

## Etude comparative entre les modes de poursuite solaire d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique

Yacine MARIF<sup>1,2,\*</sup>, Hocine BEN MOUSSA<sup>3</sup>, Hamza BOUGUETTAIA<sup>4</sup>,  
Mohamed Mustapha BELHADJ<sup>2</sup> et Moussa ZERROUKI<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup> Univ Ouargla, Fac. des Mathématiques et Sciences de la Matière,  
Dépt. de Physique, Ouargla 30 000, (Algérie).

<sup>(2)</sup> Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, Adrar 01 000 (Algérie).

<sup>(3)</sup> Département de Mécanique, Faculté de Technologie, Université El Hadj Lakhdar Batna,  
Batna 05 000 (Algérie).

<sup>(4)</sup> Univ Ouargla, Fac. des Mathématiques et Sciences de la Matière, Lab. Développement des énergies  
nouvelles et renouvelables dans les zones arides et sahariennes, Ouargla 30 000, (Algérie).

\* Email : [yacine.marif@yahoo.fr](mailto:yacine.marif@yahoo.fr)

**ملخص :** إن تقنية المركبات الشمسية تسمح بالاستعمال الواسع للطاقة الشمسية وهذا بواسطة عاكسات تقوم بتركيز أشعة الشمس في مساحة ماصة صغيرة وبالتالي يتم التقليل من الضياعات الحرارية و رفع درجات الحرارة , الجانب السلبي في المركبات الشمسية أنها لا تستعمل إلا الإشعاع الشمسي المباشر وهذا ما يتطلب نظام للتتبع المستمر للشمس . توجد أربعة أنواع من المركبات الشمسية وهي المركز قطع مكافئ أسطواني, مرابا فرنل, الأبراج الشمسية والمركز قطع مكافئ دائري . من خلال نتائج النمذجة فإن أنظمة التتبع شرق غرب قطبي و شرق غرب أف قى هي المناسبة بالنسبة للمركز قطع مكافئ أسطواني.

**الكلمات الدالة:** الطاقة الشمسية , المركز قطع مكافئ أسطواني, التتبع الشمسي, الفعالية البصرية

**RÉSUMÉ :** La technologie des concentrateurs solaire offre une méthode prometteuse pour l'usage de l'énergie solaire à grande échelle. En utilisant des réflecteurs afin de concentrer les rayons du soleil sur une petite surface, cela permet de diminuer grandement la taille de l'absorbeur, ce qui réduit les pertes de chaleur et augmente son efficacité à hautes températures. Leur inconvénient principal réside dans le fait qu'ils n'utilisent que le rayonnement solaire direct, ceci exige une poursuite continue du soleil. Il existe quatre types des concentrateurs, les concentrateurs cylindro-paraboliques, les miroirs de Fresnel, les tours solaires et les concentrateurs paraboliques. Selon les résultats de la simulation, les modes de poursuite Est-Ouest polaire et Est-Ouest horizontal sont les plus souhaitables pour un concentrateur cylindro-parabolique.

**MOTS-CLÉS :** Energie solaire, Concentrateur cylindro-parabolique, Poursuite solaire, l'efficacité optique.

**ABSTRACT:** The solar collector technology offers a promising method for the large scale use of solar energy. By using reflectors in order to concentrate the solar radiation in a small area; this reduces heat losses in the collector at high temperatures. The solar collector uses only the direct solar radiation; this requires a continuous sun tracking system. There are four main of the solar collectors: the parabolic trough collector, the Fresnel mirror, the solar power tower and the parabolic dish collector. According to the simulation results, the polar East-West and horizontal East-West tracking systems are most desirable for a parabolic trough collector.

**KEYWORDS:** Solar energy, parabolic trough collector, Sun tracking, optical efficiency.

### 1. Introduction

L'Algérie bénéficie d'une puissance de rayonnement solaire parmi les plus élevées en méditerranée. Selon les données d'ensoleillement, l'énergie moyenne reçu sur une surface horizontale soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup> annuellement aux régions côtière, 1900 KWh/m<sup>2</sup>/ an aux hauts plateaux et 2650 KWh/m<sup>2</sup>/ an au Sahara [1].

Les concentrateurs solaires focalisent les rayons du soleil dans un point comme la tour solaire et le concentrateur parabolique, ou dans une ligne comme le concentrateur cylindro-parabolique et les miroirs de Fresnel ; la figure (1) montre les quatre systèmes de concentration. Le concentrateur cylindro-paraboliques est actuellement le plus répandu ; ces applications sont multiples par exemple la réfrigération solaire, la distillation solaire et l'électricité solaire à grande échelle. Dans le sud de l'Algérie (Hassi Rmel) une centrale électrique hybride (gaz /solaire) est installée avec une surface

de 180000 m<sup>2</sup> des réflecteurs paraboliques et d'une puissance électrique de 25MW [2]. Le concentrateur cylindro-parabolique utilise un réflecteur cylindrique en forme de parabole ; la parabole concentre les rayons du soleil sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur, pour augmenter le transfert de chaleur. On a recours généralement à des surfaces sélectives qui absorbent le maximum de rayonnement solaire en émettant très peu d'infrarouges. Une enveloppe en verre recouvre l'absorbeur et permet, en faisant le vide dans l'espace annulaire d'éliminer les pertes thermiques par convection. Les températures du récepteur peuvent atteindre 400°C.

Le concentrateur cylindro-parabolique (CCP) est généralement doté d'une poursuite solaire pour adapter l'inclinaison du concentrateur de manière à ce que la radiation solaire incidente soit toujours perpendiculaire au plan d'ouverture du concentrateur (angle d'incidence  $\theta = 0$ ). Dans ce travail on a réalisé un programme informatique en langage FORTRAN90, en utilisant le modèle empirique de Capderou [3] pour modéliser le rayonnement solaire direct incident sur le concentrateur et pour faire une comparaison entre les modes de poursuite solaire.

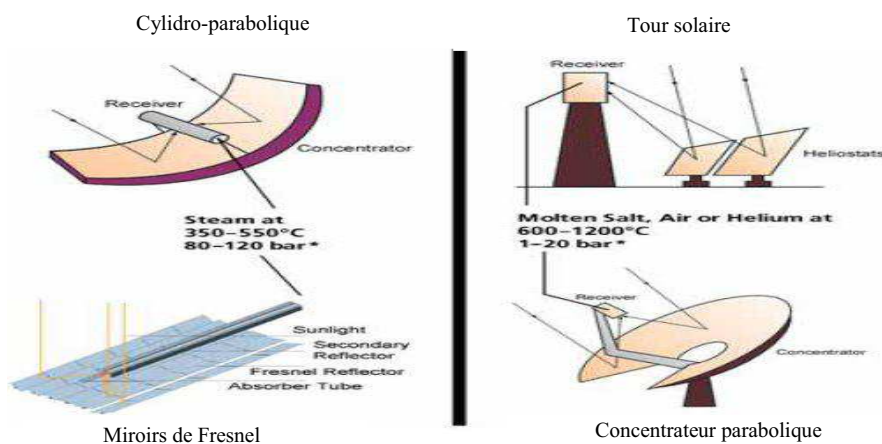


Figure 1 : Principales technologies de concentration [4]

## 2. Le modèle empirique de Capderou

Les apports solaires de la ville d'Ouargla située au sud de l'Algérie dont les données géographiques sont : Altitude : 141 m, Latitude : 31°57' N, Longitude : 5°24' E. Pour calculer le rayonnement solaire direct incident sur un plan quelconque au niveau du sol, Capderou propose l'équation (1) en fonction de l'angle d'incidence  $\theta$ , la masse atmosphérique  $m_A$  et le coefficient d'atténuation total réel  $k$  :

$$I_d = I_0 \cdot \varepsilon \cdot \cos \theta \cdot \exp(m_A \cdot k) \quad (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

Ou :

$$I_0 = 1353 \text{ W/m}^2 \quad \text{et} \quad \varepsilon = 1 + 0.034 \times \cos\left(\frac{360}{365}(n-2)\right)$$

### 2. 1. Masse atmosphérique et coefficient d'atténuation total réel

L'atténuation du rayonnement direct dépend du coefficient d'atténuation total réel relatif à la diffusion et l'absorption par les composants de l'atmosphère (gaz, aérosols et vapeur d'eau), et de la masse atmosphérique (masse d'air optique). Capderou a donné une formule en fonction de la hauteur solaire ( $h$ ) pour le calcul de la masse atmosphérique avec une précision de 0,1% par rapport aux mesures :

$$m_A = \frac{1}{\sin(h) + 9.4 \times 10^{-4} [\sin(h) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (2)$$

Avec :

$$h = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta$$

Le coefficient d'atténuation total réel est donné en fonction du coefficient d'atténuation total pour une atmosphère pure et sèche sans aérosols, ni vapeur d'eau, ni nuages  $k_0$ . Et le facteur  $T_L$  dit facteur de trouble atmosphérique de linke par la relation suivante :

$$k = k_0 \cdot T_L \quad (3)$$

Capderou a présenté une formule simple pour le coefficient d'atténuation total pour une atmosphère pure et sèche en fonction de la masse atmosphérique :

$$k_0 = \frac{1}{9.4 + (0.9 \times m_A)} \quad (4)$$

Le facteur de trouble atmosphérique de linke  $T_L$  est donné en fonction de la hauteur solaire ( $h$ ), Latitude ( $\varphi$ ) et l'Altitude ( $Z$ ) du lieu, il est composé de trois facteurs de trouble auxiliaires :

Le trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau  $T_0$

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \times \sin \varphi + 0.1 \times A_{he} (2 + \sin \varphi) - 0.2 \times z - (1.22 + 0.14 \times A_{he}) (1 - \sinh) \quad (5)$$

Le trouble du à la diffusion moléculaire  $T_1$

$$T_1 = (0.89)^Z \quad (6)$$

Le trouble du à la diffusion et une légère absorption par les aérosols  $T_2$

$$T_2 = (0.9 + 0.4 \times A_{he}) (0.63)^Z \quad (7)$$

Pour mettre en évidence la variation saisonnière, Capderou a donné la fonction  $A_{he}$  (L'alternance hiver-été) :

$$A_{he} = \sin \left( \frac{360}{365} (n - 121) \right) \quad (8)$$

En conclusion le rayonnement solaire direct incident sur un plan quelconque au niveau du sol est :

$$I_d = I_0 \cdot \varepsilon \cdot \cos \theta \cdot \exp(T_L \cdot m_A \cdot k_0) \quad (\text{W/m}^2) \quad (9)$$

Pour un plan horizontale,  $\cos \theta = \sinh$

## 2. 2. Angle d'incidence

L'angle d'incidence présente l'angle entre le rayonnement direct incident et la normale à la surface d'ouverture du concentrateur, pour un plan fixé quelconque le cosinus d'angle d'incidence est défini par la relation suivante :

$$\cos \theta = \cosh \cos \beta \cos(a - \Omega) + \sinh \sin \beta \quad (10)$$

D'après Capderou le cosinus d'angle d'incidence est variable en fonction du mode de poursuite solaire, pour une poursuite totale du soleil la on a un réglage continu donc :

$$\theta = 0 \Rightarrow \cos \theta = 1 \quad (11)$$

Dans le cas d'un suivi solaire suivant l'axe de la terre avec une inclinaison égale à la latitude de lieu (Est-Ouest polaire) :

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (12)$$

Dans le cas d'un suivi solaire suivant l'axe Est-Ouest horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Nord-Sud :

$$\cos \theta = \sqrt{(\cos(\delta) \sin(\varphi) \cos(\omega) - \cos(\delta) \cos(\omega))^2} \quad (13)$$

Dans le cas d'un suivi solaire suivant l'axe Nord-Sud horizontal, le tube récepteur du concentrateur est parallèle à l'axe Est-Ouest :

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \cos^2(\delta) \sin^2(\omega)} \quad \text{ou} \quad \cos \theta = \sqrt{\sin^2(\delta) + \cos^2(\delta) \cos^2(\omega)} \quad (14)$$

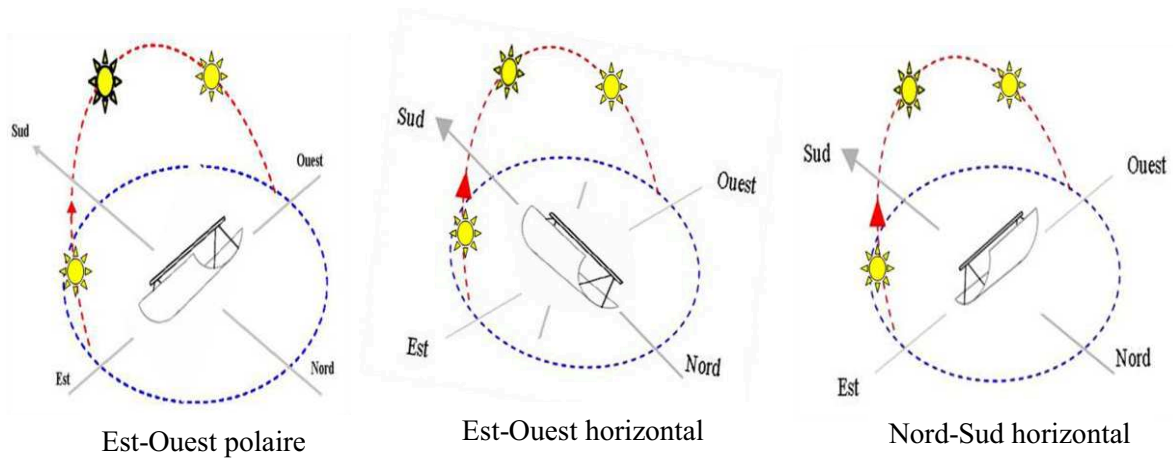


Figure 2 : Les modes de poursuite solaire d'un concentrateur cylindro-parabolique

### 3. Calcul de l'efficacité optique

Le concentrateur peut être schématisé comme suit (figure 3) :

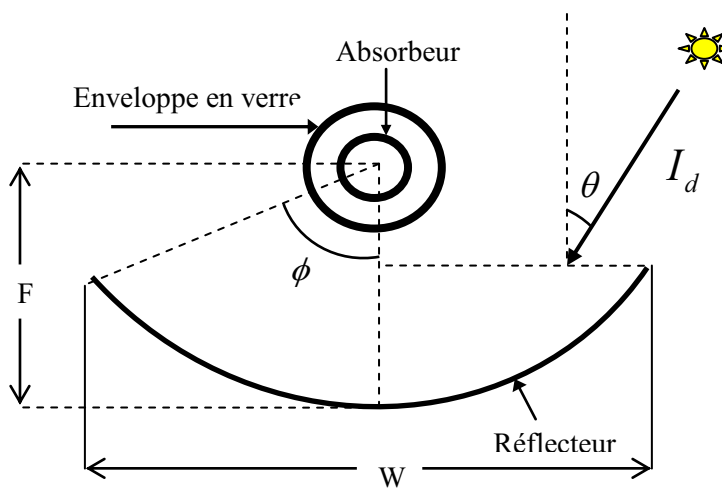


Figure 3 : Schéma de principe d'un concentrateur cylindro-parabolique

L'efficacité optique est définie comme étant le rapport du rayonnement absorbé au rayonnement incident à la surface d'ouverture du concentrateur, il est donné par la relation suivante [5,6] :

$$\eta_{opt} = \rho(\tau\alpha)\gamma K_{\tau\alpha} \quad (15)$$

$(\tau\alpha)$  : présente le facteur de transmittivité-absorptivité entre l'enveloppe du verre et l'absorbeur d'après [4] :

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - (1 - \alpha)(1 - \tau)} \quad (16)$$

$\gamma$  : est le facteur d'interception ; il présente le rapport entre l'énergie interceptée par l'absorbeur et celle réfléchi par les surfaces réfléchissantes.

$K_{\tau\alpha}$  : est l'angle d'incidence modifié, il décrit comment l'efficacité optique du collecteur change avec la variation de l'angle d'incident. La valeur de  $K_{\tau\alpha}$  est toujours inférieure à l'unité, elle est donnée en fonction de l'angle d'incidence d'après [6] :

$$K_{\tau\alpha} = 1 - 6.74 \times 10^{-5} (\theta)^2 + 1.64 \times 10^{-6} (\theta)^3 - 2.51 \times 10^{-8} (\theta)^4 \quad (17)$$

L'organigramme ci-après donne les étapes de calcul de l'efficacité optique :

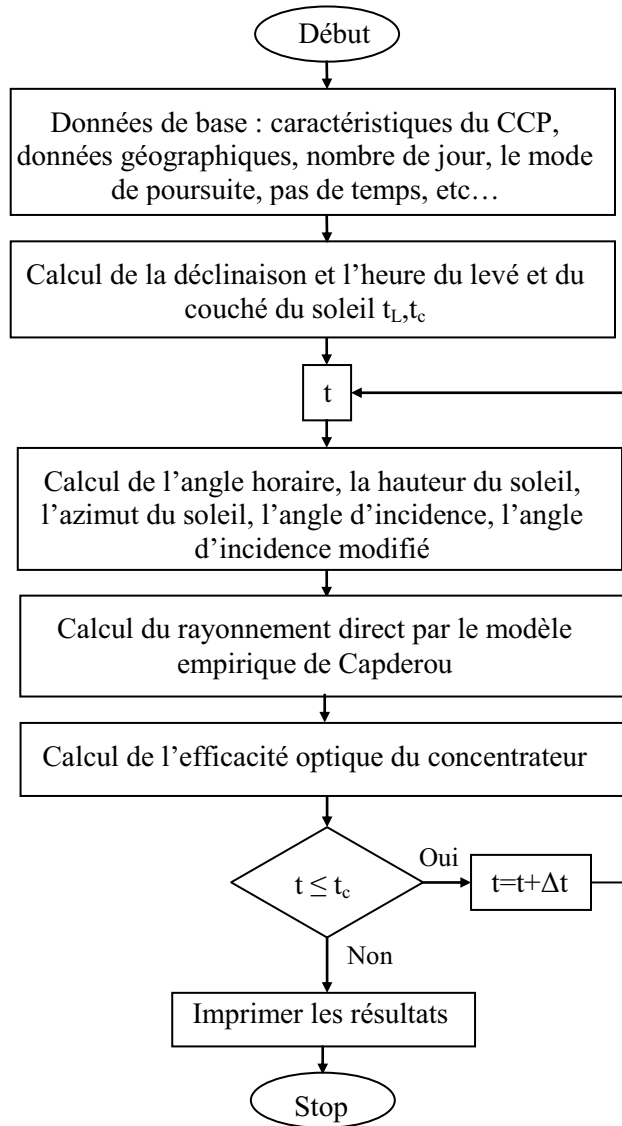


Figure 4 : Organigramme du programme de calcul

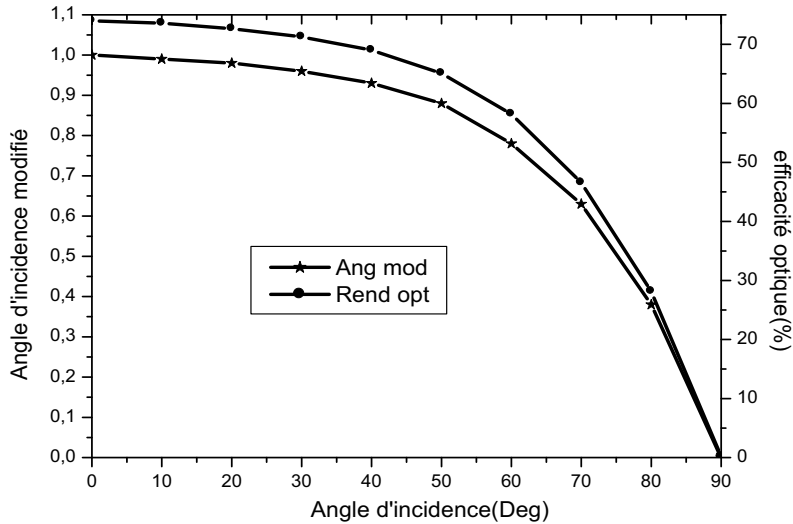
#### 4. Résultats et discussions

Le programme que nous avons établi a permis d'avoir les graphes de l'évolution théorique du rayonnement direct calculé par le modèle empirique de Capderou et de l'efficacité optique du concentrateur, pour les différents modes de poursuite solaire. Les caractéristiques du concentrateur cylindro-parabolique sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques du concentrateur [5]

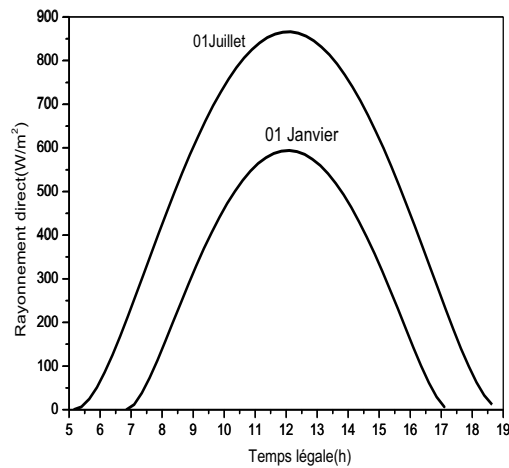
Absorption du tube absorbeur $\alpha$	0.90
Transmittivité du verre $\tau$	0.95
Facteur de transmittivité-absorptivité ( $\tau\alpha$ )	0.864
Réflexion du réflecteur $\rho$	0.93
Facteur d'interception $\gamma$	0.92

La figure 5 présente la variation de l'angle d'incidence modifié et l'efficacité optique en fonction de l'angle d'incidence calculé respectivement à l'aide des équations (17) et (15). On observe que l'angle d'incidence modifié et l'efficacité optique décroît sensiblement avec l'augmentation de l'angle d'incidence, donc un tel système de poursuite continue du soleil est nécessaire pour le concentrateur.



**Figure 5 : Variation de l'angle d'incidence modifié et l'efficacité optique en fonction de l'angle incidence**

La figure 6 présente l'évolution du rayonnement direct reçu par une surface horizontale estimé par le modèle de Capderou ; on constate que l'énergie solaire reçue augmente avec la durée du jour.



**Figure 6 : Rayonnements direct sur un plan horizontal**

D'après la figure 7 qui illustre l'évolution du rayonnement direct pour les différents modes de poursuite solaire, on remarque que le mode de poursuite total (à deux axes) collecte le maximum de rayonnement solaire. Ce mode n'est pas conseillé à cause de son coût très élevé ; donc on va faire une comparaison entre les trois modes à un seul axe.

