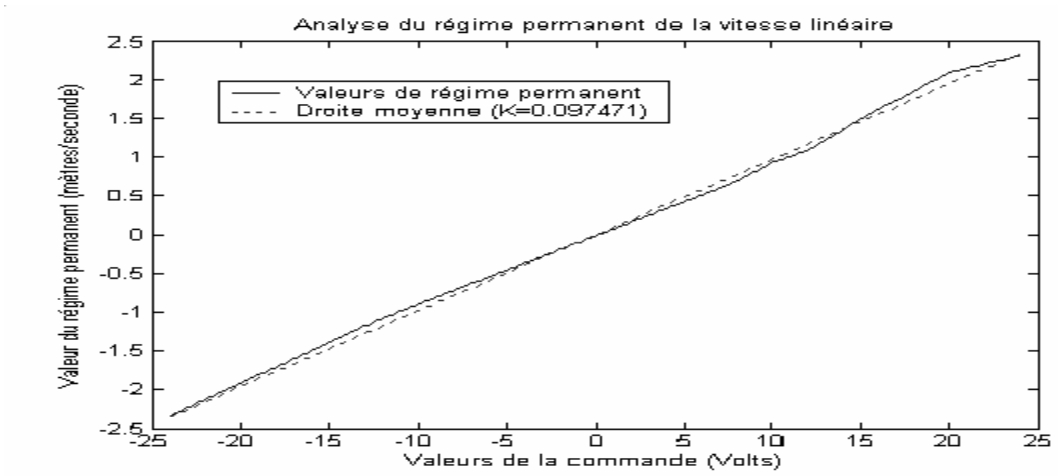

Figure 9 : Amplitude de la vitesse linéaire en régime permanent en fonction de l'amplitude d'une commande de propulsion en échelon

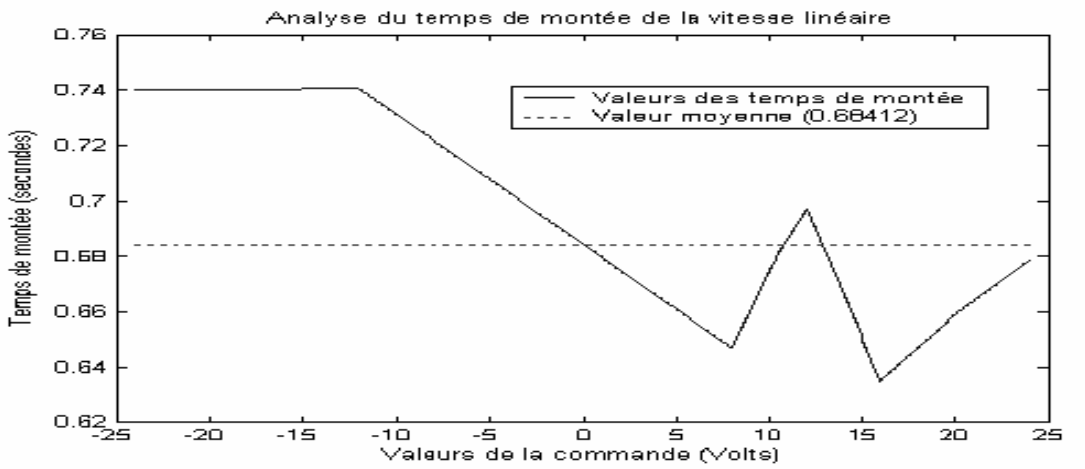

Figure 10 : Constante de temps de la réponse en vitesse linéaire en fonction de l'amplitude d'une commande en propulsion en échelon

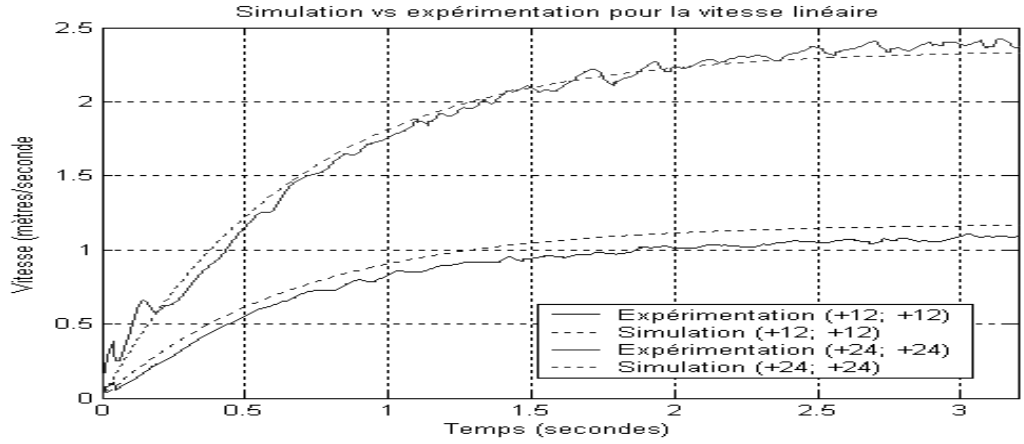

Figure 11 : Réponse en vitesse linéaire à une commande de propulsion en échelon : comportement en simulation et comportement expérimental

Série d'essais no 2 : Identification des paramètres concernant la commande en vitesse angulaire

Objectif : déterminer les paramètres de la fonction de transfert liant la commande en propulsion U2 avec la vitesse angulaire Ω du véhicule (gain statique K_Ω et constante de temps τ_Ω).

