



Commande PID floue robuste d'un robot manipulateur à 2ddl conçu pour héliostat

F.BEDAUCHE^{1*}, A.HASSAM², A.GAMA¹, A.BELAID¹

¹ Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algérie

* fbedaouche77@uraer.dz

² Intelligent Systems Laboratory, University of FERHAT ABBES Sétif 19000, Algeria

Résumé— Les héliostats suivent le soleil et concentrent ses rayons sur un récepteur placé au sommet d'une tour. Des systèmes censés être dites de poursuite solaire sont destinés pour orienter ces héliostats. Différentes montures de ces systèmes sont présentées pour la même tâche l'orientation, mais diffèrent en termes de structure mécanique et géométrique. Compte tenu des différentes positions du soleil dans la journée les héliostats doivent réfléchir les rayons incidents sur le même point fixe, alors un prototype d'un robot manipulateur à deux degrés de liberté pour système de poursuite solaire d'un héliostat de taille réelle conçu par SolidWorks est proposé garantissant avec précision cette tâche et une modélisation dynamique selon la structure mécanique de l'héliostat est faite par le formalisme de Lagrange ainsi qu'une commande PID auto-ajustée par la logique floue est testée pour valider notre modèle.

Mots-clés—Héliostat-Tour, Robot manipulateur, Modélisation dynamique, Commande PID, Logique floue, Robustesse

I. INTRODUCTION

Le monde connaît une importante croissance dans le domaine des énergies renouvelables comme la technologie des concentrations solaires. Cependant, la production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct, alors l'énergie solaire étant peu dense de sorte qu'une technologie est nécessaire pour la concentrer afin d'obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. L'Algérie jouit d'un important potentiel solaire. Elle possède la plus grande zone désertique, avec une forte irradiation directe, elle est l'un des pays où la ressource solaire pour la concentration solaire est très favorable. Parmi ces technologies les centrales à tour qui sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers un absorbeur situé au sommet d'une tour. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable par un système de poursuite solaire, et suit le soleil individuellement et réfléchit ses rayons incidents précisément en direction de l'absorbeur. L'avantage de celle-ci par rapport aux capteurs cylindro-paraboliques est que les pertes à l'ambiance sont inférieures car la surface exposée est limitée [1].

La robotique avec son champ d'utilisation dans l'industrie révèle une idée cachée de considérer le système de poursuite

solaire à deux axes comme un robot manipulateur à 2ddl où la modélisation et la commande des robots sont bien avancées dans le domaine automatique aussi bien qu'en informatique industriel [2].

La conception des robots manipulateurs en général, à l'aide des outils de logiciel est devenue plus nécessaire, puisqu'il est possible de simuler des conditions de fonctionnement critiques. Les études sur la théorie de commande des systèmes mécaniques périodiques ont été le sujet de la recherche intensive pendant les deux dernières décennies. Cependant, le suivi avec une commande PID au-dessus du domaine entier de la dynamique non-linéaire de ces systèmes est une matière provocante de la recherche.

Dans cet article, on présente une structure mécanique d'un robot manipulateur élaborer par SolidWorks dont la conception et la commande de ces robots nécessitent alors le calcul de certains modèles mathématiques, tels que les modèles qui expriment la position des miroirs en fonction des variables articulaires du robot. Mais pour commander le robot, cela nécessite un choix d'une stratégie adéquate [3].

Le reste de l'article est organisé en sections, la section II présente la géométrie du robot manipulateur. En section III, le modèle dynamique du robot est obtenu décrivant son évolution temporelle, sous forme de deux équations différentielles non linéaires du second ordre. La section IV et V montre la loi de commande PID et l'ajustement de ses gains par un régulateur flou garantissant la robustesse aux perturbations. La section VI est consacrée pour le test de simulation et l'exécution en boucle fermée commande-robot. La section VII présente l'ensemble schéma, relations et conditions de simulation. La section VIII discute les résultats de simulation. Enfin dans la section IX une conclusion clôture l'article.



II. DESCRIPTION MECANIQUE ET GEOMETRIQUE DU ROBOT
MANIPULATEUR

La structure du robot manipulateur est une chaîne ouverte simple avec deux articulations de type rotoïde Fig.1 [4].

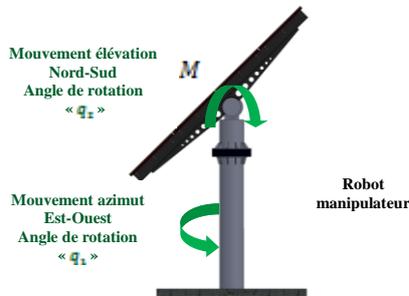


Fig.1 Prototype du robot manipulateur

La représentation géométrique est donnée par la Fig.2 :

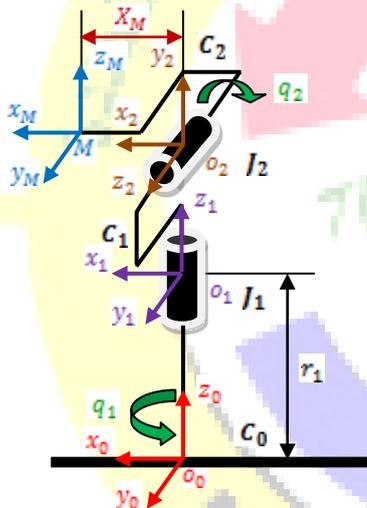


Fig.2 Schéma synoptique du robot manipulateur

Le système est composé de deux corps et de deux articulations (voir Fig.2). Le corps désigne la base du robot. Le corps est celui qui porte le support des miroirs de l'héliostat. L'articulation connecte le corps au corps C_1 .

Les paramètres de Denavit-Hartenberg obtenus après avoir associé un repère fixe pour chaque corps sont classés dans le tableau I suivant :

TABEAU I LES PARAMETRES GEOMETRIQUES DU ROBOT MANIPULATEUR

Articulation j	θ_j	d_j	a_j	a_j
$0 \rightarrow 1$	q_1	0	0	r_1
$1 \rightarrow 2$	q_2	0	$\pi/2$	0

L'orientation et la position de la normale d'origine sont définies à partir de la matrice de passage calculée par rapport à la base du robot :

$${}_{o_0}T_M = \begin{bmatrix} \cos q_1 \cos q_2 & -\sin q_1 & -\cos q_1 \sin q_2 & X_M \cos q_1 \cos q_2 \\ \sin q_1 \cos q_2 & \cos q_1 & -\sin q_1 \sin q_2 & X_M \sin q_1 \cos q_2 \\ \sin q_2 & 0 & -\cos q_2 & r_1 + X_M \sin q_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

L'orientation de la normale de l'héliostat par rapport à la base du robot est donnée par les vecteurs colonnes et suivant:

$$R_N = [\cos q_1 \cos q_2 \quad \sin q_1 \cos q_2 \quad \sin q_2]^T$$

$$P_N = [X_M \cos q_1 \cos q_2 \quad X_M \sin q_1 \cos q_2 \quad r_1 + X_M \sin q_2]^T$$

III. MODELISATION DYNAMIQUE DIRECT DU ROBOT
MANIPULATEUR

Le modèle dynamique est la relation entre les couples appliqués aux actionneurs et les positions, vitesses et accélérations articulaires. La relation du modèle dynamique est de la forme :

$$\Gamma = A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (1)$$

avec :

- est le vecteur de position articulaire.
- est le vecteur de vitesse articulaire.
- est le vecteur d'accélération articulaire.
- est le vecteur des couples des actionneurs.
- $A(q)$ est la matrice d'inertie définie positive.
- $C(q, \dot{q})$ est la matrice représentant les forces de Coriolis et des forces centrifuges.
- $G(q)$ est le vecteur des forces de gravité.

Le modèle dynamique calculé par le formalisme de Lagrange est :



$$\begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{zz1} + I_{xx2} \sin^2(q_2) + I_{yy2} \cos^2(q_2) & 0 \\ 0 & I_{zz2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -2(I_{yy2} \sin(2q_2)) \dot{q}_1 \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ m_2 g x_{G2} \cos(q_2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

TABLEAU II LES PROPRIETES PHYSIQUES DU ROBOT MANIPULATEUR

Masse de C_2 m_2	1129.07475 kg
Moment d'inertie de C_1 I_{zz1}	1.7191 kg.m ²
Moment d'inertie de C_2 I_{xx2}	2343.5593 kg.m ²
Moment d'inertie de C_2 I_{yy2}	1600.3720 kg.m ²
Moment d'inertie de C_2 I_{zz2}	777.7458 kg.m ²
Centre de masse de C_2 C_{G2}	0.20275 m

IV. COMMANDE PID

La correction par PID est une commande en boucle fermée et il est le plus répandu dans les industries parce qu'il est facile à mettre en application tout en réalisant la bonne exécution.

La représentation mathématique du correcteur PID est de la forme [5]:

$$\Gamma = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3)$$

avec

$$e = q_d - q$$

où

est le couple appliqué pour chaque articulation.

e est l'erreur de position en radian de chaque articulation.

est la position désirée en radian.

k_p, k_i, k_d sont des gains proportionnel, intégral et de dérivation respectivement.

La loi de commande PID représentée ci-dessus se compose de trois actions de base, à savoir proportionnelle, intégrale et dérivée, qui représentent le courant, passé et future erreur prévue dont couvrez toute l'histoire du temps le signal d'erreur. Les gains appropriés sont k_p, k_i et k_d . Par ajustement de ces paramètres, les performances et la stabilité du système peuvent être réalisées.

V. ROBUSTESSE

Il existe différents types de contrôle par logique floue, selon les dispositifs de la commande industrielle, l'expert doit se doter d'un savoir faire technologique en terme d'analyse et d'expérience pour raisonner logiquement sur les règles floues [6].

La tâche principale associée à cette étude est de montrer les performances de conception d'une commande PID auto-ajusté par un régulateur flou à deux entrées l'erreur et la variation de l'erreur les trois sorties k_p, k_i et k_d sont contrôlée en temps réel. Les fonctions d'appartenance des variables d'entrées et des sorties incluent ces ensembles flous NB (Négative grand), NM (Négative moyen), NS (Négative petit), O (zéro), PS (Positive petit), PM (Positive moyen), PB (Positive grand) représentées sur les Fig.4, Fig.5 et Fig.6. Les règles floues du mécanisme d'inférence du régulateur flou sont de type Mamdani Si-Alors mises en œuvre sous forme suivante :

Si est et est , alors est et est et est

Les valeurs de sortie les gains sont calculées par la méthode de défuzzification du centre de gravité.

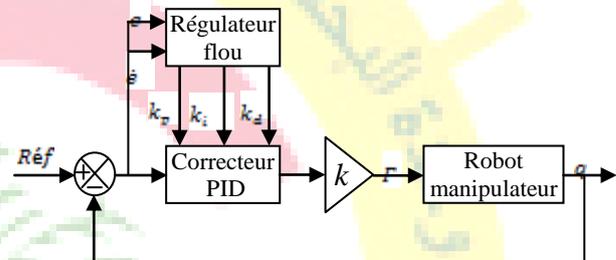


Fig.3 Schéma bloc de la commande PID floue du robot manipulateur [7]

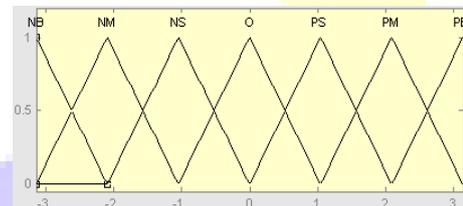
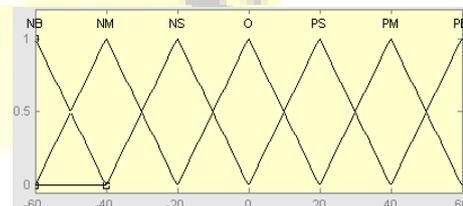


Fig.4 Fonctions d'appartenance des entrées e_1 et e_2





Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014

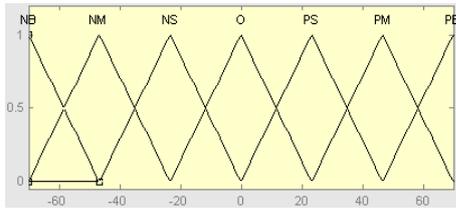


Fig.5 Fonctions d'appartenance des entrées \dot{e}_1 et \dot{e}_z respectivement

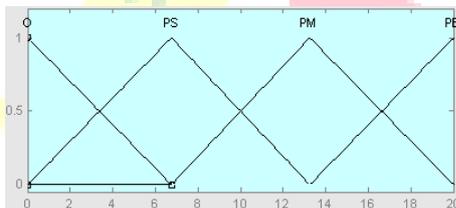
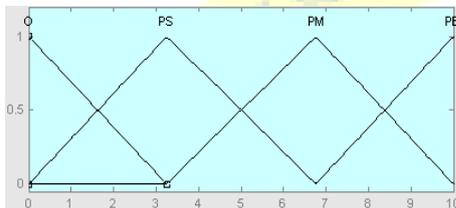
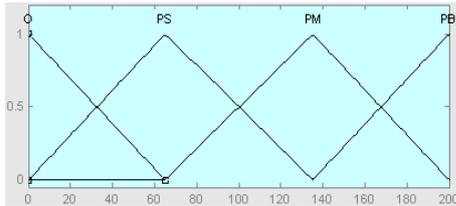


Fig.6 Fonctions d'appartenance des sorties k_d , k_i et k_z respectivement

Suite aux fonctions d'appartenance des variables d'entrées-sorties on définit la base de règles associée suivant le tableau III [8]:

TABLEAU III LES BASES DE REGLES DE REGULATEUR FLOU

k_p	\dot{e}	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
e								
NB		B	B	M	M	S	O	O
NM		B	B	M	S	S	O	S
NS		M	M	M	S	O	S	S
O		M	M	S	O	S	M	M
PS		S	S	O	S	S	M	M
PM		S	O	S	M	M	M	B
PB		O	O	M	M	M	B	B

k_i	\dot{e}	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
e								
NB		B	B	M	M	S	O	O
NM		B	B	M	S	S	O	O
NS		B	M	S	S	O	B	S
O		M	M	S	O	S	M	M
PS		M	S	O	S	S	M	B
PM		O	O	S	S	M	B	B
PB		O	O	S	M	M	B	B

k_d	\dot{e}	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
e								
NB		S	S	B	B	B	M	S
NM		S	S	B	M	M	S	O
NS		O	S	M	M	S	S	O
O		O	S	S	S	S	S	O
PS		O	O	O	O	O	O	O
PM		B	S	S	S	S	S	B
PB		B	M	M	M	S	S	B

VI. TEST DE SIMULATION DU ROBOT MANIPULATEUR

Pour la validation de la conception de SolidWorks de notre héliostat un modèle dynamique du robot manipulateur a été calculé et testé par la commande PID robuste en boucle fermée en utilisant la boîte à outils Fuzzy Logic toolbox de MATLAB [9]. Pour prouver la praticabilité de la commande proposée, un schéma de simulation est réalisé en appliquant la commande pour chacune des articulations du robot.

Dans cet exemple, nous cherchons à montrer les résultats de simulation en présentant les angles azimut et hauteur du rayon incident, du rayon réfléchi et de l'héliostat.

Le but de la commande est de permettre au robot de suivre la trajectoire imposée. Les résultats présentés par la Fig.7 prouvent la robustesse de la commande proposée avec un temps de réponse acceptable du système commandé et sans dépassement, on a ajouté un bruit blanc en sortie la commande résista vis-à-vis des perturbations Fig.8.

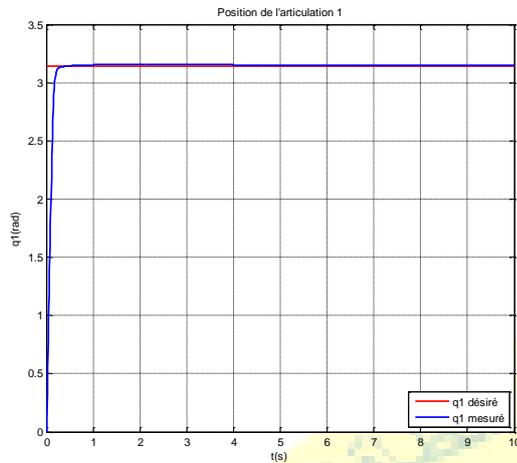


Fig.7 Position q_1 et q_2 sans bruit

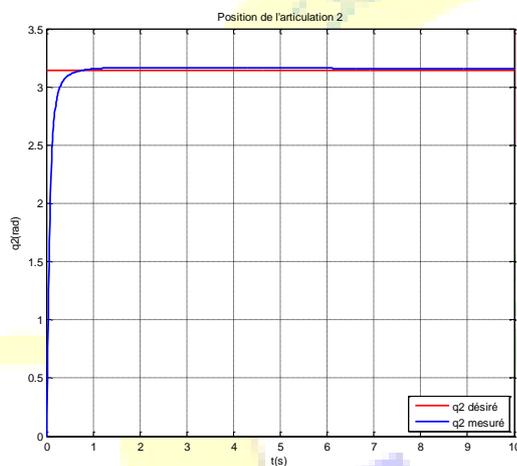
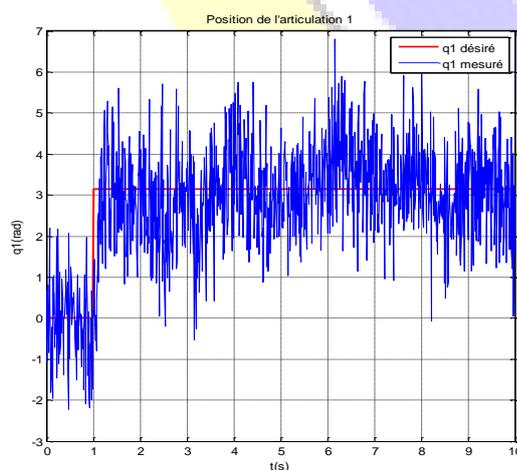


Fig.8 Position q_1 et q_2 avec bruit



A. Position du soleil

Position du soleil est définie par deux angles azimut et hauteur exprimé par les relations suivantes [10]:

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (4)$$

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (5)$$

où

est la déclinaison du soleil
est l'angle horaire solaire
est latitude du lieu

B. Relations héliostat-Tour

Fig.9 présente l'ensemble Héliostat-Tour dans un système de coordonnées cartésiennes associé à la tour. La position de l'héliostat-Robot par rapport à la tour est définie par celle du bâti du robot manipulateur (X_H, Y_H), et les coordonnées de la cible sur la tour sont donnée par $(0, 0, H)$.

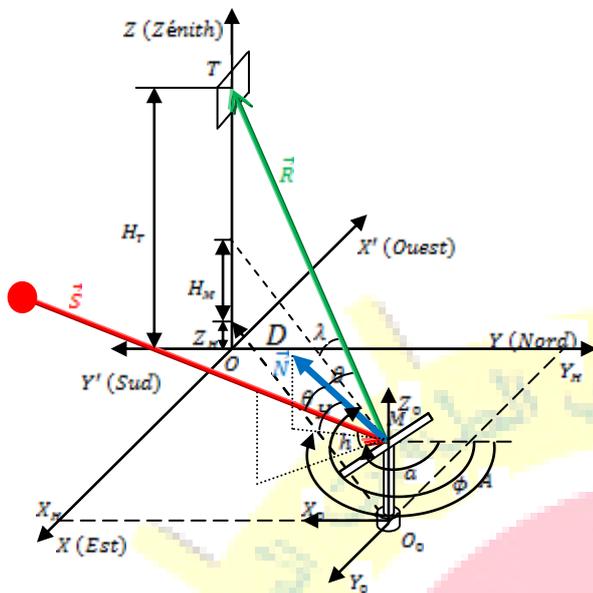


Fig.9 Coordonnées cartésiennes Héliostat-Tour et le réfléchissement du rayon solaire par l'héliostat vers la cible fixe [11]

Les coordonnées du centre de l'héliostat sont définies par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} {}^0X_M &= X_H + X_M \sin q_1 \cos q_2 \\ {}^0Y_M &= -Y_H + X_M \cos q_1 \cos q_2 \\ {}^0Z_M &= Z_H + r_1 + X_M \sin q_2 \end{aligned} \quad (6)$$

Plusieurs relations géométriques utiles peuvent être obtenues de la Fig.9. Ces relations sont importantes dans la détermination de l'azimut et la hauteur du rayon réfléchi par l'héliostat [12]:

$$\begin{aligned} {}^0X_M &= -D \sin \phi \\ {}^0Y_M &= -D \cos \phi \\ {}^0Z_M &= Z_H + H_M \end{aligned} \quad (7)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{H_T - {}^0Z_M}{D} \right) \quad (8)$$

avec

$$D = \sqrt{{}^0X_M^2 + {}^0Y_M^2} \quad (9)$$

En substituant les relations (7), (8) et (9) on obtient les

équations de et suivantes :

$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{{}^0X_M}{{}^0Y_M} \right) \\ \lambda &= \tan^{-1} \left(\frac{H_T - {}^0Z_M}{D} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

C. Orientation de la normale

La normale de l'héliostat est définie par les angles de rotation azimut et hauteur suivants [13]:

$$A = \sin^{-1} \left(\frac{\sin a \cos h + \cos \lambda \sin \phi}{2 \cos \theta \cos H} \right) \quad (11)$$

$$H = \sin^{-1} \left(\frac{\sin h + \sin \lambda}{2 \cos \theta} \right) \quad (12)$$

avec

$$\theta = \frac{1}{2} \cos^{-1} (\sin h \sin \lambda + \cos h \cos \lambda (\sin a \sin \phi + \cos a \cos \phi))$$

Ce sont les angles que le robot manipulateur doit suivre pour orienter l'héliostat vers des positions désirées.

D. Simulation et résultats

L'objectif principal de cette simulation est de réfléchir le rayon incident du soleil par l'héliostat vers une cible fixe au sommet de la tour, l'orientation de l'héliostat est assurée par le robot manipulateur conçu pour effectuer cette tâche.

La simulation est réalisée suivant le schéma développé avec MATLAB/SIMULINK présenté en Fig.10, il constitue les différents blocs de calcul: position du soleil, angle d'incidence, position du rayon réfléchi et l'orientation de l'héliostat.

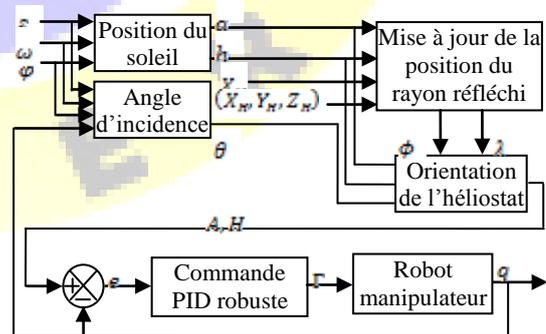


Fig.10 Schéma de simulation Héliostat-Tour

La simulation Héliostat-Tour est faite pour 13 Octobre 2014



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



en utilisant l'ensemble des équations de 6 au 13. La localisation du lieu et les paramètres de l'ensemble Héliostat-Tour sont rassemblé dans le tableau IV suivant :

TABLEAU IV PARAMETRES HELIOSTAT-TOUR

Localisation	
Latitude	32.38 ⁰
Altitude	450 m
Paramètres de l'héliostat	
Hauteur par rapport à la base r1	1.897 m
Coordonnées du centre X_M de l'héliostat M	(0.316, 0, 0) m
Coordonnées de l'héliostat (X_H, Y_H, Z_H)	(0, 50, 0) m
Paramètres de la tour	
Hauteur de la tour	10 m

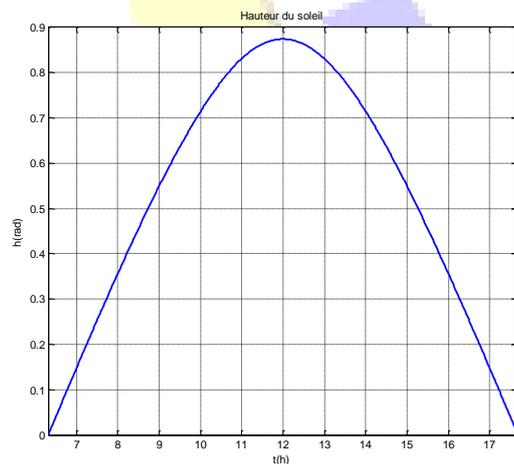
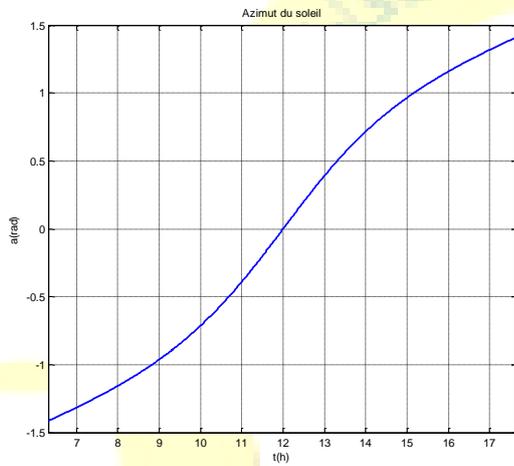
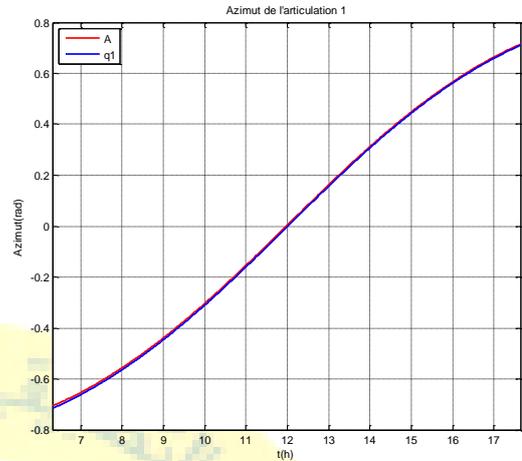


Fig.12 Orientation de l'héliostat (A, H)

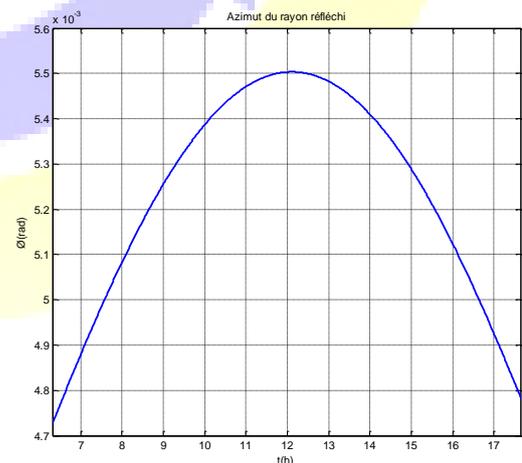


Fig.11 Position du soleil (a, h)

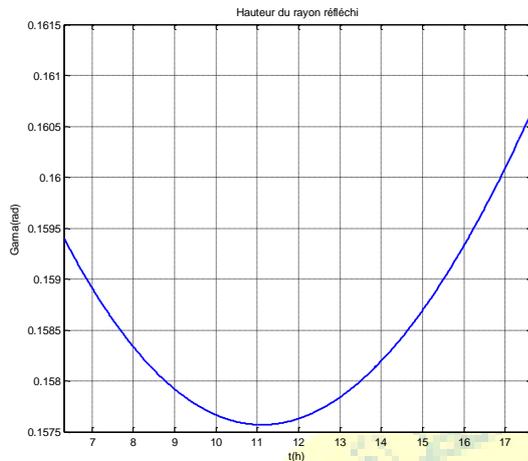


Fig.13 Position du rayon réfléchi (ϕ)

VIII. DISCUSSION DES RÉSULTATS

Le but de la commande est de permettre au robot de suivre la trajectoire imposée sans bruit Fig.7 et avec bruit Fig.8. Pour cette raison, les articulations sont contrôlées par les PID robustes pour satisfaire l'exigence exacte de la trajectoire suivie.