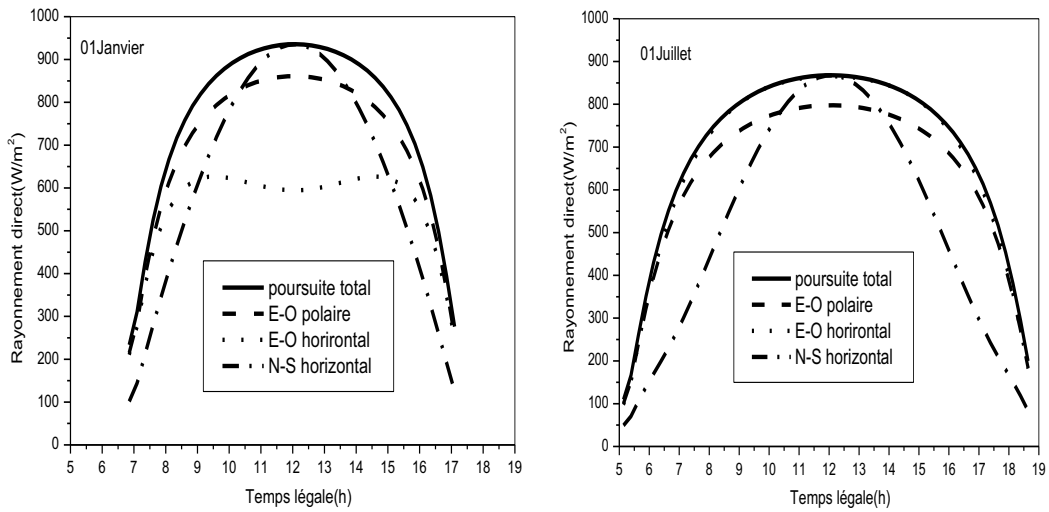


Figure 7 : Rayonnement direct pour les différents modes de poursuite solaire

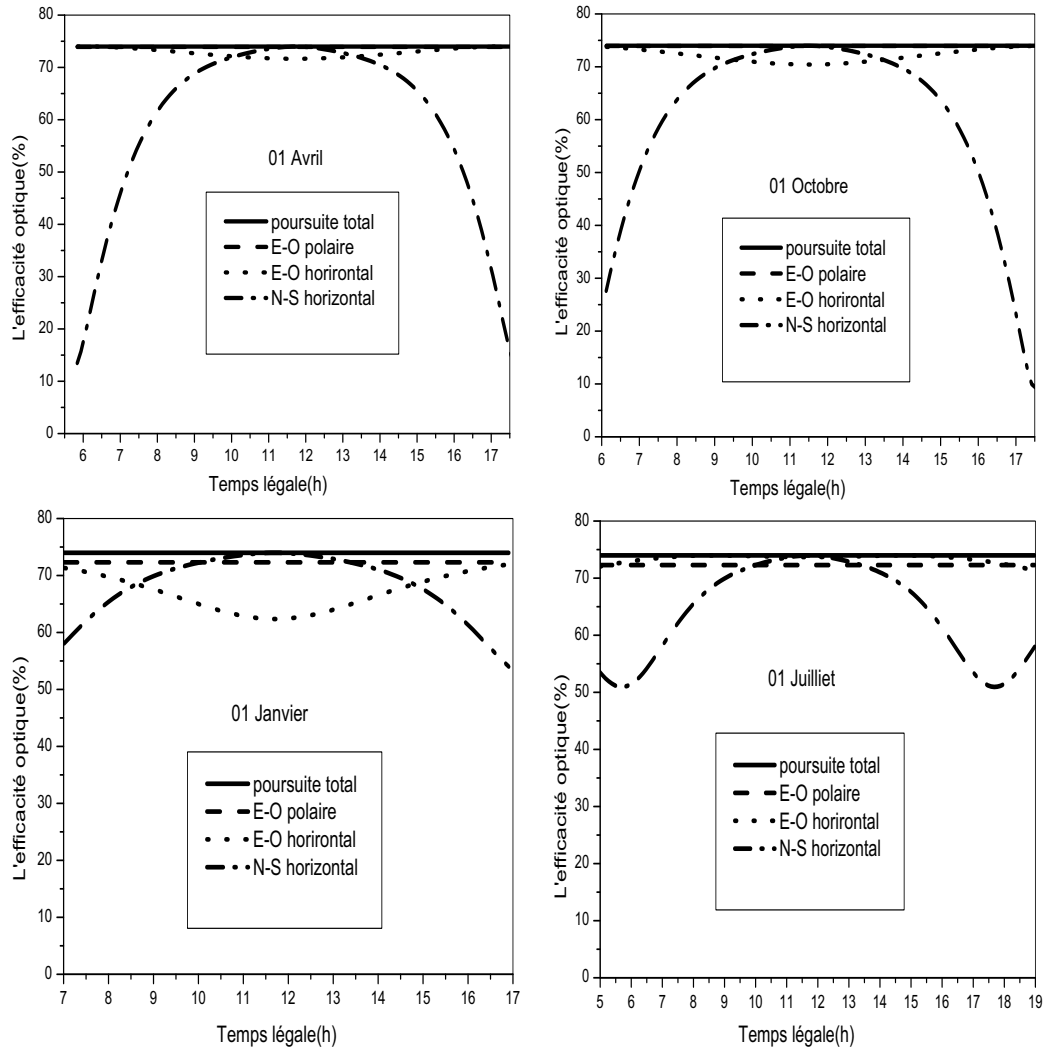


Figure 8 : Variation de l'efficacité optique en fonction de temps

La figure 8 montre l'évolution de l'efficacité optique pour les quatre saisons de l'année. On observe que la performance des modes Est-Ouest polaire et horizontal est très proche du mode de poursuite

totale au printemps (Avril) et en automne (Octobre). Même remarque en été (Juillet) avec une amélioration dans l'efficacité du mode Nord-Sud horizontal, par contre en hiver (Janvier) le mode Nord-Sud horizontal devient plus souhaitable que le mode Est-Ouest horizontal.

Il en résulte qu'annuellement les modes Est-Ouest polaire et Est-Ouest horizontale sont plus recommandés par rapport au mode Nord-Sud horizontal.

## 5. Conclusions et recommandations

Notre travail porte sur l'étude théorique des différents modes de poursuite solaire dans un concentrateur solaire cylindro-parabolique pour le site de Ouargla. D'après les résultats de la simulation, il est évident que le mode de poursuite à deux axes collecte le maximum de rayonnement solaire. Mais de point de vue économique les modes de poursuite à un seul axe sont acceptables, la performance des modes est-ouest polaire et horizontal est très proche du mode de poursuite à deux axes.

En hiver le mode de poursuite à un seul axe Nord-Sud horizontal est souhaitable par rapport au mode Est-Ouest horizontal, de plus la course du moteur de poursuite pour le mode Nord-Sud horizontal est très petite par rapport aux autres modes de poursuite ce qui diminue la consommation d'énergie électrique.

Nos efforts s'orientent vers la validation de ces résultats par la réalisation d'un système suiveur de soleil à un seul axe qui est suffisant pour un concentrateur solaire cylindro-parabolique.

## Nomenclature

### Symboles

$a$  : l'azimut du soleil (degré)

$h$  : la hauteur du soleil (degré)

$I_d$  : Rayonnement solaire directe ( $W/m^2$ ).

$I_0$  : la constante solaire ( $W/m^2$ ).

$k$  : Coefficient d'atténuation totale réelle

$k_0$  : Coefficient d'atténuation totale pour une atmosphère pur et sèche

$K_{\tau\alpha}$  : Angle d'incidence modifié

$m_A$  : Masse d'air optique

$n$  : nombre de jour dans l'année

$T_L$  : Facteur de trouble atmosphérique de linke

$t$  : le temps (heure)

### Symboles grecs

$\alpha$  : Absorption du tube absorbeur

$\tau$  : Transmittivité du verre

$\rho$  : réflexion du réflecteur

$(\alpha\tau)$  : Facteur de transmittivité-absorptivité

$\gamma$  : Facteur d'interception

$\theta$  : Angle d'incidence (degré)

$\omega$  : Angle horaire (degré)

$\phi$  : Angle d'ouverture (degré)

$\delta$  : Déclinaison (degré)

$\varphi$  : Latitude (degré)

$\Omega$  : orientation du plan (degré)

$\beta$  : inclinaison du plan (degré)

$\varepsilon$  : correction de la distance terre-soleil

$\eta_{opt}$  : Efficacité optique

$\Delta t$  : pas de temps



## Références

- [1] *Etude du plan directeur générale de développement des régions sahariennes* ; bureau national d'études pour le développement rural, Chéraga – Tipaza (1999).
- [2] N. El Gharbi., H. Derbal., S. Bouaichaoui. and N. Said; *A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies*; Energy Procedia, **6**, 565–572 (2011).
- [3] M. Capdrou; *Atlas Solaire de l'Algérie, Modèles Théoriques et Expérimentaux*, Volume1, Tome 2 ; Office des Publications Universitaires, Algérie (1987).
- [4] Quoilin S ; *Les Centrales Solaires à Concentration* ; Rapport, Université de Liège Faculté des sciences appliquées, (Mai 2007).
- [5] O. Garcia –Valladares and N. Velazquez; *Numerical simulation of parabolic trough collector: improvement using counter flow concentric circular heat exchangers*; International journal of heat and mass transfer, Vol. **52** (3-4), 597–609 (2009).
- [6] J. A. Duffie and W. A. Beckman; *Solar Engineering of Thermal Processes*; JohnWiley & Sons, New York (1991).
- [7] M. Koussa., A. Malek et M. Haddadi ; *Apport énergétique de la poursuite solaire sur deux axes par rapport aux systèmes fixes. Application aux capteurs plans* ; Rev. Energ. Ren., Vol. **10** N°4, pp 515 – 537 (2007).
- [8] A. Mefti., M. Y. Bouroubi et A. Khellaf ; *Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie* ; Rev. Energ. Ren., Vol. **2**, 69-85 (1999).
- [9] F. Yettou., A. Gama., A. Malek., B. Azoui et C. Larbès ; *Etude et conception d'un logiciel de calcul de l'éclairement solaire en Algérie destiné aux systèmes à concentration solaires* ; Rev. Energ. Ren., Vol. **14**, N°1, pp 27 – 46 (2011).