Protocole : application de la part du contrôleur de vitesse d'une commande de propulsion U2 en échelon et enregistrement des valeurs des angles de rotation des roues motrices, Theta1 et Theta2; calcul de la vitesse Ω à partir des angles Theta1 et Theta2. Afin d'explorer le comportement non linéaire du système, nous considérons plusieurs valeurs de U2.

Résultats : les résultats se retrouvent aux figures 12, 13, et 14, ainsi que dans le tableau 3.

Discussion : en parfaite conformité avec les observations concernant le cas de la commande de vitesse linéaire, de ces résultats on peut remarquer que :

1) les valeurs des paramètres les plus aptes à modéliser les résultats d'un essai spécifique dépendent de l'amplitude de la commande de braquage, U2 (figures 12, 13)
2) Les valeurs des paramètres les plus compatibles avec l'ensemble des mplitudes de U2 considérées (-24, +24 Volt) sont : K_Ω=0.49 rad/sec*Volt τ_Ω=0.36 sec.
3) La correspondance entre le comportement expérimental et le comportement prévu par le modèle utilisant ces paramètres est satisfaisante (figure 14).
5) La présence de friction dans les roues fait que ces valeurs diffèrent des valeurs qu'on obtiendrait en utilisant les formules théoriques basées sur les paramètres du moteur et du chariot et proposées à la référence [7]. Le tableau 4 résume les résultats obtenus.

Tableau 3 : Valeurs de la vitesse angulaire en régime permanent et constante de temps, en fonction de l'amplitude de la commande de braquage en échelon

V1 (Volts)	V2 (Volts)	Amplitude de la réponse en régime permanent (radians/seconde, résultat expérimental)	Amplitude de la réponse en régime permanent (radians/seconde, résultat de simulation)	Constante de temps (secondes, résultat expérimental)	Constante de temps (secondes, résultat de simulation)
8	-8	3.1198	3.912	0.335	0.380
10	-10	4.3684	4.89	0.401	0.380
12	-12	5.0077	5.868	0.336	0.380
16	-16	8.0922	7.824	0.350	0.380
20	-20	10.4781	9.78	0.351	0.380
24	-24	11.9032	11.736	0.374	0.380
-12	12	-5.0119	N/D	0.377	N/D
-24	24	-12.0164	N/D	0.375	N/D

Tableau 4 : Valeurs théoriques et expérimentales pour les paramètres des fonctions de transfert des vitesses en fonction des commandes

Paramètre	K_V	τ_V	K_Ω	τ_Ω
Valeur théorique (*2)	0.13	0.66	0.40	0.39
Valeur expérimentale	0.098	0.68	0.49	0.36
Écart absolu	0.032	0.02	0.09	0.03
Écart relatif	33%	3%	22.5%	8%

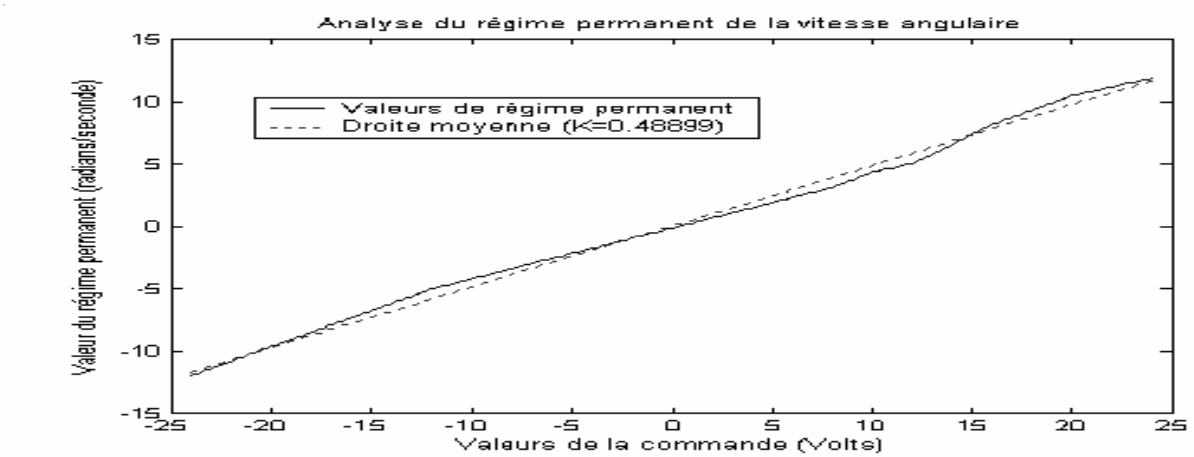

Figure 12 : Amplitude de la réponse en régime permanent de la vitesse angulaire en fonction de l'amplitude du signal de commande de braquage en échelon

