

# Modélisation et Simulation de Poursuite Aveugle d'un Héliostat pour Centrale à Tour

A. Takilalte, O. Mahfoud, M. Debbache, H. Karoua, S. Bouaichaoui

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

a.takilalte@cder.dz

o.mahfoud@cder.dz

**Abstract**— Le présent travail est une synthèse et simulation des équations de poursuite Azimut-Élévation (AE) d'un héliostat appartient à un champ d'une centrale à tour. La simulation d'évolution diurne des angles AE nous a permis d'analyser la plage de mouvement en fonction des saisons de l'année et en fonction des positions d'Héliostat dans le champ définies par l'angle focale et l'angle de face. Les simulations établies seront menées par des discussions et des interprétations en tirant des conclusions.

**Mots clés** — Héliostat, poursuite AE, centrale à tour, modélisation, plage de mouvement.

## I. INTRODUCTION

Les centrales solaires à tour (CSP) offrent une alternative sérieuse pour la production d'électricité d'origine renouvelable [1]. Le champ optique des centrales solaire, composé exclusivement des Héliostat, représente près de 40 % du cout d'investissement de la centrale et est le maillon faible de la chaîne de conversion énergétique [2]. Lorsque l'Héliostat est équipé d'un système suiveur, la production électrique atteint alors son maximum [3],[4],[5].

Bien que les modèles des Héliostat contrôlés par capteurs (poursuite sensible) existent, la plupart des Héliostat en opération maintenant, sont contrôlés par des ordinateurs ou microcontrôleurs à partir de la théorie astronomique (poursuite aveugle) [4], [5].

Dans ce travail, la poursuite aveugle Alta-Azimutale de l'Héliostat a été adoptée (Fig. 1). Ceci est doté de deux moteurs d'Azimuth-Elevation (AE) respectivement, lui permettant de corriger à tout instant (en temps réel), les rayons incidents du soleil au cadre de récepteur situé au sommet de la tour [6], [7], [8] (Fig. 3).

La modélisation et la simulation du mouvement d'un Héliostat est indispensable afin d'avoir une idée sur la vitesse et la plage parcourue dans les sens Azimut et Élévation quel que soit les paramètres d'entrées notamment les paramètres géographiques et la position d'Héliostat dans le champ. Aussi, cette étude peut être considérée comme une base, nous sert à valider le système de la poursuite qui sera réalisé ultérieurement.

## II. REPERAGE DE LA POSITION DU SOLEIL

Avant de dériver les équations de poursuite du soleil, les angles indiquant la position du soleil doivent être présentés en premier qui peuvent être décrites mathématiquement par rapport à n'importe quel endroit sur la surface de la terre, par l'angle d'altitude ( $\alpha$ ) du soleil et l'angle d'azimut ( $A$ ). La figure 1 représente la composition du système de coordonnées attaché à la fois au centre de la terre et à la surface de la terre.

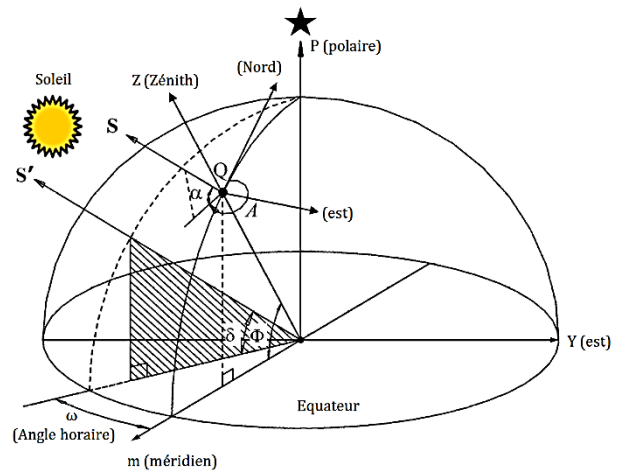


Fig. 1 Repérage du soleil lié au système de coordonnées centre de la terre et surface de la terre [1].

Dans le système de coordonnées centre de la terre, ( $S'$ ) est le vecteur pointé vers le soleil décrit en termes de l'angle horaire ( $\omega$ ) et l'angle de déclinaison ( $\delta$ ).