Dans cette section, nous cherchons à montrer les résultats de simulation en présentant les angles Azimut-Hauteur du rayon incident du soleil Fig.11, du rayon réfléchi et de l'héliostat.

Les gains sont ajustés de manière que les PID convergent. Par exemple, Fig. 12 montre le suivi du robot manipulateur de la position désirée de la normale de l'héliostat dans le but de réfléchir le rayon incident vers la cible fixe au sommet de la tour, on voit bien que le robot complète la tâche avec une erreur de position moins de 0.003. La position de l'héliostat par rapport à la tour et la hauteur de celui-ci sont des paramètres clés pour le calcul de l'azimut et de la hauteur du rayon réfléchi. La Fig.13 présente la variation de ces deux angles ϕ , qui sont très faibles, prouve que la position du rayon réfléchi est peu variée, dire constante, la tâche même de notre robot manipulateur.

IX. CONCLUSION

Une structure mécanique d'un système de poursuite solaire sous forme d'un robot manipulateur est proposée dans ce travail avec représentation des paramètres géométrique. Le modèle dynamique Héliostat-Robot décrit permet la génération de l'espace de travail: tracer géométriquement l'évolution et le domaine atteint par le robot manipulateur,

Nous avons présenté un système de commande de poursuite robuste pour le robot manipulateur à l'aide du correcteur PID auto-ajusté par un régulateur flou.

Parmi les perspectives exploitant le modèle calculé dans ce travail et la commande, génération de mouvement dans l'espace articulaire, le robot manipulateur oriente avec précision l'héliostat chargé de réfléchir le rayon incident vers la cible fixe situé au sommet de la tour. Nos résultats ont démontrés l'efficacité de la méthode proposée pour la commande de suivi de trajectoire Azimut-Hauteur du robot manipulateur.

REFERENCES

- [1] Quoilin Sylvain, *Les Centrales Solaires à Concentration*, Mai 2007.
- [2] A.Chaïb et al, "Orientation system of solar panels based on a robot manipulator", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'11) Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2010.
- [3] A. Chaïb, M. Kesraoui, E. Kechadi, "Heliostat Orientation System using a PLC based Robot Manipulator", Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) 2013 IEEE.
- [4] W. Khalil, Etienne Dombre, *Modélisation, identification et commande des robots*, Hermès - Lavoisier (2e édition) 1999.
- [5] W.Chang, S.Shih, "PID controller design of nonlinear systems using an improved particle swarm optimization approach", Commun Nonlinear Sci Numer Simulat 15 (2010) 3632-3639.
- [6] XinMin Shi, Zhengqinq Hao, "Fuzzy control and Matlab simulation", Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press. 2008.
- [7] Yuzhao Feng, Tengrui Long, Jingsong Guo, Hongwei Zhao, Xiaoqing Zhang, "Robust Fuzzy PID Control for ASP Wastewater Treatment System", The Fourth International Conference on Control and Automation (ICCA'03), 10-12 June 2003 IEEE, Montreal, Canada.
- [8] Wu Wei, Ma Xiaoning, Gao Xiuyu, "The Application of fuzzy PID in intelligent Wheelchair System", Secon WRI Global Congress on Intelligent Systems 2010 IEEE
- [9] Zhang Guoliang, Deng Fanglin. "Fuzzy Control and its Application of MATLAB". Xi an: Xi'an Jiaotong University, 2003, pp. 46-52.
- [10] M. Capderou, *Atlas solaire de l'Algérie*, Tome. 2, OPU, 1986.
- [11] K. K.Chong, M.H. Tan, "Comparison Study of Two Different Sun-Tracking Methods in Optical Efficiency of Heliostat Field", Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy, Vol. 2012, pp. 10, 2012.
- [12] Ahmed Gamil,Syed Ihtsham UI-Haq Gilani, Hussaim H.A-kayiem, "Simulation of Incident Solar Power Input to Fixed Target Central Receiver System in Malaysia", 2013 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology
- [13] K. K. Chong and M. H. Tan, "Range of motion study for two different sun-tracking methods in the application of heliostat field", Solar Energy, vol. 85, no. 9, pp. 1837-1850, Sep. 2011.