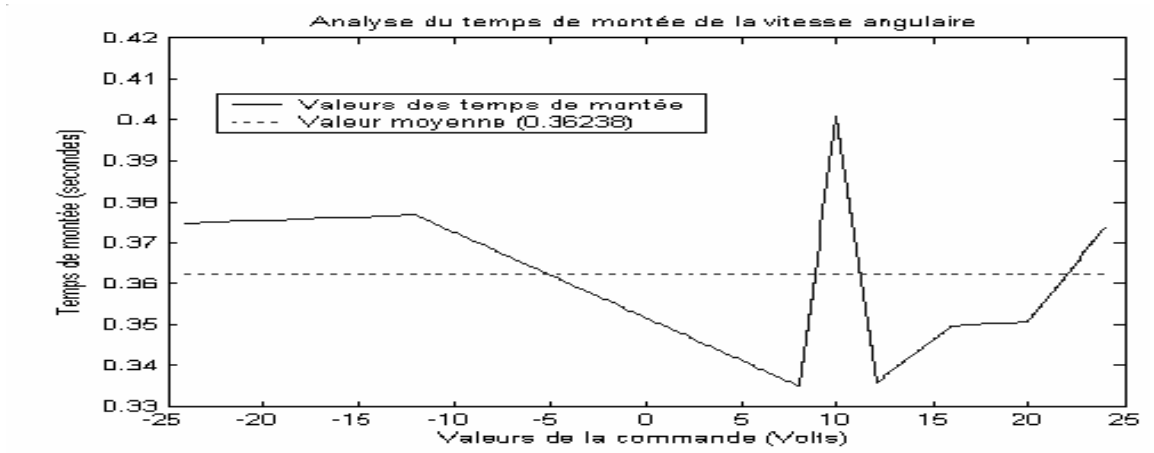

Figure 13 : Constante de temps de la réponse pour la vitesse angulaire en fonction de l'amplitude de la commande de braquage

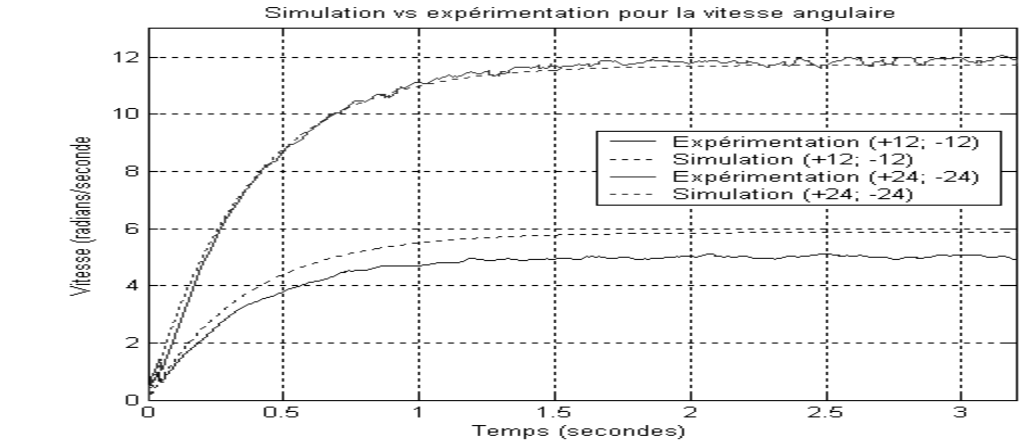

Figure 14: Réponse à un échelon de commande en braquage : relation entre données simulées et expérimentales

V- Évaluation expérimentale du comportement non modelé

L'hypothèse concernant l'existence d'une parfaite symétrie dans la géométrie du chariot et dans les paramètres électriques et mécaniques des moteurs connectés aux deux roue motrices, ainsi que l'hypothèse concernant l'absence de frottement sec et la disponibilité d'une mesure parfaite des vitesses en jeu, ne sont valables que d'une façon approximative.

Parmi les conséquences de cette approximation on doit s'attendre à la présence d'un inter couplement entre les boucles de contrôle des vitesses linéaires et angulaires, à la présence d'une zone morte, et à la nécessité d'introduire un filtrage dans la mesure des vitesses.

