

Facteurs optiques et géométriques caractérisant un concentrateur cylindro-parabolique

D. Guerraiche*, A. Benderradji† et H. Benmoussa

Département de Mécanique, Faculté de Technologie, Université El Hadj Lakhdar,
Rue Chahid Boukhrouf Mohamed El Hadi, B.P. 499, Batna, Algérie

(reçu le 24 Octobre 2010 – accepté le 25 Juin 2011)

Résumé - *Le présent travail propose une étude théorique de la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique dans un champ de concentrateurs cylindro-parabolique (CCP). Il s'agit principalement de déterminer les performances intégrant les différents facteurs géométriques et optiques caractérisant le concentrateur solaire. Une méthode a été présentée pour le calcul de ces différents facteurs, notamment le facteur du cosinus de l'angle d'incidence et le facteur d'ombre. Un modèle de calcul du facteur d'interception a été développé. Les pertes thermiques ont été estimées analytiquement. La détermination des différents facteurs permet de remonter aux pertes thermiques, enfin aux performances du concentrateur.*

Abstract - *This paper proposes a theoretical study of converting solar energy into heat energy in a field of cylindrical-parabolic concentrators (CPC). This is primarily to determine the performance integrating the various factors characterizing the geometric and optical solar concentrator. A method was presented for the calculation of these various factors, including the factor of the cosine of the angle of incidence and the shading factor. A computational model of interception factor was developed. The heat losses were estimated analytically. Determining factors can be traced back to heat loss, then the performance of the concentrator.*

Mots clés : Concentrateur cylindro-parabolique – Facteurs optique et géométrique.

1. INTRODUCTION

Le soleil rayonne dans l'espace une quantité d'énergie considérable. Mais son éloignement de la terre le fait apparaître comme un disque d'angle solide très faible égal à $68 \cdot 10^{-6}$ stéradian, et l'énergie reçue par unité de surface au niveau du sol ne peut guère dépasser 1000 W/m^2 ; c'est ainsi que les capteurs solaires plans, qui se prêtent à des nombreuses utilisations domestiques, ne permettent pas d'obtenir des températures supérieures à $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Mais il y a une quarantaine d'années, il est apparu que l'énergie solaire permettrait de couvrir une gamme de puissances et de températures beaucoup plus étendues, à condition de la concentrer, en augmentant l'angle solide apparent du soleil, au moyen de capteurs optiques plus élaborés appelés concentrateurs solaires.

Donc les concentrateurs optiques présentent un des moyens pour résoudre les problèmes posés par la faible densité énergétique du rayonnement solaire incident. Les systèmes utilisant les concentrateurs cylindro-paraboliques sont capables de générer des températures supérieures à $500 \text{ }^\circ\text{C}$, [1].

* djem_ta@yahoo.fr

† benderradji@hotmail.com

La production de la vapeur par la voie des centrales cylindro-paraboliques a trouvé un écho favorable dans l'industrie comme en témoignent les nombreuses réalisations au monde. Au sud de la Californie, la construction d'une centrale solaire à l'aide d'un champ de CCP pour la production de l'énergie électrique avec une puissance initiale de 30 MW, ensuite elle a été développée pour atteindre une puissance de 80 MW, [19].

Actuellement les CCP assemblés dans des champs de collecteurs sont responsables pour toute production de l'énergie thermique solaire, le concentrateur cylindro-parabolique reste pour la production de la vapeur le convertisseur le plus compétitif, comme les centrales Luz utilisées pour la production de l'énergie électrique.

Aujourd'hui, des milliers de capteurs de ce type produisent une puissance totale de plus de 674 MWe dans le désert de Mojave au sud Californien qui représente 90 % de la capacité solaire installée au monde.

Le concentrateur cylindro-parabolique (Fig. 1), présente la technologie solaire la plus mature actuellement. Il se distingue par sa simplicité ainsi que ses performances élevées dans le domaine de la production de la vapeur d'eau. La détermination des performances d'un champ de concentrateur cylindro-parabolique dépend de plusieurs paramètres géométriques et optiques.

