

Simulation Numérique d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique en El Oued, Algérie

Mokhtar GHODBANE^{#1}, Boussad BOUMEDDANE^{#2}, Soulef LARGOT^{*3}, Nour elhouda HENIAT^{*4}

[#] *Département de Mécanique, Faculté de technologie, Université Saad DAHLAB Blida 1, