



Contribution à la Commande d'Héliostat pour Centrale à Tour

A.Takilalte, A. Rennane, N.Said et A.Hamidat

Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
BP 62 Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340, Algiers, Algeria

E-mail : a.takilalte@cder.dz, a.rennane@cder.dz, n.said@cder.dz et a.hamidat@cder.dz

Résumé— Il s'agit de l'étude et de la conception d'une commande d'un prototype d'héliostat pour centrale à tour. L'héliostat est doté de deux moteurs pas à pas (MPP) à aimant permanent lui permettant de suivre le soleil dans sa course diurne à l'aide des équations astronomiques. Cette commande micro programmée se base sur l'utilisation d'un microcontrôleur de type Microchip PIC16F876, elle permet de corriger l'incidence normale pour réfléchir à tout instant (en temps réelle) les rayons incidents au récepteur situé au sommet de la tour. La conception de la carte de commande ainsi que sa logique de fonctionnement sont proposées. L'étude de fonctionnement correcte de moteur et les critères de choix qui doivent être remplis, sont validés par des simulations détaillées.

Mots-clés — Héliostat, Conception, Commande micro programmé, Centrale à tour, moteur pas à pas à aimant permanent.

I. INTRODUCTION

Les centrales solaires à tour offrent une alternative sérieuse pour la production d'électricité d'origine renouvelable [1]. Ils restent avec la technologie des cylindro-paraboliques, l'option la plus prometteuse pour la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique pour les puissances élevées [2]. Leur rendement moyen annuel atteint les 20 % avec un cout actualisé du kWh de l'ordre de 12 DA dans un site bien ensoleillé. Le champ optique des centrales à tour, composé exclusivement d'héliostats, représente près de 40 % du cout d'investissement de la centrale et est le maillon faible de la chaine de conversion énergétique. Avec un rendement d'environ 55 % à l'état actuel de la technologie, nombreux sont les centres de recherche/développement qui continuent à le parfaire [3].

Notre héliostat est contrôlé par un microcontrôleur [4] PIC16F876. L'algorithme qu'il utilise calcule, à partir de la théorie astronomique, où le soleil est dans le ciel. Le calcul prend en compte à la fois des mouvements quotidiens et saisonniers du soleil. Lorsque la position du soleil a été calculée, elle est combinée avec la direction dans laquelle la lumière doit être réfléchi, qui doit également être prévue, pour calculer la direction de la bissectrice requise [5]. Le PIC envoie alors des signaux de commande à des moteurs qui font tourner le miroir à l'orientation correcte. Ce processus est

répété toutes les secondes, de sorte que le miroir est maintenu correctement aligné.

II. L'ALGORITHME DU SYSTEME DE POURSUITE

Il existe différents types de poursuite d'héliostat, le meilleur du point de vue performances est la poursuite dite «Alta-Azimuthale» [6, 7, 8].

La position de l'héliostat varie suivant les coordonnées géométriques propres à chaque site. Dans ce qui suit, on va définir tous les éléments pour le calcul des angles nécessaire à la poursuite solaire dans une centrale à tour. Les caractéristiques de la poursuite d'un héliostat en azimut-élévation sont schématisées dans la Figure 1, et la géométrie de l'héliostat relative à la tour et au soleil est illustrée dans la Figure 3.

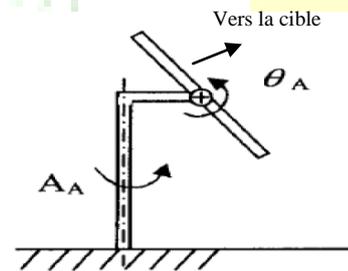


Fig. 1 Héliostat azimut-élévation

Les expressions mathématiques pour cette méthode de poursuite solaire, sont présentées brièvement ici. L'angle d'azimut A_A et l'angle d'élévation θ_A sont donnés par [9, 10] (voir figure 2) :

$$A_A = \text{Arcsin} \left(\frac{\cos \theta \sin \alpha + \cos \alpha \sin \theta}{2 \cos \theta \cos \theta_A} \right) \quad (1)$$

$$\theta_A = \text{Arcsin} \left(\frac{-\sin \theta + \sin \alpha}{2 \cos \theta} \right) \quad (2)$$

Avec : A : l'angle azimutale.
 θ : l'angle d'incidence.
 α : la hauteur du soleil.



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

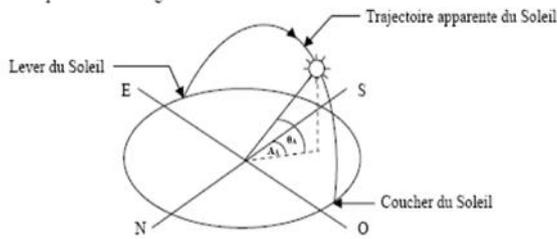


Fig.2 Mouvement apparent du Soleil observé dans le site d'héliostat.

$$\theta = 0.5 \text{ ArcCos}(-\sin\gamma \sin\alpha + \cos\gamma \sin\varphi \cos\alpha \sin A + \cos\gamma \cos\varphi \cos\alpha \cos A) \quad (3)$$

$$\alpha = \text{Arc Sin}(\sin\delta \sin\theta + \cos\delta \cos\omega \cos\theta) \quad (4)$$

$$A = \text{ArcCos}[(\sin\delta \cos\theta - \cos\delta \cos\omega \sin\theta) / \cos\alpha] \quad (5)$$

δ : Angle déclinaison.

$$\sin\delta = 0.4 \sin JD \quad (6)$$

Avec:

$$JD = (360/365)(n - 81) \quad (7)$$

n : étant le quantième de l'année (depuis le 1er janvier).
 ω : L'angle horaire.

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (8)$$

TSV : Le temps solaire vrai peut s'écrire de la forme suivante :

$$TSV = TL - DE + \left(\frac{E_t + L}{60}\right) \quad (9)$$

TL : est le temps donné par une montre.

DE : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (Égale 1 pour l'Algérie).

L : longitude de lieu.

E_t : la correction de l'équation des temps.

$$E_t = 9.87 \sin(2JD) - 7.53 \cos(JD) - 1.5 \sin(JD) \quad (10)$$

Les temps de lever et coucher de soleil [11, 12]

Le module ω_1 de l'angle horaire au lever du soleil s'obtient par

$$\cos\omega_1 = -\tan\varphi \tan\delta \quad (11)$$

L'heure solaire au lever du Soleil a donc pour valeur :

$$(TSV)_1 = 12 + \frac{\omega_1}{15} \quad (12)$$

L'angle horaire ω_c au coucher du Soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc : $\omega_c = -\omega_1$.

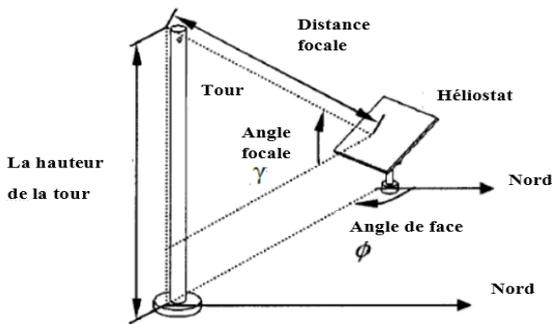
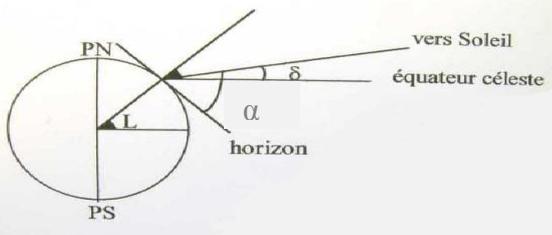


Fig.3 La définition des paramètres géométriques utilisés :
En haut, la géométrie de l'héliostat relative au soleil.
En bas, la géométrie de l'héliostat relative à la tour.

γ : l'angle focal.

ϕ : Angle de face.

φ : Latitude de lieu .

III. SIMULATION DE LA CARTE DE COMMANDE PAR LOGICIEL DE PROTEUS

Pour le développement de nos circuit, on a procédé à le subdiviser en trois étages (voire les figures 4 et 5) :

A. Le PIC : [13] Le choix du PIC16F876 a été lié principalement aux ressources internes qu'il dispose et qu'on en a besoin dans l'application envisagée tels qu'ils sont exploités d'une façon optimale.

- Dans un première temps, on a déterminé le nombre d'entrées/sorties nécessaires : RA(0-3),RB(0-3); qui sont utilisés respectivement pour l'envoi des signaux de commande au moteur de l'azimut et de l'élévation.
- Ensuite, on a déduit que l'application nécessite un TIMER (Timer0), et un chien de garde (watchdog) avec leurs Prescalers, pour pouvoir synchroniser



respectivement « le temps du lever et du coucher du soleil » calculés auparavant. Ainsi qu'on a besoin de 2 autres 'Timers' pour implémenter l'horloge qui sert à obtenir le temps (TL) et la date (n).

- La rapidité d'exécution est prise égale à 20Mhz de telle sorte que le PIC puisse faire les calculs et la commande en temps réelle.
- La longueur du programme ne dépasse les 8 bytes, afin de déterminer la taille de la mémoire EEPROM flash du PIC recherché.
- La taille de la RAM interne pour mémoriser des données est également importante pour l'application en question.

B. Circuit de Commande (Driver): Lorsqu'on veut commander le sens de circulation du courant d'une phase de moteur MPP, on est souvent obligé d'inverser la polarité. La solution est d'utiliser le pont en H (figure 6) [14].

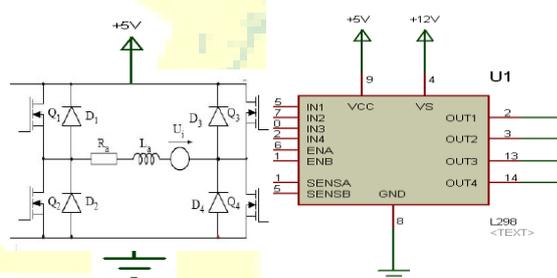


Fig. 6 A gauche : Pont en H, A droite : circuit L298

Dans le but de simplifier la carte électronique et de diminuer son coût, son encombrement et sa consommation, on a décidé de remplacer les 8 transistors MOS par un seul circuit intégré L298 (figure 6) [15, 16]. Le circuit L298 contient en interne 2 ponts en H et permet de piloter séparément les 2 phases de MPP.

Les entrées INx permettent de modifier le sens de circulation de courants dans les phases.

Les entrées ENx (EN=enable=validation) permettent de mettre en marche ou d'arrêter la phase.

Les entrées SENSx permettent de modifier l'amplitude de tension des phases.

C. Le Moteur : [17, 18] On a opté pour le moteur pas à pas à aimant permanent car il répond au cahier de charge prédéfini pour notre application et surtout ce qui concerne la grande précision de positionnement :

- Moteur de positionnement (positionnement simple à moins d'un degré près).
- Très précis.

- Couple important.
- Coût très bas du moteur.
- Couple de maintien à l'arrêt même sans alimentation.

IV. L'ORGANIGRAMME DE COMMANDE DE POURSUITE ALTAZUMUTAL

Il nous reste à déterminer la logique de commande des moteurs pour assurer les mouvements des héliostats (voir la figure 7).

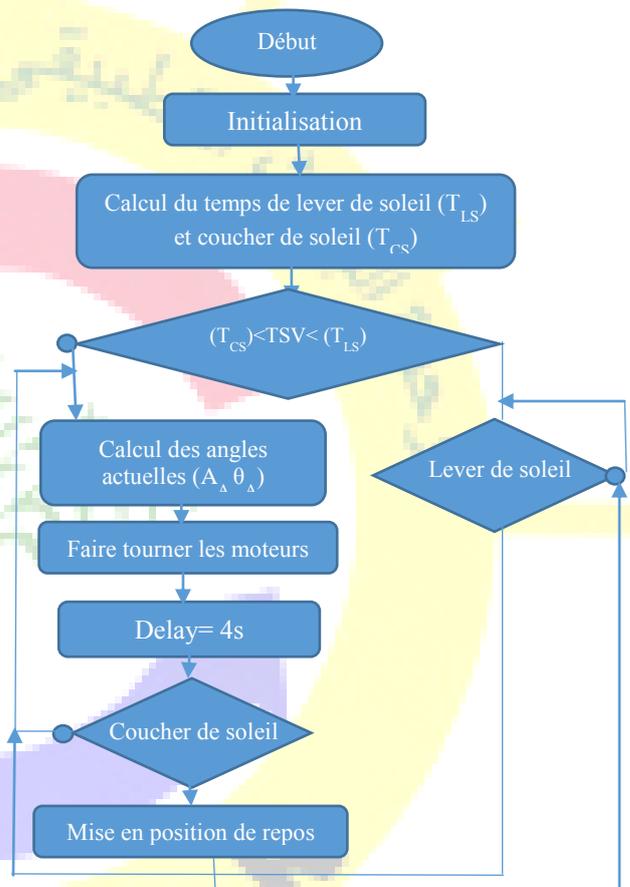


Fig. 7 Organigramme de commande de l'héliostat

A. Principe de Fonctionnement

Dès la mise sous tension de la carte électronique, le PIC s'initialise. L'information qui doit être disponible est tout simplement la position de l'héliostat par rapport à la surface de la terre, comme la latitude et la longitude ; la position d'héliostat par rapport à la tour définit par : l'angle focale, angle de face qui sont enregistrés en tant que constantes. Le



programme d'initialisation charge également l'heure (TL) et la date (n). L'héliostat doit être au repos c.-à-d. à $A_A=+90^\circ$ (orienté vers l'EST) et $\theta_A=90^\circ$ (parallèle au sol) pour diminuer la surface de frottement des miroirs d'héliostat aux éventuelles souffles de vent violent.

Après, le programme calcule le temps de lever du soleil (T_{LS}) et du coucher du soleil (T_{CS}), et il va déclencher le **TIMER0** et **WATCHDOG** qui commence à compter respectivement les différences $/TL - T_{LS}/$ et $/TL - T_{CS}/$ jusqu'à la fin du comptage :

- **TIMER0** : envoie une interruption interne (logicielle) qui se traduit par l'application du sous-programme du travail mentionné ci-après.
- **WATCHDOG** : envoie l'interruption 'reset'.

En attendant ces derniers, le système doit identifier la période de la journée :

- Si $T_{CS} < TL < T_{LS}$: on est dans la nuit, donc l'héliostat reste en sommeil.
- Sinon, il branche à la phase du travail.

B. Sous - Programme de Travail

Pour chaque moteur, à l'instant t, le PIC calcule les équations des angles solaires du lieu (α, A, θ, \dots) et les angles actives des moteurs (A_A, θ_A), pour faire tourner en azimut/élévation le miroir mobile en nombre de pas qu'il faut : $\Delta\theta/\text{pas}$ du moteur.

Tel que : $\Delta\theta = |\theta_{\text{Actuel}} - \theta_{\text{précédent}}|$

Le signe de la différence $\Delta\theta$ détermine le sens de rotation : en avant ou en arrière.

Une fois qu'on a l'azimut et l'élévation solaire à un instant donné, il suffit de laisser couler le temps (qui a été choisi ici : 4 s) et de le modifier à intervalles réguliers pour la position du miroir.

Ce processus sera répété jusqu'à l'attente du signal d'interruption de **TIMER0** qui renseigne sur le coucher soleil, d'où l'héliostat se met à l'état de repos et attend le prochain lever du soleil (signal d'interruption du **WATCHDOG**) qui entraîne le redémarrage du programme principale dès le lever de la journée suivante.

V. MODELISATION DU MOTEUR PAS A PAS A AIMANT PERMANENT

Toute la simulation travaille sur un modèle. Il apparaît donc impératif de connaître au mieux les équations de l'ensemble, pour le simuler correctement. Donc, dans cette partie, il sera présenté brièvement la modélisation du moteur pas à pas à aimant permanent.

Avant d'aborder les équations, on pose les hypothèses simplificatrices suivantes [17] :

- On néglige la variation de réluctance liée à la rotation.

- Force contre électromotrice sinusoïdale.
- Nous négligeons la saturation des dents.
- Pas de fuite.
- Entrefer très faible
- Pas de couplage entre les phases, les aimants sont parfaits, les inductances mutuelles sont alors nulle.

A. Equations des Tentions

Les expressions des tensions U_α et U_β aux bornes des deux phases (figure 8) α et β respectivement, sont :

$$U_\alpha = RI_\alpha + L \frac{dI_\alpha}{dt} - Kw \sin(N_r \theta) \quad (13)$$

$$U_\beta = RI_\beta + L \frac{dI_\beta}{dt} + Kw \cos(N_r \theta) \quad (14)$$

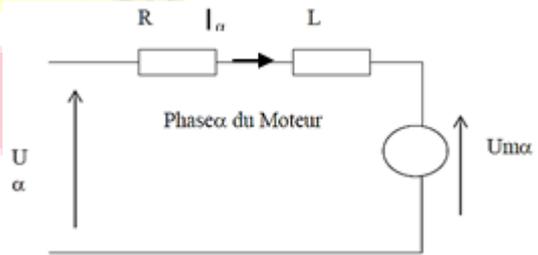


Fig. 8 Schéma équivalent d'une phase du moteur.

Avec :

- N_r : nombre de dents rotorique.
- K : Constante de couple.
- θ : Angle de position mécanique.
- $w = d\theta/dt$ vitesse mécanique de rotation.

B. Equation de Couple

Le couple dynamique développé par un moteur à aimant permanent est essentiellement dû à la variation du flux envoyé par l'aimant à travers les deux phases. Son expression est donné par :

$$C_\varepsilon = -K(I_\alpha \sin(N_r \theta) - I_\beta \cos(N_r \theta)) \quad (15)$$

L'application d'un couple résistant C_r permet d'écrire :

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = C_\varepsilon - C_r \quad (16)$$

Avec J , le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes du rotor.



VI. SIMULATION DES DIFFERENTS PARAMETRES DU MOTEUR
PAS A PAS A AIMANT PERMANENT PAR MATLAB

On a présenté le modèle mathématique du moteur pas à pas à aimant permanent. Dans ce qui suit, on va illustrer la simulation qui a été effectuée par le logiciel SIMULINK sous MATLAB, pour voir le comportement du moteur qui est une phase primordiale pour l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d'une part et d'autre part pour l'élaboration des commandes.

A. Résultats de la Simulation

On simule le comportement du moteur pas à pas à aimant permanent qui va entrainer un petit poids d'un prototype d'héliostat pèse environ de 6 Kg et dont le couple résistant ne dépasse pas 1 Nm, sur cette base, les caractéristiques du moteur sont choisies. Il suffit après d'augmenter l'ordre des grandeurs pour un modèle l'échelle réelle. Le moteur est alimenté sous une tension en mode deux [19] de 5V. Les résultats de la simulation pour $f=10\text{Hz}$ à vide et en charge et $f=50\text{Hz}$ à vide sont rassemblés dans la figure 9.

Les paramètres de moteur pas à pas utilisés en simulation sont donnés en annexe.

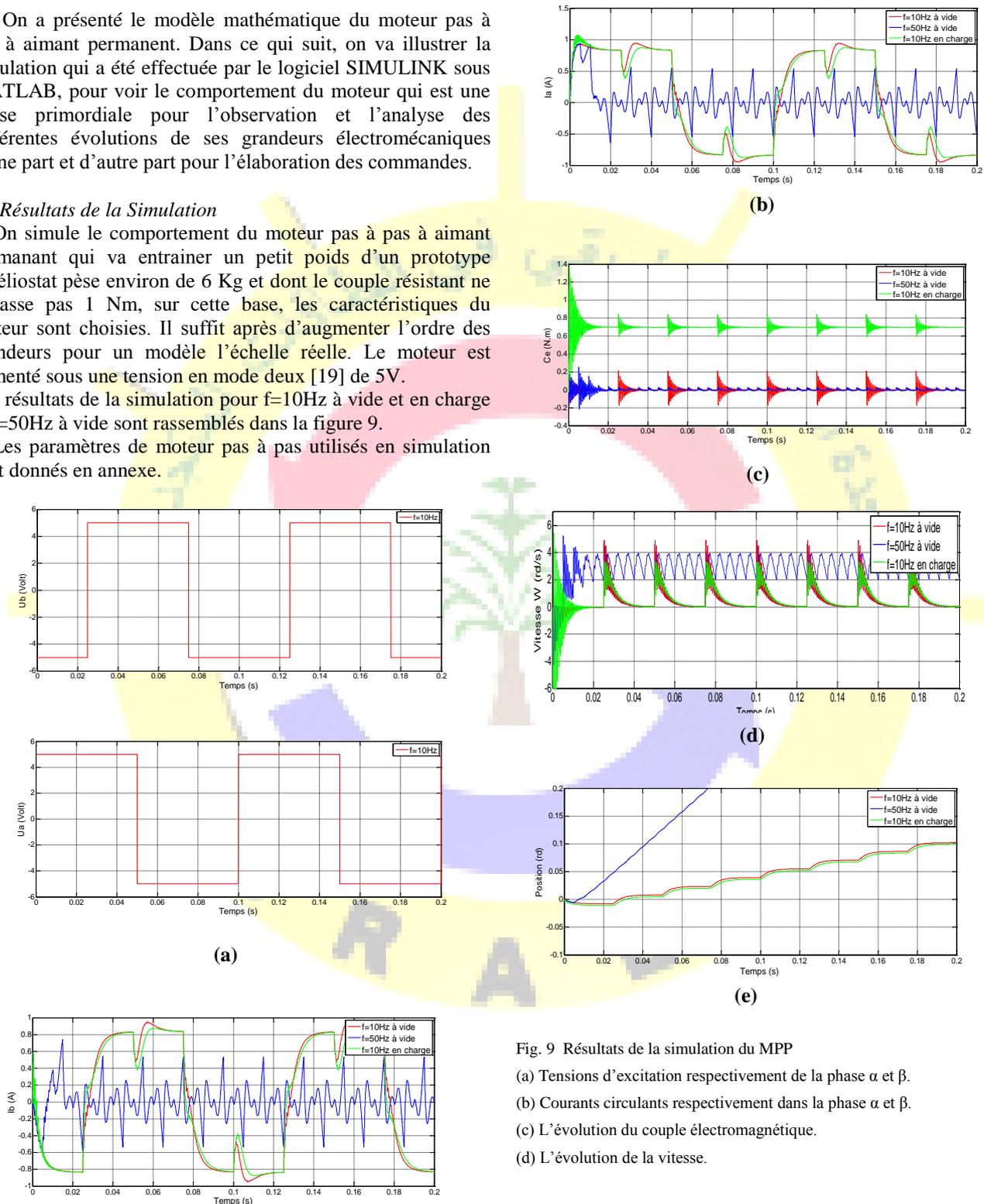


Fig. 9 Résultats de la simulation du MPP

- (a) Tensions d'excitation respectivement de la phase α et β .
- (b) Courants circulants respectivement dans la phase α et β .
- (c) L'évolution du couple électromagnétique.
- (d) L'évolution de la vitesse.



(e) L'évolution de la position.

B. Interprétation et Discussion

L'observation de ces courbes montrent que pour la fréquence $f=10\text{Hz}$ (fig.9-a), la durée séparant deux commutations successives vaut $T/4=0.025\text{s}$ (temps de déphasage des excitations U_a et U_b) est supérieure au temps de réponse du moteur lui même s'il y a une charge à entraîner. Dans ce cas, les inductances des phases peut se charger et se décharger complètement inscrivant un courant max atteint jusqu'à 1A (fig.9-b) permettant de développer un couple moteur qui démarre fort et ne cesse à décroître en tendant à la position voulue (fig.9-c). Donc, le rotor peut s'arrêter à chaque pas de 1.8° (0.031rd), on peut ainsi démarrer le moteur, le faire tourner puis l'arrêter sans que l'on ait à craindre de perte de pas (fig.9-e), ce qui nous arrange dans notre application pour des raisons de précision.

Par contre dans le cas des fréquences élevés comme $f=50\text{Hz}$, la position croit régulièrement. On remarque aussi que la vitesse de rotation (fig.9-d) est proportionnelle à la fréquence de commutation, et le mouvement commence à grande vitesse au vu du couple développé au début et diminue jusqu'à l'arrêt de moteur s'il n'est plus excité à nouveau et on constate qu'il est négative dans le régime transitoire.

On constate aussi qu'en augmentant la fréquence (vitesse), le couple électromagnétique (fig.9-c) se dégrade considérablement, ce qui est indésirable dans notre application où le facteur le plus intéressant est le couple fort vu que l'on n'a pas besoin de grande vitesse.

On applique un couple résistant de 0.7Nm , le moteur suit parfaitement sa consigne (suit la variation de la charge des miroirs d'héliostat) avec un dépassement au début à cause de l'inertie des parties tournantes.

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

On a proposé une commande purement numérique et programmable d'un héliostat à deux degré de liberté pour suivre le soleil pendant toute la journée, et réfléchir le maximum de rayonnement vers la cible afin d'atteindre des hautes températures.

On repose sur des équations astronomiques décrivant la course du soleil, qui peuvent être implémentés dans un PIC sans besoins des capteurs du lumières [20, 21], ceux qu'on appelle la poursuite aveugle qui est une méthode récemment adoptée.

Les performances sont liées aussi au choix juste de type et des caractéristiques de moteur.

L'héliostat doit être ajusté de sorte qu'il soit toujours orienté avec précision et cela à l'aide des moteurs pas à pas ce qui permet un positionnement précis sans boucle d'asservissement.