L'angle de déclinaison ( $\delta$ ), peut être calculé en utilisant la formule suivante [9] :

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360(284 + N)}{365}\right) \quad (1)$$

Où  $N$  est le nombre de jours dans une année,  $N=1$  pour 1 Janvier et  $N=42$  pour le 11 Février,

L'angle horaire ( $\omega$ ), peut être calculé comme suit [10] :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (2)$$

TSV est le temps solaire en 24 heures plutôt que *AM / PM*.  
 Il peut s'écrire de la forme suivante [11], [12]:

$$TSV = TL - DE + \left(\frac{E_t + 4L}{60}\right) \quad (3)$$

TL : est le temps donné par la montre.  
 DE : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (Égale 1 pour l'Algérie).  
 L : longitude de lieu.  
 E<sub>t</sub> : la correction de l'équation des temps.

$$E_t = 9.87 - 7.53 - 1.5 \sin(JD) \quad (4)$$

Avec:

$$JD = (360/365)(N - 81) \quad (5)$$

Etant donné que l'observateur (*Q*) (Fig. 1) est situé sur la surface de la terre à la latitude ( $\Phi$ ), la position du vecteur solaire (*S*) est définie dans le système de coordonnées surface de la terre en fonction de l'angle d'altitude du soleil ( $\alpha$ ) et un angle d'azimut du soleil (*A*).

Les angles d'altitude et d'azimut du soleil sont définis respectivement comme suite [1] :\*

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \sin \Phi + \cos \delta \cos \omega \cos \Phi) \quad (6)$$

$$A = \cos^{-1}\left(\frac{\sin \delta \cos \Phi - \cos \delta \cos \omega \sin \Phi}{\cos \alpha}\right) \quad (7)$$

Si  $\sin \omega > 0$  donc :  $A = 2\pi - A$

### III. LA METHODE DE POURSUITE TYPE AZIMUTH-ELEVATION (AE)

En fait, les expressions mathématiques des formules de poursuite pour la méthode AE ont été déjà obtenues par « Stine » et « Harrigan » en 1985 [13] et « Chen et al » en 2001 [14].

Les positions des Héliostats par rapport à la tour peuvent être définies en utilisant l'angle de face ( $\varphi$ ) et l'angle focal ( $\lambda$ ). Ce dernier est une relation directe avec la distance (d) Héliostat-Tour [1], [15] (voir la fig. 2).

$$\lambda = \arctg\left(\frac{H_t - r}{d}\right) \quad (8)$$

Où H<sub>t</sub> : Hauteur de la tour  
 r : Hauteur d'Héliostat

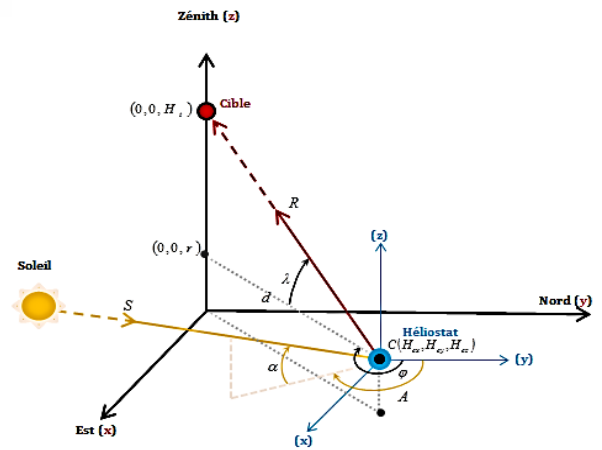


Fig.2 Rayons incident et réfléchi [6].

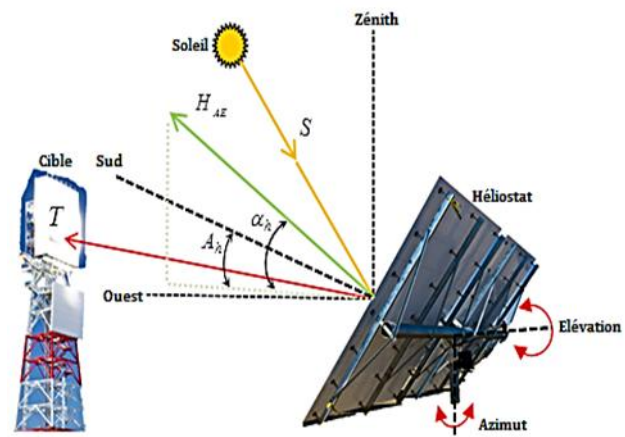


Fig. 3 Définition des deux angles de poursuite AE

Pour la méthode de poursuite du soleil type Azimuth-Elevation (AE), le système de coordonnées est lié au repère (surface-terre) où le vecteur normal de l'héliostat ( $H_{AE}$ ) est défini en fonction de l'angle d'azimut ( $A_h$ ) et de l'angle d'élévation ( $\alpha_h$ ) (voir fig. 3). Ces derniers peuvent être dérivés exclusivement à partir de la loi de réflexion concernons le vecteur de position du soleil (*S*), le vecteur de position de la cible (*T*) et le vecteur normal de l'Héliostat ( $H_{AE}$ ). Ce qui donne [16] :

$$A_h = \sin^{-1}\left(\frac{\cos \alpha \sin A + \cos \lambda \sin \varphi}{\cos^2 \alpha + \cos^2 \lambda - 2 \cos \alpha \cos \lambda \cos(A + \varphi)}\right) \quad (9)$$

$$\alpha_h = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha + \sin \lambda}{\sqrt{2(1 + \sin \alpha \sin \lambda - \cos \alpha \cos \lambda \cos(A + \varphi))}}\right) \quad (10)$$

La position de repos de l'Héliostat est telle qu'il est dirigé vers le zénith ( $\alpha_h = +\pi/2$ ) et orienté vers le sud ( $A_h = 0$ ). Le sens positif d'azimut est dirigé vers l'Ouest.

#### IV. RESULTATS ET ANALYSE

##### A. Validation des Equations Hélio-statiques

Notre modèle de simulation a été validé par rapport une étude intéressante menée pour Targastonne par MONTENON [16].

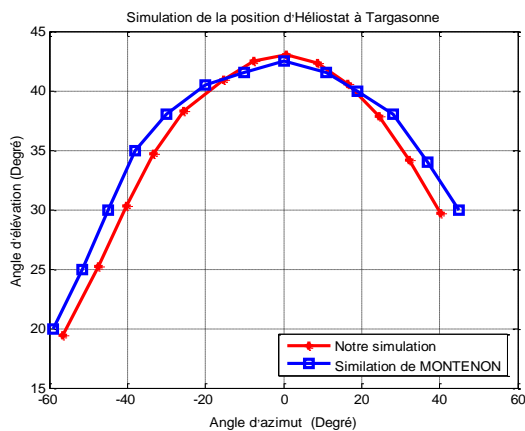


Fig. 4 Validation de notre modèle de poursuite de la méthode (AE) avec ceux utilisé par MONTENON [16] à 21 Juin pour Targastonne ( $\theta = 42.45^\circ$ ,  $L=1.44^\circ$ ),  $\lambda = 15^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$

La légère différence apparue est due au fait qu'on n'a pas utilisé les mêmes modèles inclus dans la détermination de course de soleil. Ainsi, la négligence du terme de la correction de la hauteur de soleil dû à la réfraction atmosphérique, car la zone d'implantation dans notre cas est dans un climat favorable et stable (Ghardaïa), et ce paramètre ne perturbe pas l'estimation de la hauteur [16].

##### B. Simulation des Equations Hélio-statiques

Une simulation des angles de poursuite est faite du 6<sup>H</sup> au 18<sup>H</sup> pour les paramètres d'entrés cités ci-dessous : Dans cette étude, nous avons choisi la zone de Ghardaïa qui est un site, par sa situation géographique au sud de l'Algérie, aride, de gisement solaire promoteurs (spécialement rayonnement direct) et il est prévu de recevoir prochainement, une implantation de plusieurs projets de CSP [17], [18].

TABLEAU I

DONNEES GEOGRAPHIQUE DU SITE DE GHARDAIA, PARAMETRE HELIOSTAT-TOUR

Localisation du Site		Hauteur de la Tour ( $H_t$ )	Hauteur de l'Héliostat ( $r$ )
Latitude ( $\theta$ )	Longitude (L)	11m	1m
32.4°	3.8°		

1) Etude du Mouvement Diurne de l'Héliostat Durant Certaines Saisons de l'Année (Impact de Nombre du Jour N: Les variations horaires des angles caractéristiques d'un Héliostat typique ont été étudiées numériquement. Les résultats sont montrés sur la Fig. 5, pour trois différents jours

de l'année. Ces jours ont été choisis librement à 21 Décembre (solstice d'hiver), 21 Mars (équinoxe de printemps) et 21 Juin (solstice d'été). De telles variations peuvent être accomplies pour un jour de l'année en utilisant la procédure numérique développée dans cette recherche. Les données sur la base desquelles la Fig. 5 est obtenue, sont liées aux positions sur le côté sud de la tour avec un angle de face ( $\varphi=0^\circ$ ) ainsi qu'un angle focal ( $\lambda = 15^\circ$ ) qui est équivalent d'un ( $d=35m$ ).

La Fig. 5 (haut), représente l'évolution de l'angle d'azimut de l'héliostat en fonction du temps, nous pouvons remarquer en premier lieu que durant les trois saisons, l'Héliostat est dirigé vers l'Est au matin. Ainsi, sa direction varie le matin de l'est vers l'ouest sur la plage de [-20 0], [-38 0], [-60 0] durant les trois saisons successivement [hiver], [printemps], [été]. Par contre, l'après-midi sa course varie sur la plage de [0 +20], [0 +40] durant les trois saisons successivement [hiver, équinoxe, été].

Les trajectoires d'élevation d'Héliostat sont symétriques par rapport à midi comme cela apparaît sur la Fig. 5(bas). Le point H s'élève en début de journée, atteint son point le plus haut vers 13 heures et décroît jusqu'à la fin de journée.

Les courses sont plus hautes vers le solstice d'été et plus basses vers celui d'hiver. Donc, en été, elle varie sur la plage [17 50], en printemps sur la plage [0 +38] et en hiver sur la plage [0 +25].

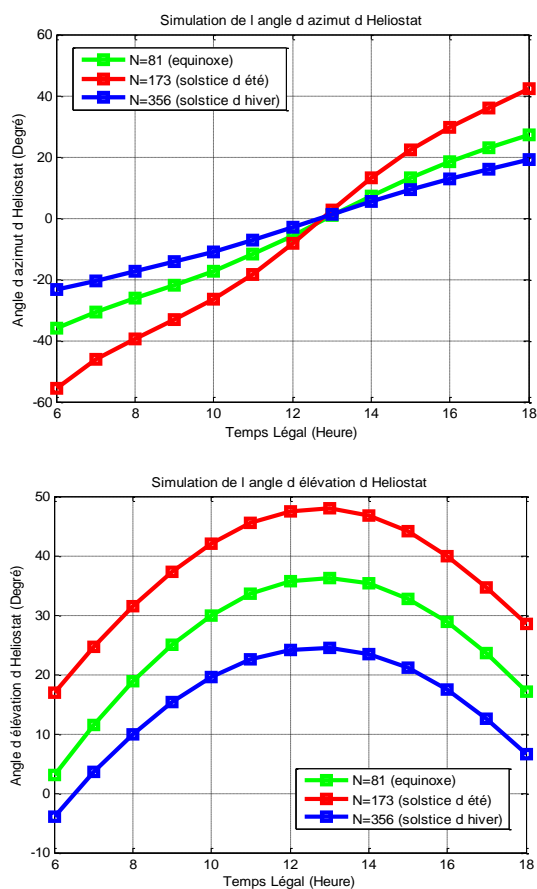


Fig. 5 Evolution des angles d'Azimut (en haut) et d'Elévation (en bas) de l'héliostat à Ghardaïa en fonction du nombre du jour pour  $\varphi=0^\circ$ ,  $d = 35m$  ( $\lambda = 15^\circ$ ).

2) Etude du Mouvement Diurne de l'Héliostat en Fonction de sa Position sur le Champ :

• *L'impact de l'Angle Focal* : Dans ce cas, nous avons simulé la position d'héliostat pour différente distance par rapport à la tour, ce qui traduit par la variation de l'angle focal ( $\lambda$ ), nous avons considéré un Héliostat positionné au nord de la tour avec un angle de face ( $\varphi=0^\circ$ ) et nous avons pris comme saison le printemps (Equinoxe du printemps), c'est-à-dire ( $N = 81$ ). Les courbes de la Fig. 6, représentent clairement l'effet de la variation de l'angle focal sur l'évolution des angles de poursuite de l'héliostat considéré.

Nous pouvons remarquer en premier lieu que les courses en Azimut et en Elévation sont d'autant plus importantes que la hauteur de cible est plus grande, c'est-à-dire, d'autant plus que l'héliostat est proche de la tour ( $d=10m$ ) et on constate aussi que cette variation n'est pas linéaire au fil de la distance focale.

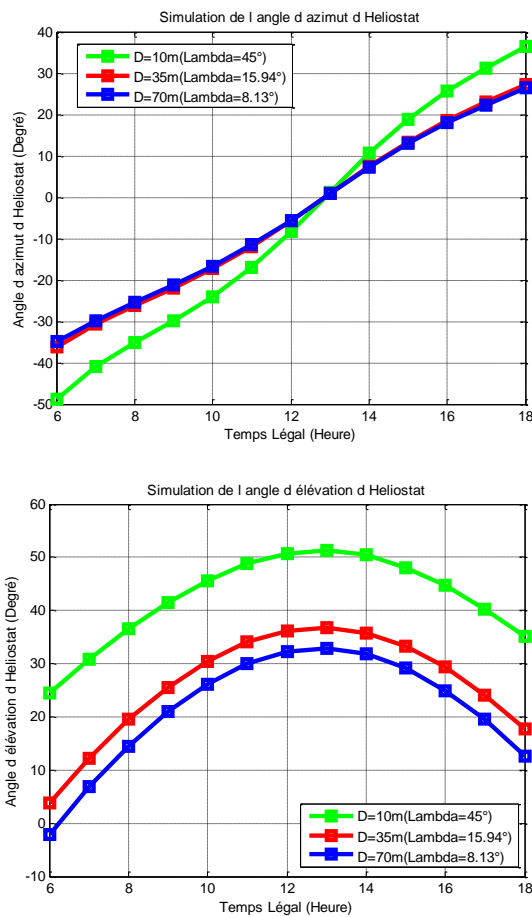


Fig. 6 Evolution des angles d'Azimut (en haut) et d'Elévation (en bas) de l'Héliostat à Ghardaïa en fonction l'angle focale pour  $\varphi=0^\circ$ ,  $N=81$  (équinoxe)

• *L'impact de l'angle de face* : les graphes de la Fig. 7, illustrent l'évolution des deux angles de poursuite de l'Héliostat pour  $N=81$  (équinoxe), de distance  $d=35m$ , ( $\lambda=15^\circ$ ). Dans tous les cas étudiés les Héliostats sont situés au Nord de la tour.

Pour  $\varphi=45^\circ$  (Fig. 7 en haut), la variation de l'angle d'azimut au matin est très lente car les Héliostats sont au côté Est, cette vitesse va s'accélérer plus en plus au-delà de midi dû à l'éloignement du soleil à l'autre côté d'Héliostat. Le phénomène est réciproquement induit à ceux situés au côté Ouest ( $\varphi=-45^\circ$ ).

Contrairement aux Héliostats en face de la tour ( $\varphi=0^\circ$ ), une variation linéaire de la vitesse près de  $5^\circ/h$  revient au faite que ceci garde la symétrie entre le coté d'aube et coucher de soleil par rapport au point focalisant.

Pour les angles d'Elévation (Fig.7 en bas), cette symétrie de  $\varphi=0^\circ$  est évidemment apparue de forme Gaussien atteinte sa crête environ midi. L'angle d'élévation démarre par un angle faible orientant les miroirs vers le bas et continue de s'élever par une vitesse de  $5^\circ/h$ . En poursuivant la hauteur de soleil, les miroirs vont se baisser vers le soir.

Si  $\varphi=\mp 45^\circ$ , les mêmes formes sont obtenues sauf qu'elles semblent décalées, où les miroirs ont une hauteur plus large gamme et à  $\varphi=+45^\circ$  ils prennent beaucoup de temps de monter à l'inverse de  $\varphi=-45^\circ$ .

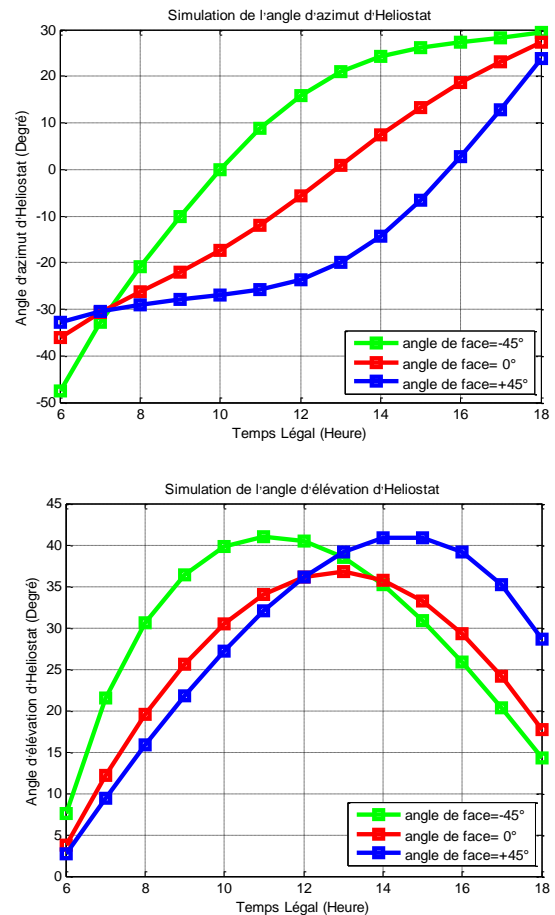


Fig.7 Evolution des angles d'Azimut (en haut) et d'Elévation (en bas) de l'Héliostat à Ghardaïa en fonction l'angle de face pour  $\lambda=15^\circ$ ,  $N=81$  (équinoxe)

## V. CONCLUSION

Dans ce travail, la simulation d'évolution diurne des angles AE est réalisée en fonction des positions d'Héliostat dans le champ, et en fonction des saisons de l'année.

En générale, la plage de mouvement obtenue de l'ensemble des Héliostats dans le champ simulé peut varier en Azimut de  $-100^\circ$  à  $50^\circ$  (écart de  $150^\circ$ ) et en Elévation de  $0^\circ$  à  $50^\circ$  (écart de  $50^\circ$ ) pour l'élévation avec une vitesse max près de  $20^\circ/\text{h}$  (équivalent de  $0.1 \text{ mrd/s}$ ) au cours de l'année.

Le résultat est une méthodologie simple et efficace qui peut offrir des valeurs de la plage du mouvement et sa vitesse pour les deux angles de poursuite et pour n'importe quelle saison, quelque ce soit la position d'Héliostat par rapport à la tour dans un site donné.

## REFERENCES

- [1] K.K. Chong et M.H. Tan, "Range of motion study for two different sun-tracking methods in the application of heliostat field", *Sol. Energy*, 2011.
- [2] (2010) Ademe site web. [Online]. Available: <http://www.ademe.fr>.
- [3] 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*, Volume 11 N°4, Page 523 – 532, 2008.
- [4] M. Haddadi, Élaboration d'une Commande pour Héliostat, *Revue des Energies Renouvelables*, Volume 11 N°4, Page 153 – 157, 2003.
- [5] A. Gama et al, Etude et réalisation d'un dispositif de poursuite solaire sensible destiné à un prototype d'un concentrateur cylindro-parabolique, *Revue des Sciences Fondamentales et Appliquées*, Volume 2 N°1, Pages 137-148, 2010
- [6] Y. T. Chen et al, Comparison of Two Sun Tracking Methods in the Application of a Heliostat Field, *Journal of Solar Energy Engineering*, Volume 126, Février 2004.
- [7] 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*, Pages 159–167, 2013.
- [8] A. Gama et al, Etude et réalisation d'un concentrateur cylindro-parabolique avec poursuite solaire aveugle, *Revue des Energies Renouvelables*, Volume 11 N°3, Pages 437– 451, 2008.
- [9] M. Iqbal, An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Canada, 1983.
- [10] W. Spencer, Fourier series representation of the position of the Sun. *Search*, Volume 2, Pages 172, 1971.
- [11] R. Mérat et R. Moreau, physique appliquée, *livre édition NATHAN TECHNIQUE*, 1994.
- [12] Oar Aliman et al, Simplification of Sun Tracking Mode to Gain High Concentration Solar Energy, *American Journal of Applied Sciences*, Pages 167-171, 2007.
- [13] W.B. Stine et R.W. Harrigan, Solar Energy Fundamentals and Design with Computer Applications. *John Wiley*, New York, Pages 135-262, 1985.
- [14] Y.T. Chen et al, Non-imaging focusing heliostat, *Solar Energy*, Volume 71(3), Pages 155-164, 2001.
- [15] A. Gamil et al, 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*
- [16] A. Montenon, Analyse, mutualisation et optimisation par la commande de la consommation énergétique des héliostats autonomes des centrales à concentration solaire, *Thèse Doctorat, Université de Toulouse*, France, 2013.
- [17] K. Gairaa, Valorisation du gisement solaire de Ghardaïa, *Bulletin des Energ. Ren.*, Algérie, N°17, 2010.
- [18] [18] A. Takilalte, La production de l'électricité à base des CSP en Algérie : réalité et perspectives, *Bulletin des Energ. Ren.*, Algérie, N°30, 2014.