5.1) Inter couplement entre les boucles de contrôle des vitesses linéaire et angulaire

La figure 15 illustre qu'une commande de même amplitude appliquée simultanément aux moteurs du chariot ne donne pas exactement la même sortie pour les deux moteurs. Il en suit qu'une commande de propulsion génère une commande de braquage non désirée.

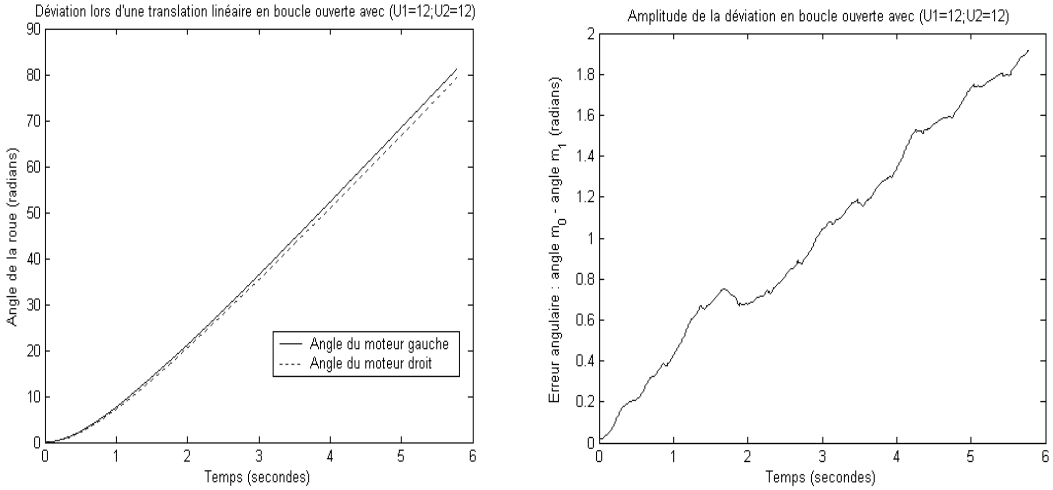

Figure 15 : Différence de rotation entre les deux roues motrices pour une commande en boucle ouverte de même amplitude envoyée à chaque moteur

Bien que cette commande soit relativement faible, elle peut néanmoins occasionner une déviation de position importante lors d'une opération en chaîne ouverte. D'autre part, nos contrôleurs opérant en boucle fermée sur la vitesse, cette déviation sera relativement négligeable dans les applications prévues pour notre véhicule.

5.2) Zone morte

La présence de frottement visqueux, de frottement sec et de frottement de Coulomb rend difficile de déplacer d'une façon prévisible le véhicule lors de l'application de faibles

commandes (figure 16). Afin de mieux mettre en évidence ce phénomène, nous appliquons une commande en translation sinusoïdale de faible amplitude avec une fréquence très faible. La figure 17 montre que, pour une commande sinusoïdale de 5 Volts et de fréquence $2\pi/12$, le véhicule demeure immobile jusqu'aux environs de 1.5 Volts; par la suite, son déplacement demeure plutôt imprévisible sur la base de notre modèle mathématique jusqu'à ce que la commande atteigne un niveau de 4 ou 5 Volts. La courbe en pointillés de la figure 17 illustre le comportement du véhicule obtenu en correspondance au même test effectué par voie de simulation. Il est clair que pour de faibles tensions, le comportement du simulateur ne représente pas celui du véhicule réel. L'ajout d'un module représentant les frictions en simulation permettra de compenser.