Les résultats nous montrent que les réponses suivent exactement la consigne lors des variations de charge où la position voulue est atteinte dans un temps de réponse convenable.

Perspectives

En continuité de ce travail, on propose quelques perspectives qu'on peut envisager suite à ce travail et se traduisent par :

- L'application d'autres techniques de commande tels que la logique flou et réseaux neurone, commande par micro-ordinateur et à distance, du fait que les moteurs pas à pas sont bien adaptés à la commande numérique.

- Intégration dans la conception de la logique de commande des mesures de sécurité et les éventuels scénarios comme les passages nuageux, souffle de vent violent, surchauffe de récepteur etc. [22]. Ces contraintes doivent être prises en considération pour un fonctionnement fiable et optimale du système.

Annexe : Paramètres de moteur simulé.

$R=6\Omega$

$L=7\text{mH}$

$J=0.00001\text{Kg.m}^2$

$K=2\text{Nm/A}$

$N_p=100$

Pas= 1.8° (moteur à 200 pas).

REFERENCES

- [1] S. Zanier, Photorécepteurs, Agrégation de Physique – UJF Grenoble, 2008/09.
- [2] A. Gamal et al, Etude et réalisation d'un concentrateur cylindro parabolique avec poursuite solaire aveugle, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11 N°3, 2008, pp. 437– 451.
- [3] Feuille de route solaire thermodynamique - Ademe, www.ademe.fr.
- [4] T. Bendib et al, Commande automatique d'un système de poursuite solaire à deux axes à base d'un microcontrôleur PIC16F84A, Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4, 2008, pp. 523 – 532.
- [5] Y. T. Chen et al, Non-imaging, focusing heliostat, Solar Energy Vol. 71, No. 3, 2001, pp. 155–164.
- [6] Y. T. Chen et al, Comparison of Two Sun Tracking Methods in the Application of a Heliostat Field, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 126, Février 2004.
- [7] Chong, K.K. et M.H. Tan, Range of motion study for two different sun-tracking methods in the application of heliostat field. Sol. Energy, 2011.
- [8] Minghuan Guo, Properties of a general azimuth–elevation tracking angle formula for a heliostat with a mirror-pivot offset and other angular errors, ScienceDirect - Solar Energy, 2013, pp. 159–167.
- [9] R. Mérat et R. Moreau, physique appliquée, livre édition NATHAN TECHNIQUE ; 1994.
- [10] Oar Aliman et al, Simplification of Sun Tracking Mode to Gain High Concentration Solar Energy, American Journal of Applied Sciences, 2007, pp.167-171.



**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**



- [11] Quoilin Sylvain, les centrales solaires à concentration, université de LIEGE (faculté des sciences appliquées) ; MAI 2007.
- [12] Yves JannoT, Thermique solaire, Octobre 2003.
- [13] Bigonoff, La programmation des PIC : La gamme mid-range par l'étude des 16F87X, seconde partie-Révision 22.
- [14] www.datasheet.com.
- [15] J.D. Wale, C. Pollock, Hybrid stepping motors and drives. IEEE, Power Engeneering Journal, Vol.15. N^o 1, Février 2001, pp. 5-12.
- [16] Moussa Bendjedia, Synthèse de commande sans capteurs de moteurs pas à pas et implantation sur architecture programmable, Thèse de Doctorat, Université de Franche-comte, 2007.
- [17] Kercha Mébarka, Commande par mode de glissement d'un Moteur pas à pas à Aimant Permanent, Mémoire de magister, Université de Batna, 2005.
- [18] Y. T. CHEN et *al*, Report of the first prototype of non-imaging focusing heliostat and its application in high temperature solar furnace, Solar Energy, Vol. 72, No. 6, 2002, pp. 531-544.
- [19] A. Hamzaoui, Modèles Dynamique et Commandes d'un Moteur pas à pas, Thèse Doctorat, 1992.
- [20] M. Haddadi, Élaboration d'une Commande pour Héliostat, Rev. Energ. Ren.: ICPWE, pp.153-157, 2003.
- [21] M.D. Draoul et B. Draoui, Etude, conception et expérimentation d'un système de contrôle pour système suiveur de soleil, Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N^o229 - 238, 2007.
- [22] A. Achaïbou et C. Bourdeau, Commande numérique d'un champ d'héliostats d'une centrale solaire à tour, Revue Phys. Appl. 15, pp. 383-391, 1980.