Le paramètre géométrique dominant est le facteur d'ombre qui intervient quand le concentrateur solaire se trouve dans un champ de capteurs. La puissance concentrée est alors réduite par les effets d'ombre causés par les collecteurs adjacents surtout pour une orientation Est-Ouest.

Mais aussi, les paramètres optiques, qui dépendent des propriétés des matériaux utilisés, de la disposition de l'absorbeur dans le plan focal et les erreurs angulaires des surfaces réfléchissantes.



Fig. 1: Champ de CCP

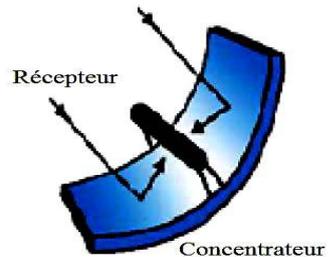


Fig. 2: Géométrie d'un CCP

2. FACTEURS GEOMETRIQUES

Facteur d'ombre

Le paramètre géométrique dominant est le facteur d'ombre qui intervient, quand le concentrateur solaire se trouve dans un champ de capteurs, où la puissance concentrée est alors réduite par les effets d'ombre causés par les collecteurs adjacents.

Il présente le rapport de la surface du champ affectée par l'ombre et l'effet d'extrémité du tube absorbeur à la surface totale du champ.

Pour un champ de concentrateurs, il est donné par l'expression [14]

$$\text{TotalF} = \left(1 - \frac{(N-1) \times SL \times SW + 2 NC \times W \times f \times \text{tg}(\theta)}{N \times n \times L \times W} \right) \times \cos(\theta) \quad (1)$$

$$SL = (W - D \times \sin EC) ; SW = (n \times L \times D \times |\text{tg AS}|)$$

$$\cos(\theta) = \sqrt{1 - \cos^2 \omega \times \sin^2 \delta}, \text{ représente l'angle d'incidence (Fig. 5)}$$

AS : l'azimut du soleil ; ES ; EC : l'altitude du soleil et du collecteur.

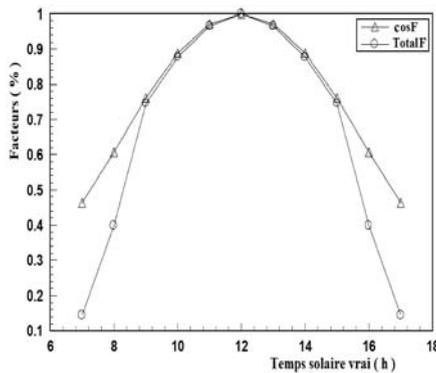


Fig. 3: Facteurs géométriques
Pour une journée d'été

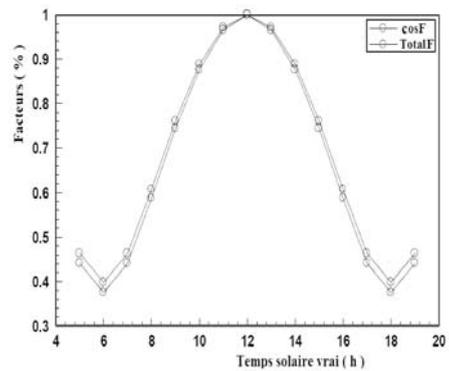


Fig. 4: Facteurs géométriques
Pour une journée d'hiver

Une orientation Est-Ouest du concentrateur implique que ces effets sont très importants au début et à la fin de la journée, surtout pour des journées comprises entre les équinoxes (Fig. 3, Fig. 4).

Ceci se traduit par l'effet de l'angle d'incidence qui prend des valeurs maximales durant cette période (Fig. 6).

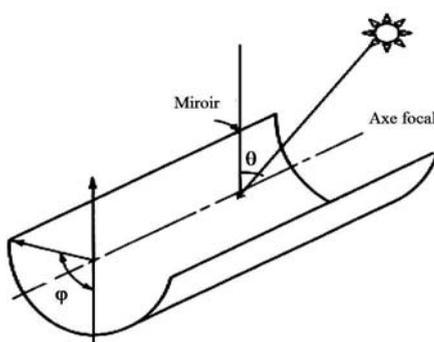


Fig. 5: Angles d'incidence et d'ouverture
pour un CCP

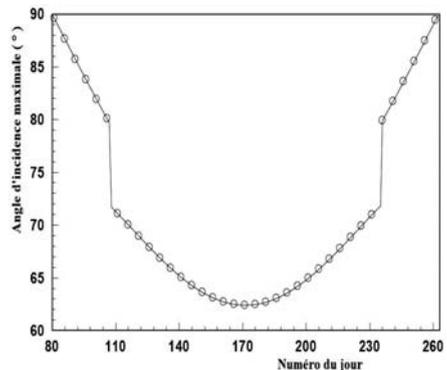


Fig. 6: Angle d'incidence maximale en
fonction des jours de l'année

3. FACTEURS OPTIQUES

3.1 Facteur d'interception

Le facteur d'interception γ est le facteur optique le plus compliqué dans le calcul de la performance optique d'un concentrateur CCP. Il représente le rapport entre l'énergie interceptée par l'absorbeur et celle réfléchiée par les surfaces réfléchissantes.

Il traduit le fait que certains rayons solaires peuvent être renvoyés vers l'extérieur du concentrateur ou bien passer à côté de l'absorbeur lorsque les surfaces optiques présentent des défauts ou des irrégularités et lorsque l'absorbeur est mal positionné dans le plan focal.

Donc il dépend des propriétés optiques des matériaux utilisés. Il existe aussi que certaines erreurs peuvent apparaître dans la construction du concentrateur ou sur le système de poursuite.

Si on utilise les paramètres d'erreurs universelles appliquées pour toutes les géométries de collecteurs, le facteur d'interception γ est donné par l'équation générale suivante: [11]

$$\gamma = \frac{1 + \cos \varphi}{2 \cos \varphi} \times \int_0^\varphi \text{Erf} \left[\frac{\sin \varphi \times (1 + \cos \varphi_i) \times (1 - 2d^* \times \sin \varphi_i) - \pi \beta^* (1 + \cos \varphi_i)}{\sqrt{2} \pi \sigma^* (1 + \cos \varphi)} \right] - \text{Erf} \left[-\frac{\sin \varphi \times (1 + \cos \varphi_i) \times (1 + 2d^* \times \sin \varphi_i) + \pi \beta^* (1 + \cos \varphi_i)}{\sqrt{2} \pi \sigma^* (1 + \cos \varphi)} \right] \times \frac{d\varphi_i}{(1 + \cos \varphi_i)} \quad (2)$$

La fonction d'erreur Erf est définie comme suit:

$$\text{Erf}(y) = \frac{2}{\pi} \times \int_0^y e^{-z^2} \times dz \quad (3)$$

Pour déterminer la valeur du facteur d'interception pour un collecteur d'angle d'ouverture φ , on intègre l'équation (2) numériquement en utilisant la méthode d'intégration de Simpson, en utilisant un polynôme de cinquième ordre.

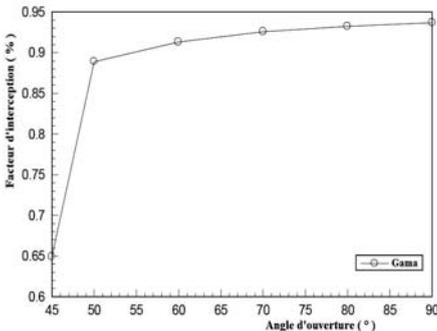


Fig. 7: Evolution du facteur d'interception en fonction de l'angle d'ouverture

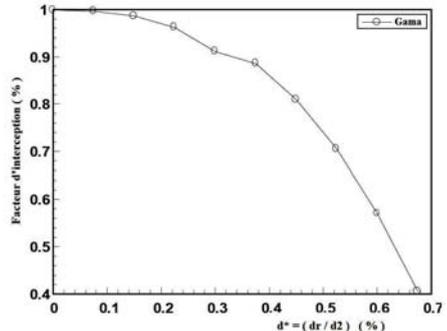


Fig. 8: Evolution du facteur d'interception du déplacement de l'absorbeur dans le plan focal

Pour une position idéale de l'absorbeur dans le plan focal, ce facteur d'interception prend des valeurs significatives et pour un angle d'ouverture supérieure à 50° , le taux du flux absorbé est supérieur à 80 % (Fig. 7).

En effet, l'angle d'ouverture du collecteur suggère la taille de la tache solaire sur la surface de l'absorbeur, et donc par voie de conséquence la taille de ce dernier pour intercepter le maximum de rayonnement solaire incident.

Pour un déplacement de 60 % de l'absorbeur dans le plan focal, le facteur d'interception prendrait une valeur de 60 % et selon [3] pour un CCP parfait, il prendrait la valeur de 95 %. En général, une dimension optimale d'un absorbeur produit un maximum d'énergie utile, ceci est obtenu par la réduction des pertes optiques et thermiques. Pour une grande dimension de l'absorbeur, il en résulte des pertes thermiques importantes et de faibles pertes optiques [10].

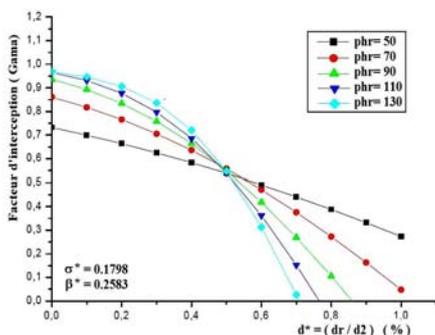


Fig. 9: Evolution du facteur d'interception en fonction de d^*

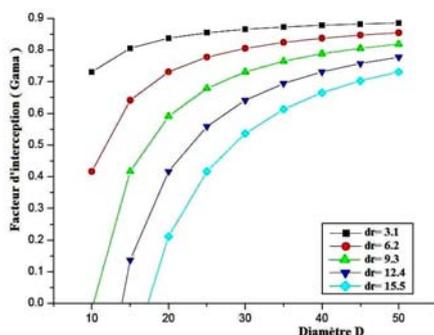


Fig. 10: Evolution du facteur γ en fonction de D de l'absorbeur

3.2 Angle d'incidence modifié

La variation de l'angle d'incidence pour les collecteurs asymétriques comme les collecteurs cylindro-paraboliques est très complexe. Dans ce type de collecteur, on ne doit pas prendre en considération uniquement l'angle d'incidence à la normale du collecteur, mais aussi les trois directions dimensionnelles du rayonnement incident qui traduisent les effets des pertes de transmittance du couvert, des pertes de réflectivité des miroirs réfléchissants, ainsi que les pertes d'absorption du tube absorbeur.

Les effets suscités à des angles d'incidence différents sont estimés par le facteur de l'angle d'incidence modifié $K(\theta)$, qui est donné en fonction de l'angle d'incidence et le rapport entre la radiation globale et directe, selon l'expression suivante: [13]

$$K(\theta) = \left(\frac{(\tau\alpha)_{\theta_i}}{(\tau\alpha)_n} \right) = 1 + b_0 \times \left[1 + \frac{I_{\text{direct}}}{I_{\text{global}}} \times \left(\frac{1}{\cos \theta_i} - 2 \right) \right] \quad (4)$$

b_0 : Coefficient inférieur à zéro pour un concentrateur cylindro-parabolique.

La valeur de $K(\theta)$ est toujours inférieure à l'unité et diminue avec l'augmentation de l'angle d'incidence. Mais pour certaines configurations du collecteur, le coefficient $K(\theta)$ peut être supérieur à l'unité, comme dans le cas des systèmes à multiples

réflexions où les pertes peuvent être plus grandes pour une incidence normale par rapport aux autres angles.

L'effet de l'angle d'incidence peut être traité davantage en mesurant directement son effet sur la performance du collecteur, en utilisant l'angle d'incidence modifié comme étant le rapport: [6]

$$K(\theta) = \frac{(\tau\alpha)_i}{(\tau\alpha)_n} \tag{5}$$

La figure 11, représente l'évolution de ce facteur en fonction de l'angle d'incidence calculé respectivement à l'aide des équations (4) et (5), Courbes (k1, k2). La variation de ce facteur a presque la même allure. Ce facteur décroît sensiblement avec l'accroissement de l'angle d'incidence et il est égal à 1 pour une incidence parallèle à la normale d'ouverture du collecteur

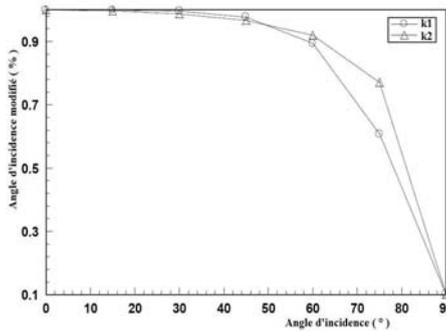


Fig. 11: Variation de l'angle incidence modifié en fonction de l'angle d'incidence

3.3 Rendement optique

Il prend en compte toutes les pertes optiques depuis la captation du rayonnement solaire, jusqu'à sa conversion en énergie thermique. Il est défini comme étant le rapport du rayonnement absorbé au rayonnement incident à l'ouverture du concentrateur. Il dépend des propriétés optiques du matériau utilisé, de la géométrie du collecteur, de l'angle d'incidence du rayonnement solaire.

La géométrie du collecteur implique un facteur géométrique qui mesure la réduction effective de la surface d'ouverture du concentrateur. Il est donné par l'expression:

$$\eta_0 = (\rho\tau\alpha) \gamma \times [(1 - \text{totalf} \times \text{tag}(\theta)) \times \cos(\theta)] \tag{6}$$

La figure 7 représente la variation du rendement optique pour une journée typique d'été.

Le rendement optique a été estimé à l'aide de l'expression suggérée par [12] qui tient compte de l'effet d'ombre, du facteur d'interception γ et de l'angle d'incidence. La figure 12 représente l'évolution du rendement optique pour une journée claire. Il atteint sa valeur maximale à midi vrai, et cette dernière est inférieure à 67 %.

3.4 Rendement thermique

Le rendement thermique global est égal au rendement optique, diminué de l'effet relatif aux pertes thermiques. Pour un récepteur donné, ce rendement dépend donc

essentiellement des pertes thermiques q_1 , de la température moyenne de fonctionnement T_1 et du flux solaire incident. Le rendement thermique global peut être écrit en fonction de la température d'entrée du fluide caloporteur et du rendement optique par l'équation suivante:

$$\mu = FR \times \left[\mu_0 - \frac{q_1 (T_e - T_a)}{I_b \times C} \right] \times (T_e - T_a) = \Delta T \quad (7)$$

Où FR est le facteur d'échange de chaleur par conduction à travers l'épaisseur du couvert.

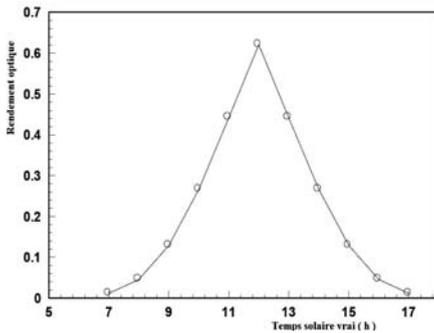


Fig. 12: Evolution du rendement optique pour une journée d'été

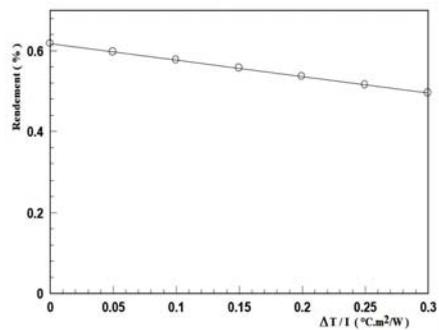


Fig. 13: Evolution du rendement global en fonction de ΔT

Selon [5], le rendement optique ne dépasse pas la valeur de 67 % pour un concentrateur parfait. De là, on peut conclure que le rendement thermique ne pourra dépasser cette valeur pour un concentrateur parfaitement isolé et dont les pertes thermiques sont négligeables.

4. PUISSANCE INTERCEPTÉE PAR L'ABSORBEUR

L'analyse théorique des collecteurs solaires implique principalement des pertes optiques, des pertes thermiques et un processus de transfert de chaleur. La puissance récupérée par unité de surface au niveau de l'absorbeur s'écrit [12]:

$$q_{\text{net}} = (\rho\tau\alpha) \times (q_d - q_{\text{ombre}} + q_{\text{int}}) - q_{\text{perd}} \quad (8)$$

Avec

-- $q_{\text{int}} = I_b \times \gamma$ Energie solaire incidente

-- $(\rho\tau\alpha)$ indique le produit de la réflectivité, la transmissivité et l'absorptivité effective du collecteur, qui est fonction de l'angle d'incidence du rayonnement solaire et de l'épaisseur du tube pyrex (couvert).

-- I_b Radiation solaire directe, calculé par la corrélation de Liu et Jordan [3], qui prend en compte le temps du jour de l'année, l'inclinaison du capteur, et les variations des données solaires dues à l'excentricité de l'orbite de la terre.

- $q_{\text{ombre}} = I_b \times (1 - \text{Total F})$ Perte par effet de l'ombre.
- q_d : Energie solaire incidente diffus calculé selon [3]
- q_{perd} : Pertes thermiques calculées à l'aide de l'expression suggérée par Mellick et al. [19]

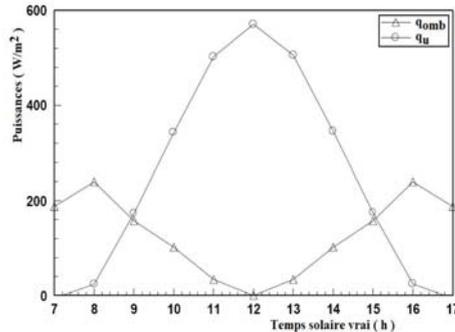


Fig. 14: Energie utile et perdue par effet d'ombre pour une journée typique d'hiver

Si le collecteur solaire est bien isolé par rapport à l'ombre, alors la géométrie particulière et l'ouverture de l'absorbeur n'ont pas d'effet sur l'énergie collectée par unité de surface.

Cependant, quand le collecteur se trouve dans un champ, la puissance concentrée est alors réduite par les effets d'ombre par les collecteurs avoisinants.

Afin de réduire ces effets, une distance optimale entre les capteurs s'impose. En général, les effets d'ombres modifient considérablement le taux de concentration, d'où le rendement de conversion atteint des valeurs inacceptables.

4. CONCLUSION

La simulation des performances de fonctionnement pris dans les mêmes conditions de la plateforme solaire d'Almeria a donné de bons résultats. La différence est due probablement dans le calcul de la radiation directe qui dépend beaucoup des paramètres du site [15].

Les performances d'un concentrateur sont fonction: du cosinus de l'angle d'incidence, de la taille, de la position de l'absorbeur dans le plan focal, du système de poursuite, et de l'ombre dû à la position côte à côte des collecteurs qui est d'après les résultats obtenus est très important au levé et le tard après-midi, et prend une valeur maximal pour les premiers heures du jour de l'hiver et que le facteur cosinus est le facteur de perte majeur.

Il est nécessaire de bien optimiser la taille de l'absorbeur pour bien obtenir un coefficient d'interception acceptable au environ de 90 % afin d'intercepter le maximum d'énergie incidente.

De même, la taille de l'absorbeur doit légèrement surdimensionnée afin de compenser les différentes erreurs. Et qu'il soit parallèle à l'axe longitudinal, si le

parallélisme existe, alors n'importe quel faible déplacement latéral considéré doit être compensé par le système de poursuite afin d'obtenir un rendement plus élevé

NOMENCLATURE

C : Facteur de concentration	f : Distance focale
CCP : Concentrateur cylindro-parabolique	$K(\theta)$: Angle d'incidence modifié
D : Distance entre deux lignées consécutives du champ de collecteurs	d^* : Paramètre d'erreurs non aléatoire universel due au mal positionnement de l'absorbeur dans le plans focal et les erreurs de profil du réflecteur ($d^* = dr/d2$)
σ^* : Paramètre d'erreur aléatoire universel (σ, C)	N : Nombre de ligne dans le champ
L : Longueur du concentrateur	α : Coefficient d'absorption de l'absorbeur
NC : Nombre des collecteurs dans le champ	τ : Coefficient transmission
η_0 : Rendement optique	σ : Déviation standard de la distribution normale du flux
ρ : Coefficient de réflexion monochromatique	τ : Coefficient transmission
γ : Facteur d'interception	β : Angle entre le rayon réfléchi du centre de soleil et la normal à l'ouverture
β^* : Paramètre non aléatoire universel due aux erreurs angulaires (β, C)	