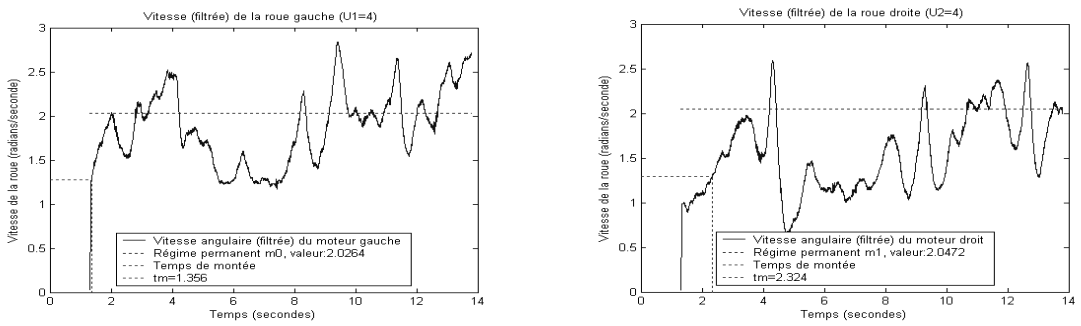

Figure 16 : Influence du frottement lors de commandes avec une faible amplitude

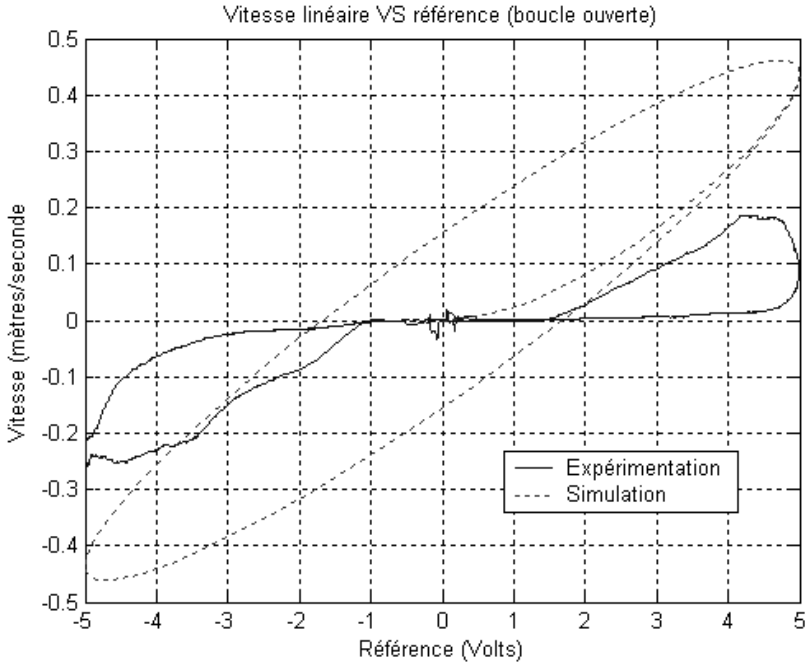

Figure 17 : Réponse en vitesse linéaire du véhicule à une commande sinusoïdale de très basse fréquence (expérimentation et simulation)

5.3) Mesure des vitesses

Les vitesses linéaire et angulaire du chariot sont obtenues à partir d'une estimée de la vitesse des roues motrices. Cette dernière estimée est effectuée sur la base des mesures fournies par les capteurs optiques. Dans une première approche on peut penser d'estimer la vitesse des roues en appliquant la formule

$$\omega_k = \frac{Theta_k - Theta_{k-1}}{T_{ech}}$$

où k est l'instant d'échantillonnage actuel;
k-1 l'instant d'échantillonnage précédent;
Theta mesure de la position angulaire;
ω_k la vitesse angulaire calculée pour l'instant actuel;
T_{ech} temps entre deux lectures du registre associé au capteur.

Le caractère plutôt bruiteux du signal obtenu impose l'utilisation d'un filtre de lissage. L'effet du filtre que nous avons utilisé est illustré par la figure 18.

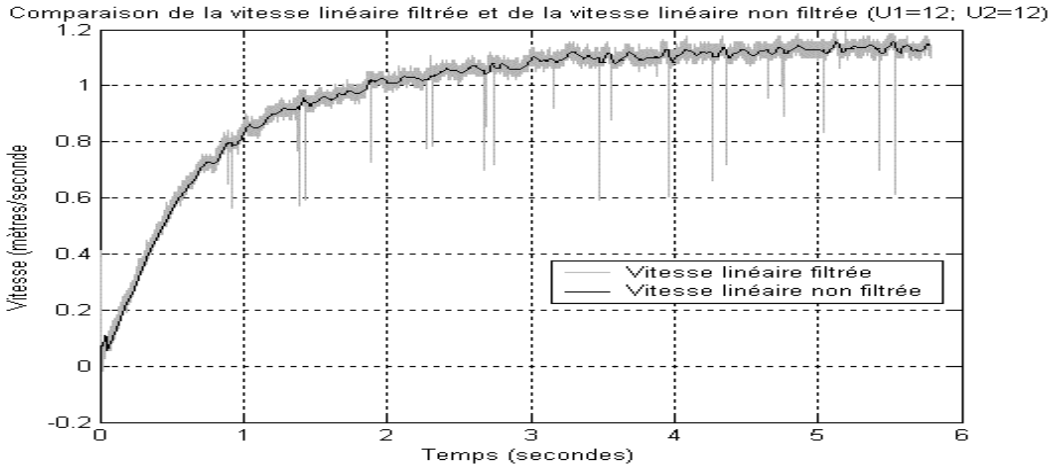

Figure 18 : Effet du filtrage sur la qualité du signal de vitesse linéaire

VI- Exemple d'application : Guidage assisté d'un tracteur remorque

En général, la fonction du module de guidage de haut niveau dépend de l'application en étude. Dans ce qui suit, nous discuterons brièvement la fonction de ce module dans le cas particulier d'une application concernant le guidage assisté d'un tracteur remorque [10].

