

Commande floue d'un robot mobile avec remorque

Firas ROUISSI¹, Rafika EL HARABI¹, Saloua BEL HADJ ALI NAOUI¹

¹Unité de Recherche Modélisation, Analyse et Commande des Systèmes (MACS),
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès (ENIG)
Rue Ibn El Khatab, Zrig 6029 Gabès, Tunisie.
Firas.ROUISSI@gmail.com, rafikaharabi@yahoo.fr,
saloua.belhadjali@enit.rnu.tn

Résumé— Dans cet article, est proposée, une stratégie de commande de robots mobiles basée sur l'approche floue pour assurer une navigation stable et précise, atteindre une cible et éviter un obstacle. Cette approche est appliquée à un robot mobile de type voiture avec remorque. Les résultats de simulation sont acceptables, le robot à remorque arrive en fait, à atteindre la cible en évitant parfaitement l'obstacle.

Mots-clés— Logique floue, commande floue, robot mobile avec remorque, problème d'obstacle.

I. INTRODUCTION

Les robots mobiles autonomes sont largement utilisés en industrie, surtout dans des milieux où la présence humaine a un aspect dangereux telle que les stations nucléaires, les mines et les industries à production chimique. Vu que les tâches affectées à ces robots consistent, la plus part de temps, à un transport de charges, une ou plusieurs remorques y seront nécessairement attachées.

Un robot mobile avec remorques présente un système dynamique non linéaire difficile à commander. En effet, il faut éviter le phénomène de "jackknife" [1] ou phénomène du couteau de poche, qui consiste à atteindre un angle de 90° ou -90° entre le robot et la remorque. Dans ce contexte, plusieurs chercheurs ont essayé de trouver une commande capable d'assurer différents types de missions telle que le suivi de trajectoire [2], le parking [3], la trajectoire optimale [4] et le problème d'obstacle [5].

Par ailleurs, il y a eu recours à la commande robuste [6], la commande optimale basée sur la minimisation du coût [7] et des méthodes basées sur la représentation symbolique de l'univers [8] [9]. Une approche intégrée pour la planification des trajectoires et l'exécution du déplacement du robot dans tout type d'environnement, en agissant sur sa vitesse et son accélération, a été présentée dans [10]. On trouve aussi les algorithmes de braquage sinusoïdal de Murray et Sasty et les sinusoïdes à hautes amplitudes de Sussman [11].

La théorie de la Logique Floue est une technique qui a montré son efficacité pour ce genre de systèmes, son utilisation a fait le sujet de plusieurs travaux scientifiques pour la commande [1] [8] et la modélisation [1] [12] de l'ensemble {robot + remorque}. Au début, une seule remorque a été étudiée dans [8] [9] par Fukayama et Yang, ensuite le cas de plusieurs remorques a été entamé par Tanaka [1] [12] et Riid [13].

Ce travail consiste à exploiter les techniques non conventionnelles utilisant la logique floue pour développer des stratégies de commande de robots mobiles. En fait, il

s'agit de mettre en place une méthode basée sur les connaissances humaines pour assurer une navigation intelligente des robots mobiles avec remorque.

Dans cet article, après une description détaillée du système complexe étudié, la troisième partie de ce travail développe les étapes de conception d'un régulateur flou de type Mamdani pour la commande d'un robot mobile de type voiture avec une remorque. Le but est de réaliser une navigation stable et précise, atteindre une position bien déterminée et éviter un obstacle. Les résultats de simulation sont donnés et interprétés dans la quatrième section. Enfin la dernière section présente la conclusion et les perspectives pour le prochain travail.

II. DESCRIPTION DU SYSTEME

La semi remorque représentée sur la figure 1 est composée d'une tête dite wagon couplée à une remorque. Elle peut être décrite par le modèle géométrique, donné dans [14].

Ce modèle, dit de Ichihashi, se traduit par le système d'équations récurrentes non linéaires d'ordre 5 suivant (équation (1)) :

$$x_0(k+1) = x_0(k) + \left(\frac{vT_e}{l}\right) \tan(u(k))$$

$$x_1(k) = x_0(k) - x_2(k)$$

$$x_2(k+1) = x_2(k) + \left(\frac{vT_e}{L}\right) \sin(x_1(k))$$

$$x_3(k+1) = x_3(k) + (vT_e) \cos(x_1(k)) \sin\left(\frac{x_2(k+1) + x_2(k)}{2}\right)$$

$$x_4(k+1) = x_4(k) + (vT_e) \cos(x_1(k)) \cos\left(\frac{x_2(k+1) + x_2(k)}{2}\right)$$

avec :

$x_0(k)$: l'angle que fait le wagon avec l'axe des abscisses, à l'instant kT_e ,

$x_1(k)$: l'angle que fait l'axe de la remorque avec celui du wagon, à l'instant kT_e ,

$x_2(k)$: l'angle que fait la remorque avec l'axe des abscisses, à l'instant kT_e ,

$x_3(k)$: l'ordonnée de l'arrière de la remorque, à l'instant kT_e ,

$x_4(k)$: l'abscisse de l'arrière de la remorque, à l'instant kT_e ,

$u(k)$: l'angle de braquage du wagon, à l'instant kT_e ,
 l : la longueur du wagon (2.8m),
 L : la longueur de la remorque (5.5m),
 T_e : la période d'échantillonnage (0.01s),
 v : la vitesse du robot mobile.

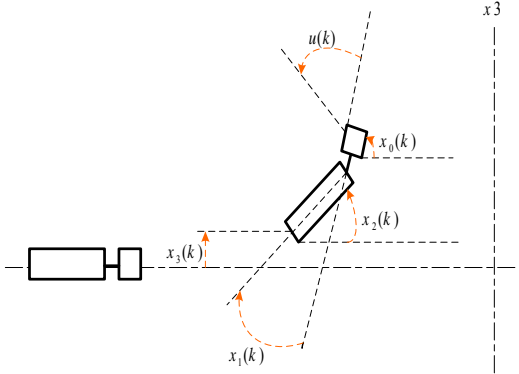


Fig. 1. La semi remorque étudiée et son système de coordonnées

III. CONCEPTION DE LA COMMANDE FLOUE

A. Atteindre un but

Dans cette partie, est proposé, un régulateur flou qui assure l'atteinte d'une position désirée et l'évitement réactif d'obstacle tout en prenant en considération les contraintes sur l'angle entre le wagon et la remorque. Afin de concevoir ce régulateur, on définit certains paramètres précisent la position et l'orientation du robot, Figure 2.

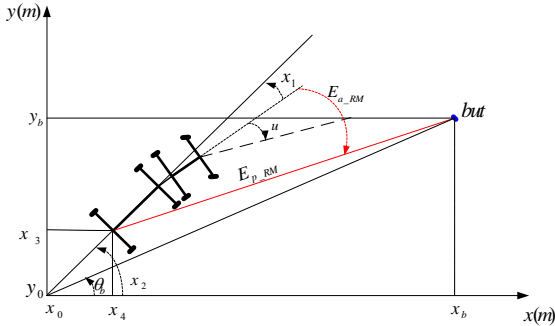


Fig. 2. Repérage de la semi remorque

Le point de référence est pris à l'arrière de la remorque, la distance par rapport au but notée E_{p_RM} , et l'erreur angulaire entre son orientation actuelle et celle du but, notée E_{a_RM} peuvent être déduites à partir des relations suivantes :

$$\begin{cases} Dx_R = x_b - x_4 \\ Dy_R = y_b - y_4 \end{cases} \quad (2)$$

Où x_b et y_b sont respectivement la position et l'orientation du but et on aura par suite :

$$x_2 = \arctan\left(\frac{Dx_R}{Dy_R}\right) \quad (3)$$

Et on définit l'erreur en position (E_{p_RM}) et l'erreur d'orientation (E_{a_RM}) comme suit :

$$\begin{cases} E_{p_RM} = \sqrt{Dx_R^2 - Dy_R^2} \\ E_{a_RM} = \theta_b - x_2 \end{cases} \quad (4)$$

Ces écarts sont utilisés en plus de l'angle x_1 comme entrées du régulateur flou qui doit générer l'angle de braquage (u) et la vitesse (v) nécessaires au robot afin d'atteindre son but, comme le montre la figure 3. Le régulateur flou utilisé dans cette structure est de type Mamdani.

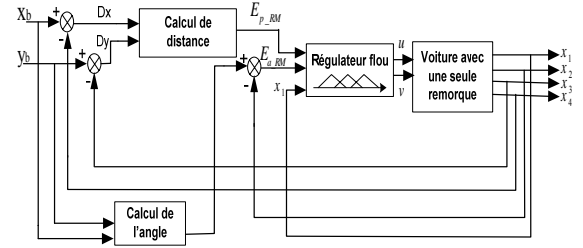


Fig. 3. Structure de la commande floue proposée

a) Fonctions d'appartenance

Il s'agit de diviser l'univers de discours afin de spécifier le domaine de variation des variables d'entrées/sorties du régulateur. La forme des fonctions d'appartenance est assez arbitraire et dépend de la préférence de l'opérateur. En pratique, les fonctions d'appartenance réalisées par des segments de droite sont plus faciles à traiter numériquement et conviennent à la plupart des cas. Pour des raisons de simplification les formes triangulaires et trapézoïdales sont choisies. Le choix des domaines de variation a été fait en se référant à l'estimation humaine sur les distances, par exemple une distance entre 4m et 16m est estimée moyenne, figure 4, pour l'entrée erreur de position.

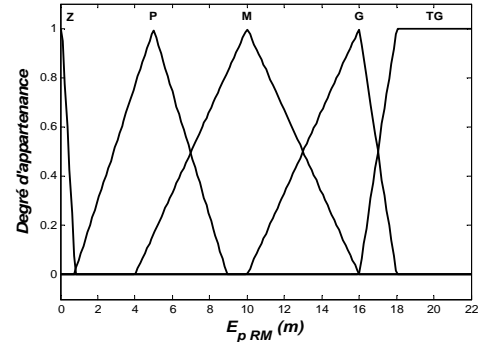


Fig. 4. Fonctions d'appartenance de l'erreur en position (E_{p_RM})

avec Z : Zéro, P : Petite, M : Moyenne, G : Grande, TG : Très Grande

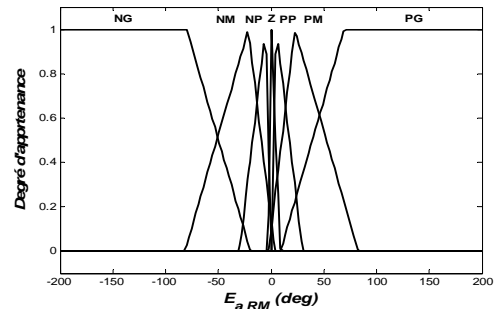


Fig. 5. Fonctions d'appartenance de l'erreur angulaire (E_{a_RM})

avec Z : Zéro, PP : Positive Petite, PM : Positive Moyenne, PG : Positive Grande, NP : Négative Petite, NM : Négative Moyenne, NG : Négative Grande.

De la même manière, les fonctions d'appartenance associées aux entrées erreur angulaire et angle x_1 sont données respectivement sur les figures 5 et 6.

Le domaine de variation de l'angle entre le wagon et la remorque est représenté sur la figure 6. On a choisit de ne pas dépasser une valeur de 25° pour que la remorque n'entraîne pas la perte de la direction du robot, on a pris : négatif : pour des valeurs inférieures à -25° , positif : pour des valeurs supérieures à 25° .

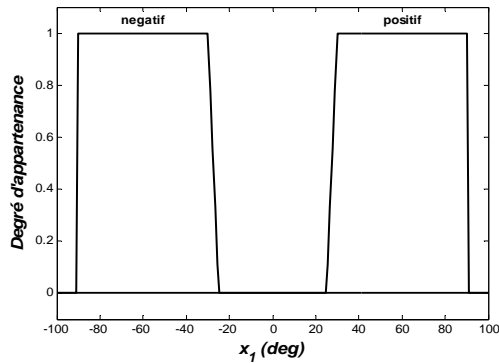


Fig. 6. Fonctions d'appartenance de l'angle entre le wagon et la remorque (x_1)

b) Base de règles

Après la répartition des fonctions d'appartenance sur l'univers de discours, il faut définir les règles floues reliant les différentes variables floues, d'entrée et de sortie.

Les différentes règles utilisées sont décrites dans le tableau suivant :

Table I
Règles floues pour atteindre un but

			Erreur angulaire ($E_{a, RM}$)						
			NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
Erreur position ($E_{p, RM}$)	Z	u	PM	PP	NP	Z	PP	NP	NM
		v	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	P	u	PG	PG	PM	Z	NM	NG	NG
		v	P	P	P	P	P	P	P
	M	u	PM	PM	PP	Z	NM	NG	NG
		v	P	P	P	M	M	P	P
	G	u	PM	PP	PP	Z	NP	NP	NG
		v	P	M	G	G	G	M	P
	TG	u	PM	PM	PP	Z	NP	NM	NG
		v	P	M	G	TG	G	M	P

La vitesse est toujours considérée positive pour cette application. Le robot est supposé atteindre le but sans marche arrière.

Les deux règles qui contrôlent l'angle entre le wagon et la remorque sont définies comme suit :

Si x_1 est négatif **alors** u est PM

Si x_1 est positif **alors** u est NM

c) Méthode de défuzzification

La méthode de défuzzification qui a donné le meilleur résultat est celle du centre des aires.

d) Résultats de simulation

Pour des conditions initiales nulles, la commande floue proposée, figure 3, avec le régulateur flou obtenu est

appliqué pour la commande de la semi remorque. L'angle entre le wagon et la remorque (x_1) nécessite une attention particulière. En effet, pour un but proche, situé à (18m, 40m), dont le parcours contient une forte courbure. On a pu remarquer que le robot atteint son but, figure 9, et que la variation de l'angle x_1 ne dépasse pas les 30° , figure 10.

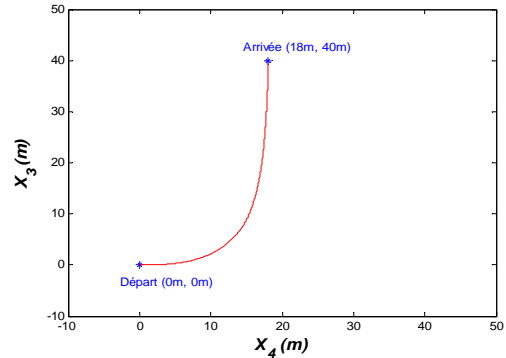


Fig. 9. Trajectoire du Semi Remorque

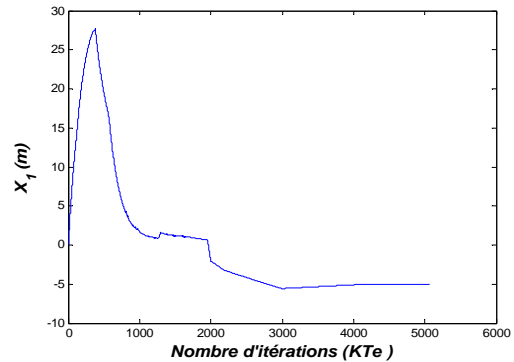


Fig. 10. Variation de l'angle entre le wagon et la remorque (x_1)

Pour un but plus loin, par exemple une position de (150m, 120m), la figure 11 illustre la trajectoire du robot, le résultat est satisfaisant, et l'erreur de position est petite 0.2m à l'arrivée de but, figure 12.

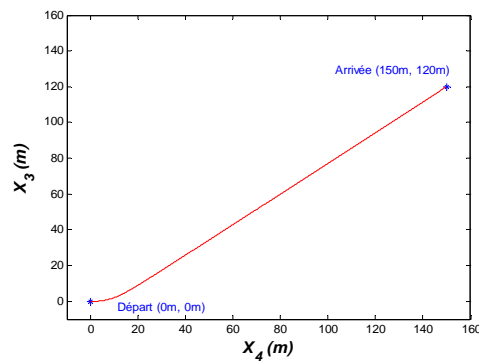


Fig. 11. Trajectoire du Semi remorque

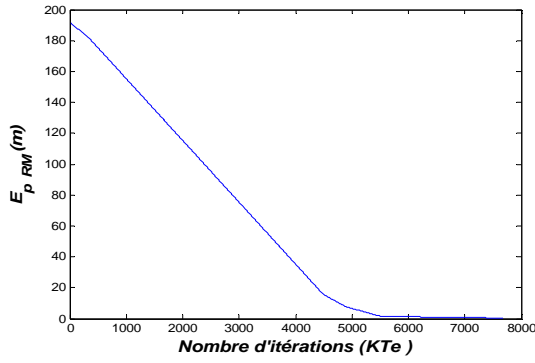


Fig. 12. Erreur de position

On remarque qu'au départ la semi remorque prend plus de temps pour prendre la bonne direction qu'un simple robot de type voiture [15], ceci est dû au contrôle sur la variable x_1 qui limite certains angles de commandes.

Les figures 13 et 14, représentent respectivement la variation de la vitesse (v) du semi remorque et la variation de l'angle entre le wagon et la remorque (x_1).

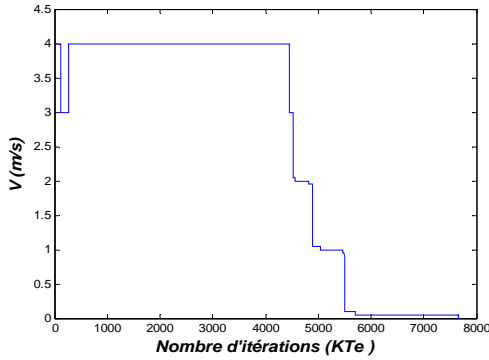


Fig. 13. Variation de la vitesse

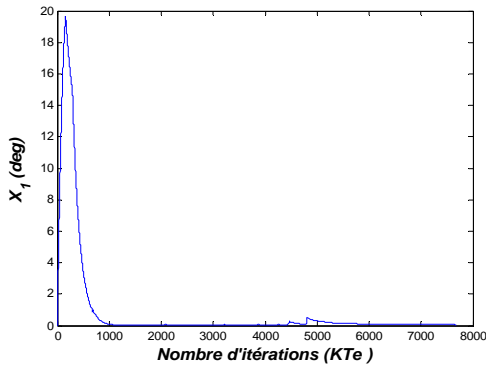


Fig. 14. Variation de l'angle entre le wagon et la remorque

La semi-remorque atteint le but en respectant les contraintes sur l'angle (x_1).

B. Eviter un obstacle

Pour le problème d'obstacle, le même principe assurant l'arrivée en une position désirée a été conservé avec une amélioration qui consiste à prendre en considération la présence d'un obstacle sur la trajectoire.

Ainsi, on a ajouté deux nouvelles entrées au régulateur flou qui sont la distance entre le robot et l'obstacle (D_{obs_RM}) et l'angle que fait l'obstacle par rapport à la trajectoire vers le but (A_{obs_RM}), figure 15.

Ces deux grandeurs peuvent être définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} D_{obs_RM} = \sqrt{Dx_{obs_RM}^2 - Dy_{obs_RM}^2} \\ A_{obs_RM} = x_2 - \alpha \end{cases} \quad (5)$$

avec

$$\begin{cases} Dx_{obs_RM} = x_{obs_RM} - x_4 \\ Dy_{obs_RM} = y_{obs_RM} - x_3 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{et } \alpha = \text{atan}\left(\frac{Dy_{obs_RM}}{Dx_{obs_RM}}\right) \quad (7)$$

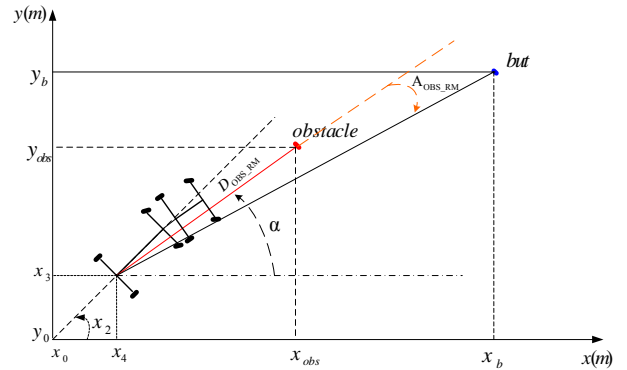


Fig. 15. Repérage du robot en présence de l'obstacle

Ainsi, la structure du régulateur va changer à cause des nouvelles variables D_{obs_RM} et A_{obs_RM} qui ont été ajoutés à l'ensemble des entrées, et la nouvelle structure de la structure de commande proposée est donnée sur la figure 16.

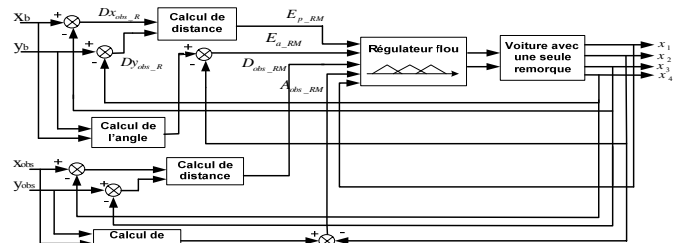


Fig. 16. Commande floue proposée en cas d'obstacle

a) Fonctions d'appartenance

Les variables qui calculent l'emplacement de l'obstacle ont été représentées par les fonctions d'appartenance sur la figure 17 pour la distance par rapport à l'obstacle et figure 18 pour la direction de cet obstacle.

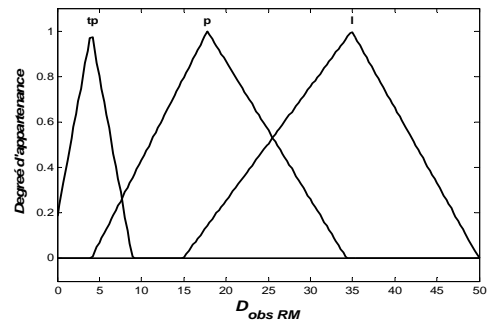


Fig. 17. Fonctions d'appartenance de la distance de l'obstacle (D_{obs_RM})

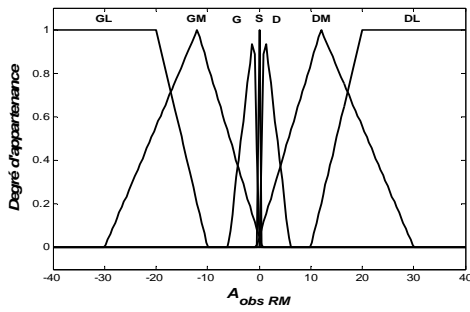


Fig.18. Fonction d'appartenance de l'angle de l'obstacle par rapport la trajectoire (A_{obs_RM})

b) Base de règles

Les règles du tableau 1 qui mènent au but ont été conservées puis, de nouvelles règles, Tableau 2, gérant la situation face à l'obstacle ont été ajoutées. Ces règles sont représentées par le tableau 2 :

Table 2
Règles floues pour éviter l'obstacle

		Angle de l'obstacle							
		S	G	GM	GL	D	DM	DL	
Distance d'obstacle	tp	u	PG	NP	NM	NG	PP	PM	PG
		v	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	p	u	PG	NP	NM	NG	PP	PM	PG
		v	P	P	P	P	P	P	P
	l	u	PG	NP	NM	NG	PP	PM	PG
		v	M	M	M	M	M	M	Z

La méthode de défuzzification choisie est la même méthode utilisée dans l'étape précédente.

c) Résultats de simulation

Comme la trajectoire représentée, figure 19, est celle de l'arrière de la remorque, on voit que la remorque passe assez proche de l'obstacle, l'évitant d'une façon souple. L'erreur de position à l'arrivée au but reste petite 0.5m, figure 20.

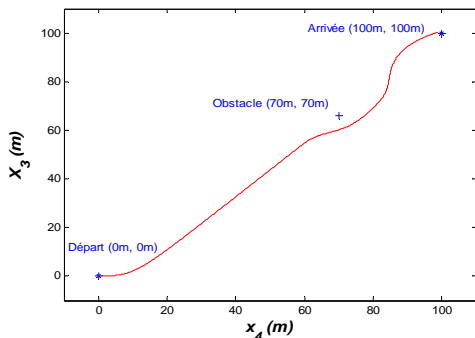


Fig.19. Trajectoire de la Semi remorque

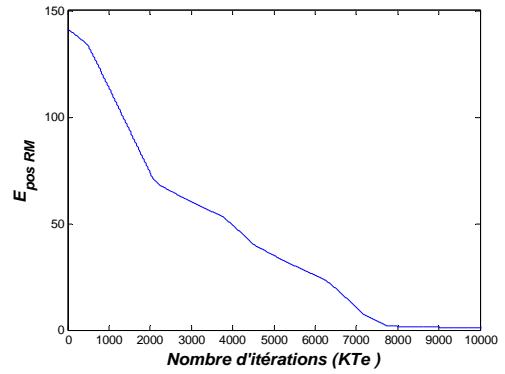


Fig.20. Erreur de position

Sur les figures 21 et 22 sont représentés respectivement la variation de la vitesse et l'angle u de braquage assurant au robot d'atteindre le but en évitant un obstacle fixe avec une variation acceptable de l'angle x_1 entre le wagon et la remorque. Les résultats obtenus donc, par la commande floue proposée sont satisfaisants dans le cas d'une voiture avec une seule remorque.

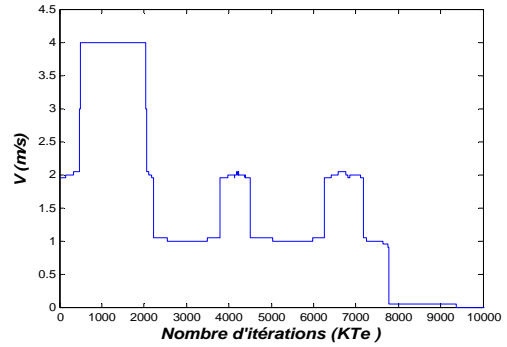


Fig. 21. Variation de la vitesse

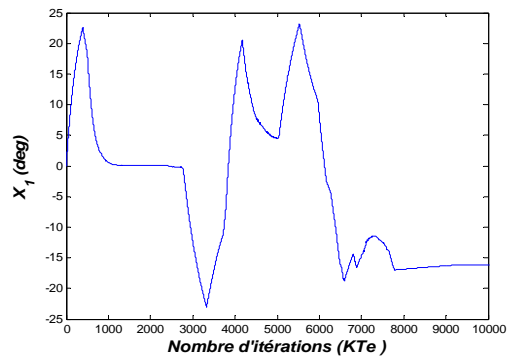


Fig. 22. Variation de l'angle entre le wagon et la remorque

IV. CONCLUSION

Dans ce travail un régulateur flou de type Mamdani a été synthétisé pour un système complexe, un robot mobile avec remorque, ayant plus de contraintes cinétiques que celui déjà étudié en [15]. Le problème de la navigation autonome a été abordé ainsi que le problème d'éviter un obstacle. La commande consiste à générer la vitesse et l'angle de braquage nécessaires pour le contrôle des distances par rapport au but et à l'obstacle tout en respectant les contraintes sur l'angle entre le wagon et la remorque. Les résultats de simulation,

obtenus pour les cas, sans et avec obstacle, montrent les performances de la commande floue proposée.

La semi remorque se dirige vers le but en évitant l'obstacle avec des variations limitées de l'angle entre le wagon et la remorque.

REFERENCES

- [1] Tanaka K., Kosaki T., Wang H. Fuzzy Control of a Mobile Robot with Multiple Trailers- Stability Analysis and Parallel Distributed Compensation. Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control Dearborn, MI, September, 1996.
- [2] Park M., Chung W., Kim M., Song J. Control of a mobile robot with passive multiple trailers. Proceeding of the 2004 IEEE, International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, pp. 4369-4374, Avril 2004.
- [3] Cuesta F., Gómes-Bravo F., Ollero A. Parking Maneuvres of Industrial-Like Electrical Vehicles With and Without Trailer. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51, N°. 2, pp. 257-268, Avril 2004.
- [4] Chyba M., Sekhvat S. Time Optimal Paths for a mobile robot with one trailer. Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ Intelligent Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1669-1674, 1999.
- [5] Bushnell L.G. An obstacle Avoidance Algorithm For a Car Pulling Trailers With Off-Axle Hitching. Proceedings of the 34th Conference on Decision and Control, New Orleans, LA, pp. 3837-3842, Décembre 1995.
- [6] Larmiroux F., Laumond J.P. A Practical Approach to Feedback Control For a Mobile Robot with Trailer. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgique, pp. 3291-3296, Mai 1998.
- [7] Pallottino L., Bicchi A. A Dynamic Programming Approach to Optimal Planning for Vehicles with Trailers. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italie, pp. 3098-3103, Avril 2007.
- [8] Fukayama A., Ida M., Katai O. Behavior-based Fuzzy Control System for a Mobile Robot with Environment Recognition by Sensor-Motor Coordination. 1999 IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings, Seoul, Korea, pp. 105-110, Août 1999.
- [9] Yang X., Yuan J., Tu F. Backing Up a Truck and Trailer Using Variable Universe Based Fuzzy Controller. Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luoyang, Chine, pp. 734-739, Juin 2006.
- [10] Lamiroux F., Sekhvat S., Laumond J.P. Motion Planning and Control for Hilare Pulling a Trailer. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 15, N°. 4, pp. 640-651, Août 1999.
- [11] Tilbury D., Laumond J.P., Murray R., Sastry S., Walsh G. Steering Car-Like Systems with Using Sinusoids. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, pp. 1993-1998, Mai 1992.
- [12] Tanaka K., Kosaki T., Wang H.O. Backing Control Problem of a Mobile Robot with Multiple Trailers: Fuzzy Modeling and LMI-Based Design. IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics- Part C: Applications and Reviews, Vol. 28, N°. 3, pp. 329-337, Aout 1998.
- [13] Riid A., Ketola J., Rüter E. Fuzzy Knowledge-Based Control for Backing Multi-Trailer Systems. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Turkey, pp. 498-504, Juin 2007.
- [14] Tanaka K., Sano M. A Robust Stabilization Problem of Fuzzy Controller Systems and its Applications to Backing up Control of a Truck Trailer. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 2, pp. 119-134, May 1994.
- [15] Rouissi F., Jabri D., El Harabi R., Bel Hadj Ali Naoui S. Fuzzy Logic Control of Autonomous Vehicule Obstacle Avoidance Problem. 9th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic control (STA'08), Sousse, Tunisia, 2008.