REFERENCES

- [1] J.A. Duffie and W.A. Beckman, '*Solar Engineering of Thermal Processes*', 2nd Edition John Wiley, 1991.
- [2] J.M. Chassériaux, '*Conversion Thermique du Rayonnement Solaire*', Edition Dunod, France, 273 p., 1984.
- [3] E. Zarza, Collection Document Ciemat, Solar Thermal Desalination Project First Phase Results & Second Phase Description 1991.
- [4] S. Kalogirou, '*Parabolic Trough Collector System for Low Temperature Stream Generation: Design and Performance Characteristics*', Applied Energy, Vol. 55, N°1, pp. 1 - 19. 1996.
- [5] M. Rönnelid, B. Perers and B. Karlson, '*On the Factorisation of Incidence Angle Modifiers for CPC Collectors*', Solar Energy, Vol. 59, N°4-6, pp. 281 - 286, 1997.
- [6] C. Armenta-Deu and B. Lukac, '*A Correlation Model to Compute the Incidence Angle Modifier to Estimate its Effect on the Collectible Solar Radiation*', Renewable Energy, Vol. 1, N°5-6, pp. 803 - 809, 1991.
- [7] C.J. Saliel and M. Sokolov, '*Thermal and Optical Analysis of an Evacuated Circular Cylindrical Concentrating Collector*', Solar Energy, Vol. 29, N°5, pp. 391 - 396, 1989.
- [8] F. Henault and C. Royere, '*Concentration du Rayonnement Solaire : Analyse et Réponses Impulsionnelles et des Défauts de Réglage de Facettes Réfléchissantes*', Journal of Optics, Vol. 20, N°5, pp. 225 - 240, 1989.
- [9] F. Kreith and J.F. Kreider, '*Principles of Solar Engineering*', Mac Graw-Hill Book Company, New York, 1978.
- [10] J.R. Vaillant, '*Utilisation et Promesses de l'Energie Solaire*', Ed. Eyrolles, 1978.

- [11] S. Kalogirou, S. Lloyd and J. Ward, '*A Simplified Method for Estimating Intercept Factor of Parabolic Trough Collectors*', Proceedings of the Forth World Renewable Energy Congress, Denver, Colorado, USA, Vol. 3, pp. 1782 – 1786, 1996.
- [12] S. Kalogirou, S. Lloyd and J. Ward, '*Modelling, Optimisation, and Performance Evaluation of a Parabolic Trough Solar Collector Steam Generation System*', Solar Energy, Vol. 60, N°1, pp. 49 - 59, 1997.
- [13] P.J. Lunde, '*Solar Thermal Engineering*', Space Heat and Hot Water Systems', Ed. J. Wiley.
- [14] S. Kalogirou and C. Constantinou, '*A Comparative Study of Methods for Estimating Intercept Factor of Parabolic Trough Collectors*', Solar Energy, 2005.
- [15] M. Sanchez and A. Delgado, '*Geometrical Factors for Almeria Collectors which Track the Sun an East-West Axis Applied to the Acurex Field*', Internal report R-34/85 MSAD, Almeria, Plataforma solar de Almeria, 2002.
- [16] A. Gama, M. Haddadi and A. Malek, '*Etude et Réalisation d'un Concentrateur Cylindro Parabolique avec Poursuite Solaire Aveugle*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11, N°3, pp. 437 – 451, 2008.
- [17] S. Kalogirou, '*Seawater Desalination using Renewable Energy Sources*', Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 31, N°3, pp. 242 – 281, 2005.
- [18] E. Zarza, '*Direct Stream Generation in Parabolic Troughs operation and Maintenance Experience Update Projet Status*', Proceedings of Solar Forum 2001, Solar Energy: The Power to Choose, Washington, DC, April 21 - 25, 2001.
- [19] S.C. Mullick and S.K. Nanda, '*An Improved Technique for Computing the Heat Loss Factor of a Tubular Absorber*', Solar Energy, Vol. 42, N°1, pp. 1-7, 1989.