Dans cette application, le véhicule joue le rôle d'un tracteur auquel est attachée une remorque. Le problème est le développement d'un système de guidage assisté qui vise deux objectifs :

- faire qu'un opérateur puisse téléguider à distance le tracteur remorque;
- faire que l'exécution d'une manoeuvre de marche arrière soit, dans la mesure du possible, aussi aisée que l'exécution d'une manoeuvre de marche avant.

Pour atteindre ces deux objectifs, le module de guidage de haut niveau a la structure illustrée à la figure 19. Les autres composantes du système de guidage sont identiques à celles décrites dans les sections précédentes.

Lors de la marche en avant, le module de guidage de haut niveau permet à l'opérateur de guider le tracteur remorque en donnant comme consigne de vitesse angulaire pour le tracteur une valeur de Ω_des qui est proportionnelle à l'angle de braquage du volant (tout comme un système de braquage assisté conventionnel). Lors de la marche arrière, le module permet à l'opérateur de guider le tracteur remorque en donnant, comme consigne de vitesse angulaire pour le tracteur, une valeur de Ω_des qui fait que la vitesse angulaire de la remorque soit proportionnelle à l'angle de braquage du volant (contrôleur assisté employant le principe d'un « volant virtuel » installé sur la remorque).

Les résultats de cette application ont permis d'établir que dans l'exécution de manoeuvres de marche arrière le guidage assisté constitue une aide non négligeable au conducteur de tracteur remorque. Le temps et le nombre de manoeuvres requis pour l'exécution de taches de stationnement en espace restreint en résultent considérablement diminués. Cette assistance est d'autant plus utile pour les novices en matière de maniement de véhicules articulés. Plus de détails sur cette application peuvent être retrouvés à la référence [10].

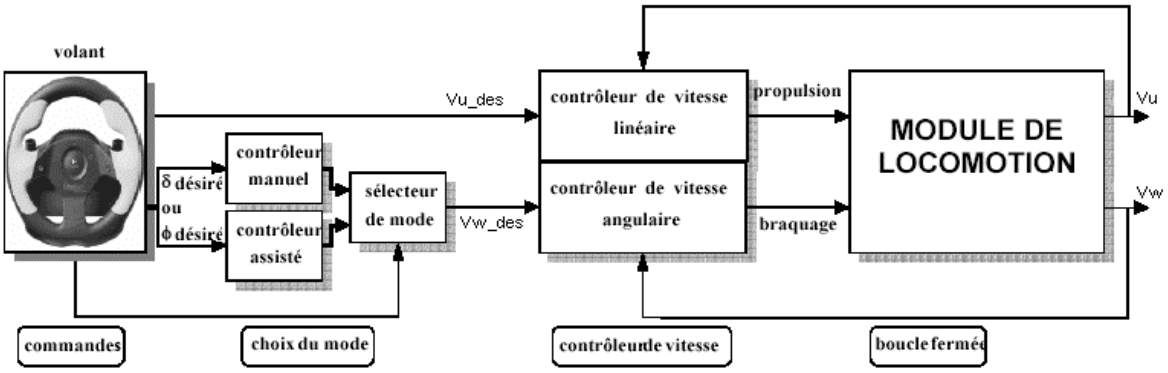

Figure 19 : Configuration du système pour un guidage assisté d'un tracteur remorque

VII- Applications plus complexes

Tel que démontré par l'application présentée à la section précédente, dans son état d'avancement actuel, le système semble se prêter bien à l'étude de systèmes de guidage intelligent de type « simple » tels que: guidage assisté pour la marche arrière d'un tracteur-remorque, suivi en parcours, exécution automatique de manoeuvres de stationnement en espace relativement peu restreint et avec obstacles fixes, etc… Ce système devra cependant être révisée dans le cas d'applications plus complexes telles que l'utilisation de plusieurs véhicules pour des activités concertées ou une exécution automatique de manœuvres de stationnement en espace restreint en présence d'obstacles mobiles.

Un prototype d'application complexe est fourni par la mise en place d'une équipe de robots joueurs capable de participer à la compétition RoboCup [9]. Les modalités de participation et les règles de cette compétition, particulièrement pour la ligue moyenne (« Middle Sized League »), sont disponibles à partir du site de l'organisation. La difficulté de conception et de commande qui doit être considéré est de taille et implique la solution à de nombreux problèmes concernant, entre autre :

- la communication avec un système de vision;
- l'échange d'information entre les robots;
- l'échange d'information avec un serveur de jeu;
- l'application de diverses stratégies de jeu en fonction de la situation.

Le véhicule que nous venons de développer, avec son architecture basée sur xPC Target, possède-t-il le potentiel requis pour prendre le rôle de robot joueur en fournissant la solution à ces problèmes?

En principe, la réponse semblerait affirmative. En donnant accès à tous les outils mis à disposition par Matlab, Simulink, et le langage C++, le progiciel MatLab-xPC Target n'a pas de limitations théoriques évidentes. De plus, n'importe quel ajout aux librairies disponibles est imaginable.

D'autre part, la complexité de l'ajout peut réduire considérablement l'efficacité de l'approche. À titre d'exemples, parmi les difficultés d'ordre pratique à surmonter on peut penser aux efforts requis pour :

i) mettre au point un certain nombre de pilotes maison spécifiques à xPC Target;
ii) programmer les API permettant la communication entre plusieurs véhicules;
iii) rendre fiable la connexion entre le PC hôte et PC cible embarqué sur le véhicule (actuellement elle ne l'est pas totalement).

Une équipe au sein du Laboratoire de Mécatronique de notre École travaille actuellement sur cette problématique en utilisant comme robot jouer un véhicule similaire à celui que nous venons de présenter. Au lieu d'une approche centrée sur MatLab-xPC Target, l'approche adoptée par cette équipe est axée sur la librairie MICROB développée par

l'IREQ [19], le langage C++, et le système d'exploitation Debian Linux. Bien qu'il ne soit pas facile ni prudent de statuer sur ce sujet, le tableau 5 permet de se faire une idée comparative de ce que notre expérience suggère être les avantages / désavantages caractéristiques de ces deux approches dans le cadre spécifique de la mise en place de notre véhicule robotisé.

Tableau 5 : Étude comparative d'aspects caractéristiques du véhicule proposé.

Point de comparaison	Approche MatLab-xPC Target	Approche MICROB
Prix	**Très élevé** Système d'exploitation payant et dépendance face aux produits de Mathwors (Matlab, Simulink, xPC)	**Modéré** Système d'exploitation gratuit et logiciels conçus par le laboratoire directement
Environnement informatique	**Matlab / Simulink** Bénéficie de l'environnement agréable de Matlab et Simulink pour la programmation des modèles et des contrôleurs	**Environnement de programmation C++** Toutes les applications doivent être programmées directement en C++ en se basant sur la librairie MICROB et sur les fonctions d'affichage de Linux
Facilité d'utilisation	**Très simple** Une connaissance de base de Matlab / Simulink est suffisante pour contrôler le véhicule et faire fonctionner les modèles.	**Relativement complexe** Les applications doivent être lancées à la main sur l'invite de commande Linux et des scripts sont nécessaires au fonctionnement des modules.
Rapidité d'exécution	**Très rapide** Le noyau synchrone de xPC Target permet typiquement des périodes d'échantillonnage de l'ordre de 100 µs pour la boucle de commande (contrôleur de premier niveau).	**Modérée** La base de temps de Linux et l'application basée sur MICROB permet typiquement une période d'échantillonnage de l'ordre de 10 ms pour la boucle de commande.
Modalités d'Installation	**Simple** L'intégration xPC / Matlab / Simulink est complète et automatique. Le transfert des applications se fait directement de l'application.	**Plus difficile** Plusieurs éléments distincts (librairie, système d'exploitation) à installer et à configurer les uns par rapport aux autres.

VIII- Conclusions

Le véhicule robotisé que nous avons mis en place est caractérisé par une configuration mécanique et électrique similaires à celles des véhicules robotisés qui ont été jusqu'à date utilisés dans le contexte du prototypage de stratégie de guidage intelligent. Par contre, notre véhicule est également caractérisés par une structure informatique originale qui est centrée sur l'adoption des progiciels Matlab, Simulink et xPC target, ainsi que sur l'utilisation d'éléments périphériques modulaires disponibles commercialement.

Ces caractéristiques font que ce véhicule hérite de la puissance, de la flexibilité et de la transparence d'opération qui sont propres à ces progiciels. De plus, la documentation concernant tous les éléments constitutifs du véhicule et de son instrumentation peut être facilement retrouvée sur les sites Internet des fournisseurs de ces mêmes éléments.

Dans son état d'avancement actuel, le véhicule se prête bien à l'étude de systèmes de guidage intelligent de type « simple » tels que: guidage assisté pour la marche arrière d'un tracteur remorque, suivi en parcours, exécution automatique de manoeuvres de stationnement en espace relativement peu restreint et avec obstacles fixes, etc. Cette actualisation devra cependant être révisée dans le cas d'applications plus complexes telles l'utilisation de plusieurs véhicules pour des activités concertées ou une exécution automatique de manœuvres de stationnement en espace restreint ou en présence d'obstacles mobiles.

Parmi les difficultés d'ordre pratique à surmonter afin d'étendre la complexité des applications envisageables on peut citer :

- la mise au point des pilotes maison spécifiques à xPC Target et aux éléments périphériques qu'il faudrait ajouter;
- la programmation de API permettant la communication entre plusieurs véhicules;
- l'amélioration de la fiabilité de la connexion entre le PC hôte et PC cible embarqué sur le véhicule.

Bibliographie

1. Borenstein, J., Everett, H.R., Feng, L., **Where Am I? Sensors and Methods for Autonomous Mobile Robot Positionning**, ftp.eecs.umich.edu/people/johannb, Univeristy of Michigan, April 1996 (280 pages).
2. De Santis, R.M., Hurteau, R., On the Motion Control of Electric AGVs, **Automazione e Instrumentazione**, vol. 3, mars 1990, p. 137 à 150.
3. Perrinot, O., DeSantis, R.M., Dumaine, M., Hurteau, R., Guennon, R., Odometry and DGPS Integrated Navigation for Ground Vehicles, Int. Conference on Field and Service Robotics, Helsinki University of Technology, June 2001.
4. Anonimous, Saphira Operation Manual, ACTIVMEDIA Robotics, lien Internet 2003, (www.infotech.tu-chemnitz.de/~robotik-ag/dokumente/Saphira.pdf).
5. 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.
6. 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.
7. De Santis, R.M., Modeling and Path-Tracking Control for a Mobile Wheeled Robot with a Differential Drive, **Robotica**, Vol. 13, Sept '95, pp. 401-410.
8. Beaudry, Julien, Projet SpinoS: conception et contrôle d'un robot mobile à vitesses différentielles, École Polytechnique de Montréal, Projet de fin d'études, Montréal, 2001.
9. Anonimous, Site de la compétition internationale Robocup, lien Internet, http://borneo.ais.fraunhofer.de/robocup/msl2003/msl.html (middle size league) et http://www.robocup.org/02.html (site officiel)
10. Demers-Roy, C., Miralles, F., Olivier, J.-F., Guidage assisté par ordinateur d'un tracteur remorque, EPM-RT-2003-08, Montréal, 2003, 27 pages
11. Lesot, Bertrand, Stabilisation d'un tracteur – remorque : étude expérimentale de différents contrôleurs, EPM-RT-2001-03, Montréal, 2003, 26 pages
12. Anonimous, National Instruments Corporation, DAQ 6023E/6024E/6025E User Manual, lien Internet 2003, http://www.ni.com
13. Anonimous, Mathworks, xPC Target User´s Guide, Version 2, lien Internet 2003, http://www.mathworks.com/products/xpctarget
14. Anonimous, Mathworks, Getting Started with xPC Target, Version 2, lien Internet 2003, http://www.mathworks.com/products/xpctarget
15. 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, No 3, pp. 309-316.

16. Rick Bélair, Réalisation d'un contrôleur pour moteur à courant continu, École Polytechnique de Montréal, Projet de fin d'études, Montréal, 1997.
17. Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P., **Power Electronics: Converters, Applications and Design**, Wiley Higher Education, Minnesota, 2003, 824 pp.
18. Anonimous, Mathworks, xPC Target API User's and Reference Guide, 216 pp., Lien Internet 2003, http://www.mathworks.com/products/xpctarget
19. Anonimous, IREQ, Introduction à la librairie MICROB, lien Internet 2003 http://www.robotique.ireq.ca/microb/fr/index.html

ANNEXE I: Liste des symboles

Symbole	Description
Theta1, Theta2	Angles en radians de rotation des roues motrices
w1,w2	Vitesses de rotation en radians/seconde des roues motrices
V1,V2	Tension de commande en Volts pour les moteurs associés aux roues motrices
U1	Commande de propulsion (sans unités réelles, vient du PID)
U2	Commande de braquage (sans unités réelles, vient du PID)
Vu	Vitesse linéaire du véhicule en mètres/secondes
Ω	Vitesse angulaire du véhicule en radians/secondes
Vu_des	Vitesse linéaire désirée en mètres/seconde pour le véhicule
Ω_des	Vitesse angulaire désirée en radians/seconde pour le véhicule
X	Position en X du véhicule (en mètres)
Y	Position en Y du véhicule (en mètres)
Theta	Orientation en radians du véhicule par rapport à l'abscisse (rotation absolue par rapport à son orientation initiale)
K_v (k_v)	Gain statique en (mètres/seconde)/Volt de la fonction de transfert entre la vitesse linéaire et la commande de propulsion
τ_v (tau_v)	Constante de temps en secondes de la fonction de transfert entre la vitesse linéaire et la commande de propulsion
K_Ω (k_w)	Gain statique en (radians/seconde)/Volt de la fonction de transfert entre la vitesse angulaire et la commande de propulsion
τ_Ω (tau_w)	Constante de temps en secondes de la fonction de transfert entre la vitesse angulaire et la commande de propulsion

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

ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL