



# Développement d'un Régulateur Flou en vue de la Commande d'un Héliostat

W. Benzaoui<sup>#1</sup>, B. Doufene, A. Medkour

<sup>#</sup>Département d'Electronique de des Communications,

Université Kasdi Merbah, Ouargla

<sup>1</sup>benzaoui.wafa@univ-ouargla.dz

**Résumé** – L'efficacité d'un système photovoltaïque dépend de l'intensité du flux lumineux qui varie le long de la journée selon la position du soleil ; d'où la nécessité de la poursuite du soleil avec précision. L'objectif de cette étude est de développer un régulateur flou pour la poursuite du soleil à l'aide d'un héliostat. Dont le mouvement est fait autour de deux axes assurés par deux moteurs à courant continue. Pour réaliser la poursuite du soleil, des informations météorologiques sur le site de Bechar sont utilisées. Le régulateur conçu donne des bons résultats de commande et de poursuite.

**Mots-clés** — Energie photovoltaïque (PV), Héliostat, Régulateur Flou, Poursuite du soleil.

## I. NOMENCLATURE

Les paramètres et les symboles utilisés dans cette étude sont décrits dans TABLE I.

TABLE I  
Nomenclature

Symbole	Signification
$\varphi_I$	L'angle azimut de rayon incident.
$\theta_I$	L'angle site de rayon incident.
$\Phi_N$	L'angle azimut de la normale.
$\theta_N$	L'angle site de la normale.
$\theta_{ref}$	La position angulaire de référence
$\theta_r$	La position angulaire réelle.
$\Omega(t)$	Vitesse de rotation du rotor.
$C_u$	Couple moteur généré.
$C_r$	Couple résistant.
$C_p$	Couple de pertes.
$e(t)$	Force contre électromotrice.
$E$	L'erreur de la position angulaire.
$G1, G2, G3$	Gains de normalisation.
$f$	Coefficient de frottement visqueux.
$i(t)$	Intensité traversant le moteur.
$J$	Moment d'inertie de l'axe du rotor.
$u(t)$	Tension appliquée au moteur.

## II. INTRODUCTION

Face aux prévisions de l'épuisement inévitable des ressources mondiales en énergie fossile, et suite aux

changements climatiques dus à l'effet de serre, le monde commence à s'intéresser aux ressources dites renouvelables dont la principale source est le soleil. Parmi les très nombreux dispositifs optiques permettant de dévier les rayons de soleil pour les concentrer sont les centrales solaires à concentration à tour. Où les héliostats poursuivent la course du soleil et dirigent le rayonnement solaire vers un point unique qui est le foyer de l'installation, placé au sommet d'une tour. L'héliostat se compose de deux éléments essentiels à son fonctionnement, un panneau réflecteur, un dispositif mécanique à deux moteurs qui assure le mouvement de l'héliostat qui sont dans la plupart des cas des moteurs à courant continu [1].

Dans les centrales solaires modernes, les cellules fixes sont des fois utilisées pour concentrer l'énergie solaire, mais les conditions fixées des cellules conduisent à la perte d'une partie de l'énergie le matin et le soir chaque jour qui diminue forcément l'efficacité de ces centrales solaires [1].

Plusieurs auteurs ont étudié les systèmes de poursuite de soleil avec différentes applications pour améliorer l'efficacité des systèmes solaire en ajoutant des équipements de suivi à ces systèmes [2] - [5]. L'utilisation d'un mécanisme de poursuite augmente la quantité d'énergie solaire reçue par les panneaux solaires ce qui donne une puissance de sortie plus élevée. La quantité de l'énergie solaire disponible dépend également de l'emplacement. Généralement, la quantité d'énergie solaire utilisable dépend de l'énergie solaire disponible, ainsi d'autres conditions météorologiques, la technologie utilisée, et l'application prévue. Les suiveurs de soleils étaient des systèmes à boucle ouverte, mais en vue d'augmenter l'efficacité de ces centrales, des boucles fermées doivent être considérées. Certains algorithmes ont été conçus pour mettre en œuvre le système de suivi du soleil [6]. Parmi ces algorithmes, la logique floue qui est l'un des meilleurs algorithmes utilisés pour contrôler les centrales [7], [8].

Cet article s'intéresse spécifiquement des héliostats et leur commande en vue de la poursuite du soleil.

## III. COMMANDE DE L'HELIOSTAT



Pour assurer le pointage de l'héliostat sur un point-cible au niveau de récepteur en haut de la tour, il faut d'abord calculer la position du soleil qui détermine le rayon incident I, puis calculer les coordonnées du rayon réfléchi R, ensuite calculer les coordonnées de la normale N au réflecteur.

$$\begin{cases} x_R = \frac{x_c - x_H}{M_R} \\ y_R = \frac{y_c - y_H}{M_R} \\ z_R = \frac{z_c - z_H}{M_R} \end{cases} \quad (1)$$

Avec :  $M_R = \sqrt{(x_c - x_H)^2 + (y_c - y_H)^2 + (z_c - z_H)^2}$

#### A. Calcul de la consigne

La consigne dans ce cas est la position angulaire que doit prendre les deux moteurs de l'héliostat pour assurer une meilleure réflexion de rayon incident, en tenant compte de la position de l'héliostat et les coordonnées de point-cible [9].

La position du soleil sur l'horizon est définie par deux angles (Fig. 1) :

- L'angle de site  $\theta_I$  compté à partir de l'horizon positivement vers le haut.
- L'angle d'azimut  $\phi_I$  compté à partir du sud positivement vers l'est.

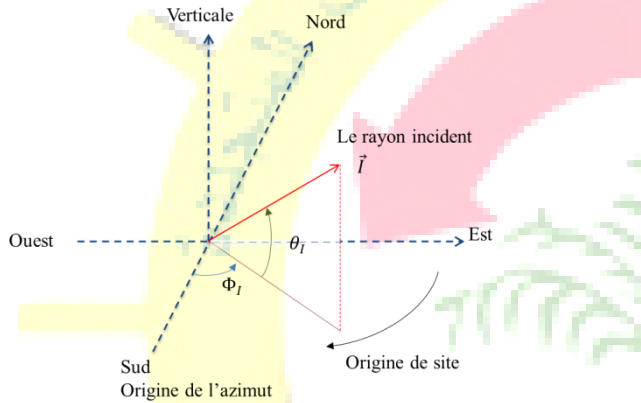


Fig. 1 Repère de calcul du rayon incident

Dans notre étude, pour déterminer l'angle site et l'angle azimut nous utilisons l'environnement de simulation TRNSYS. Le type 15-6 est destiné pour calculer les propriétés météorologiques en utilisant un fichier météo généré par un autre logiciel.

Nous utilisons un fichier météo pour la région de BECHAR.

#### B. Calcul du rayon réfléchi

Le rayon réfléchi par l'héliostat doit atteindre le point-cible qui est défini par ces coordonnées cartésiennes  $(x_c, y_c, z_c)$  exprimées dans le repère de Lambert  $R(O, X, Y, Z)$ .

Le vecteur réfléchi  $\vec{R}$  dépend de ces coordonnées  $(x_c, y_c, z_c)$  et des coordonnées  $(x_H, y_H, z_H)$  du centre de miroir définies dans le même repère. Les composantes  $(x_R, y_R, z_R)$  du vecteur réfléchi résultent des équations suivantes :

#### C. Calcul de la normale

La normale est la bissectrice de l'angle formé par les vecteurs incident  $\vec{I}(\theta_I, \phi_I)$  et réfléchi  $\vec{R}(x_R, y_R, z_R)$ . Le calcul de la normale sert à déterminer les deux grandeurs de la commande qui sont l'angle de site  $\theta_N$  et l'angle  $\phi_N$  d'azimut (Fig. 2) [10].

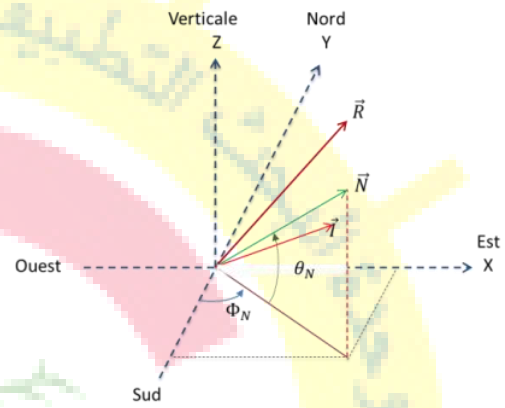


Fig. 2 calcul de la normale

En posant :

$$U = \cos\theta_I \cdot \cos\phi_R - y_R \quad (2)$$

$$V = \sin\theta_I \cdot \cos\phi_R + x_R \quad (3)$$

$$W = \sin\theta_I + z_R \quad (4)$$

On peut démontrer facilement que :

$$\begin{cases} \phi_N = \text{Arc tg} \frac{U}{V} & \text{si } U > 0 \\ \phi_N = \text{Arc tg} \frac{U}{V} + \text{Signe}(V) \cdot \pi & \text{si } U < 0 \\ \phi_N = \text{Signe}(V) \cdot \frac{\pi}{2} & \text{si } U = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Et :

$$\begin{cases} \theta_N = \text{Arc tg} \frac{W}{\sqrt{U^2 + V^2}} & \text{si } U \neq 0 \text{ ou } V \neq 0 \\ \theta_N = \text{signe}(W) \cdot \frac{\pi}{2} & \text{si } U = 0 \text{ et } V = 0 \end{cases} \quad (6)$$

#### D. Modélisation du MCC

Le moteur à courant continu peut être modélisé par le biais d'équations électrique, électromécanique et mécanique [11].

Ces trois groupes d'équations nous permettent de mieux appréhender le moteur à courant continu dans son



fonctionnement réel. Du côté électrique nous pouvons dire que le moteur à courant continu se définit par un circuit d'induit et un circuit inducteur ; l'induit de la MCC peut être vu comme une résistance et une inductance en série avec une source de tension commandée et proportionnelle à la vitesse [11].

Du côté mécanique, nous représentons la machine à courant continu par l'inertie de l'induit augmentée de celui de la charge entraînée.

La figure Fig. 3 montre le schéma équivalent du moteur à courant continu.

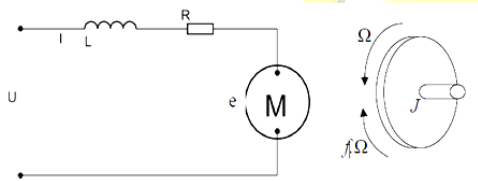


Fig. 3 Schéma équivalent d'un MCC

D'après la loi de Newton, combiné à des lois de Kirchhoff, On peut écrire les équations différentielles de premiers ordres suivantes :

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (7)$$

$$e(t) = K_e \Omega(t) \quad (8)$$

D'après le principe fondamental de la dynamique nous avons :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_u - C_r \quad (9)$$

$$C_u = K_c i(t) - C_p \quad (10)$$

$$C_r = f\Omega(t) \quad (11)$$

On suppose que le moment du couple de pertes (qui est vu comme une perturbation) est négligeable devant le moment du couple électromagnétique.

Après avoir calculé la transformée de Laplace des équations différentielles précédentes, et après avoir choisir le vecteur d'état, nous pouvons déduire la représentation d'état du système considérée donnée par l'expression matricielle:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}(t) \\ \dot{\Omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_e}{L} \\ \frac{K_c}{J} & -\frac{f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ \Omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t) \\ C_p(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

#### IV. CONCEPTION DU REGULTEUR FLOU

Le régulateur flou utilisé est de type MAMDANI, qui est construit autour d'un organe de décision manipulant des règles subjectives et imprécises.

La première étape pour la réalisation d'un régulateur flou est de choisir ses variables d'entrées et de sorties, savoir avec quels paramètres on peut obtenir la commande, et définir les univers de discours de ses variables [12].

Les entrées du système sont l'erreur de la position angulaire  $E$  et sa dérivée  $\dot{E}$ .

$$\text{Avec : } E = \Omega_{ref} - \Omega_r$$

Les sorties du régulateur sont les tensions  $U$  qui alimentent les moteurs à courant continu.

##### A. Réglage de la sensibilité du régulateur

On peut changer la sensibilité du régulateur flou sans changer sa structure interne à l'aide des gains dits facteurs d'échelle (Fig.4) qui sont placés en entrée et en sortie du contrôleur flou.

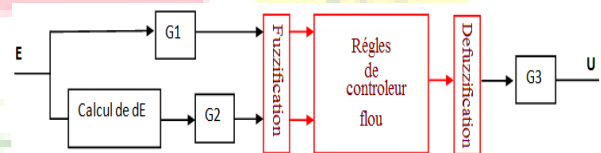


Fig. 4 Schéma synoptique du régulateur flou avec réglage

##### B. Les ensembles flous entrée-sortie

Nous avons commencé notre étude avec des ensemble flous des variables d'entrée et de sortie défini par des fonction d'appartenance de 3, 5 puis 7 ensemble. Après la comparaison des résultats, nous avons constaté que le régulateur à sept ensembles donne de meilleurs résultats.

Les sept ensembles flous qui caractérisent les variables entrée/sortie du régulateur flou sont les suivants:

- NG : Négative grande
- PP : Positive petite
- NM : Négative moyenne
- PM : positive moyenne
- NP : Négative petite
- PG : Positive grande
- EZ: Environ zéro

Les fonctions d'appartenance sont représentées dans Fig. 5.

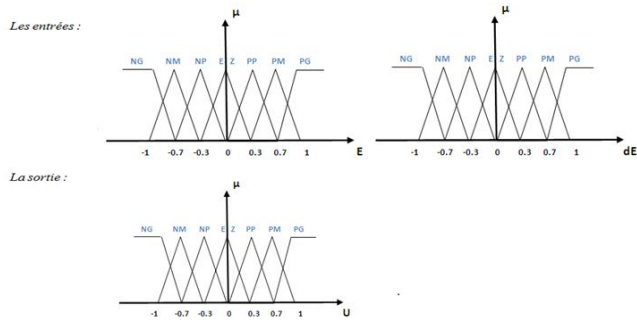


Fig. 5 Fonctions d'appartenance à sept ensembles

Le jeu de règles du régulateur flou à sept ensembles est représenté dans le TABLE II.

TABLE II  
Table de règles à sept fonctions d'appartenance

E dE	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	EZ	PG
NM	NG	NG	NG	NM	NP	EZ	PP
NP	NG	NG	NM	NP	EZ	PP	PM
EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
PP	NM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG
PM	NP	EZ	PP	PM	PG	PG	PG
PG	EZ	PP	PM	PG	PG	PG	PG

## V. RESULTATS ET DISCUSSION

### A. Application des régulateurs flous à la commande des moteurs à courant continu

On applique les régulateurs flous à la commande de moteur à courant continu en fixant la consigne à 10 rad. Fig. 6 présente les résultats de simulation, à savoir la position angulaire, le courant, la vitesse angulaire, et l'erreur de position angulaire.

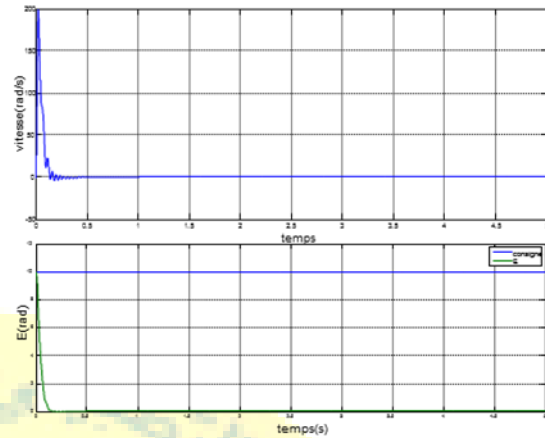
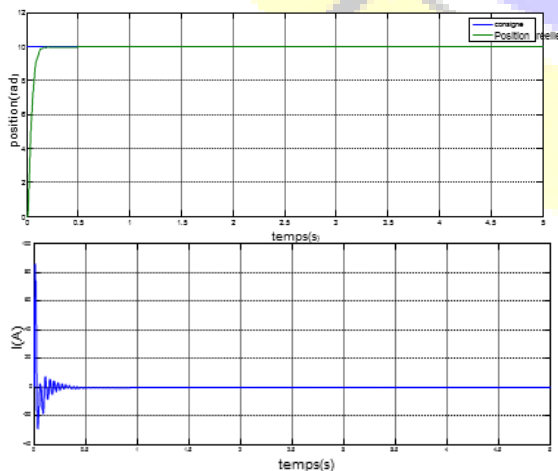
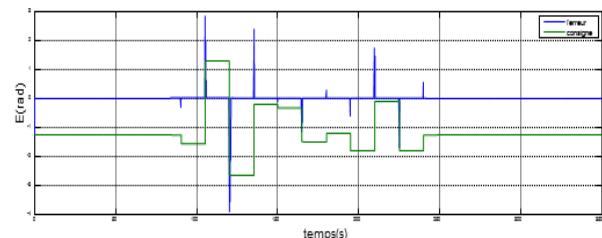
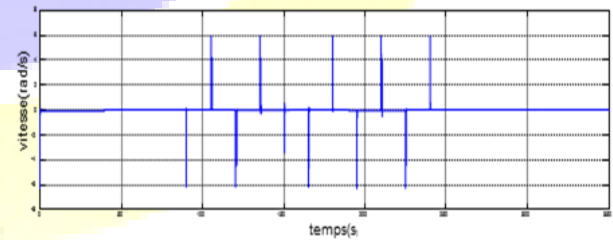
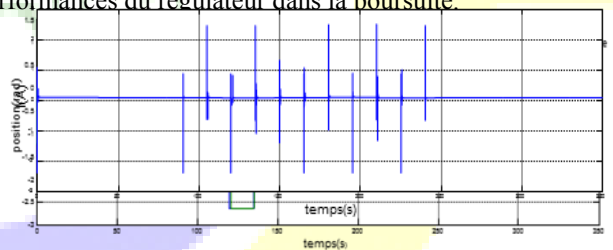


Fig. 6 Simulation de la commande avec un régulateur flou à sept ensembles. Les résultats donnés par le régulateur flou à sept ensembles montrent que le suivi de la consigne est parfait car l'erreur de position s'annule très rapidement dans un temps inférieur à 0.3 s.

Donc nous proposons ce dernier régulateur pour l'appliquer à la commande de l'héliostat (la poursuite).

### B. Application de régulateur flou à sept ensembles pour la poursuite

La simulation du régulateur flou à sept ensembles nous permet de tracer les courbes de Fig. 7 et Fig. 8. Les différentes courbes sont obtenues pour une consigne variable pour étudier les performances du régulateur dans la poursuite.



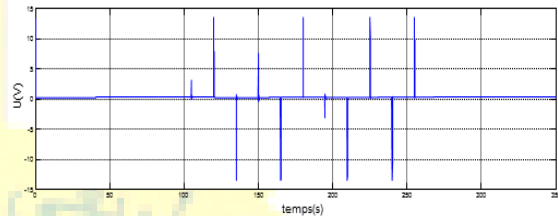


Fig. 8 Simulation de la commande pour l'angle site

Fig. 7 Simulation de la commande pour l'angle azimut

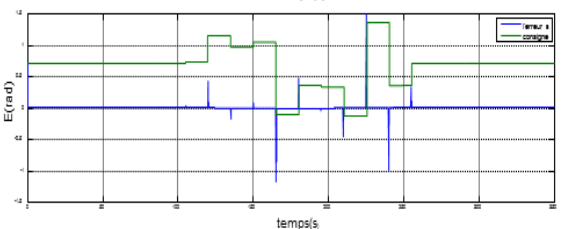
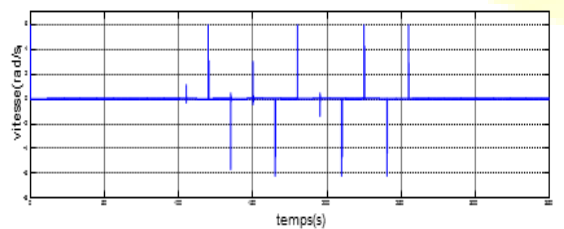
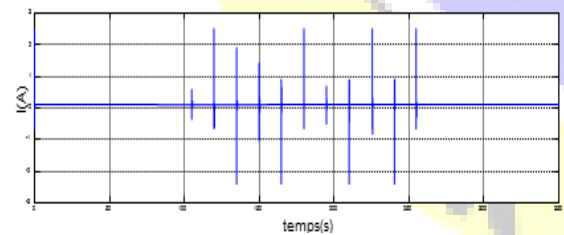
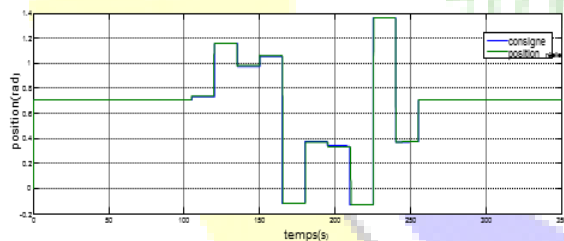
Nous obtenons les courbes de position angulaire, vitesse angulaire, de courant, de l'erreur de position, ainsi que la tension de commande.

Du moment où l'héliostat a deux degrés de liberté, l'azimut et le site, nous faisons la simulation pour les deux angles.

La position du soleil, qui est la consigne variable, est obtenue à partir d'un fichier météorologique, de la région de Bechar.

L'angle considéré en premier lieu est l'azimut Fig. 7.

La même étude de simulation est faite pour l'angle site. Ainsi, nous obtenons les courbes de Fig. 8.



Dans cet essai on constate qu'il y a une similitude entre ces courbes de position (azimut et site).

Nous remarquons aussi le temps de réponse de régulateur flou appliqué est minimale (régulateur rapide) et le dépassement est aussi minimale par rapport à la consigne, sans vraiment forcé le moteur.

Notre régulateur a montré une bonne fiabilité prouvé lors d'une variation de consigne. Nous remarquons que la position suit de façon parfaite la trajectoire de référence.

D'où on déduit sa parfaite poursuite du soleil le long de la journée, qui est l'objectif principale de notre étude.

## VI. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons utilisé un régulateur flou pour une commande des deux mouvements d'un héliostat (site et azimut). Le régulateur est testé d'abord dans le cas de la commande ; où il montre sa robustesse. Puis, il est testé dans le cas de la poursuite. Des données météorologiques de la région de Bechar ont été utilisées pour calculer la consigne recherchée, qui est la position du soleil. Nous avons pu conclure que le régulateur flou présente des bonnes performances.

## VII. REFERENCES

- [1] H. Mousazadeh et al. "A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, vol. 13, no 8, p. 1800-1818.
- [2] S. Abdallah, "The effect of using Sun tracking systems on the voltage-current characteristics and power generation of a flat plate photovoltaics", Energy conversion and management, 2004, vol. 45, no 11, p. 1671-1679.
- [3] A. Al-Mohamad., "Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system", Applied Energy, 2004, vol. 79, no 3, p. 345-354.
- [4] Abdallah A, Nijmeh S., "Two axes Sun tracking system with PLC control", Energy conversion and management, 2004, vol. 45, no 11, p. 1931-1939.



## Le 3<sup>ème</sup> Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

### The 3<sup>rd</sup> International Seminar on New and Renewable Energies

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



- [5] S. Kalogirou., "Design of a fuzzy single-axis Sun tracking controller", International Journal of Renewable Energy Engineering, 2002, vol. 4, no 2, p. 451-458.
- [6] D. P. Hohmand, M. E. Ropp, "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms", Prog. Photovolt, 2003, Vol. 11, pp. 47-62.
- [7] L. Chuen Chien, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics , Vol. 20, No. 2, March-April 1990, pp. 404-418.
- [8] H. Peng, T. Du, W. Gu, "Application design of a sun-tracking system". In : Control and Decision Conference (CCDC), 2013 25th Chinese. IEEE, 2013. p. 5094-5098.
- [9] A. Achaihou, C. Bourdeau, "Commande numérique d'un champ d'héliostats d'une centrale solaire à tour". Revue de Physique Appliquée, 1980, vol. 15, no 3, p. 383-391.
- [10] M. M. Ardehali, S. H. Emam, "Development, design and experimental testing of fuzzy-based controllers for a laboratory scale sun-tracking heliostat". Fuzzy Information and Engineering, 2011, 3(3), 247-257.
- [11] P. Barret, *Machines Electriques*, Ellipses, 2002.
- [12] B. TOUAL « Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation », université de HADJ Lakhdar BATNA, 2010.

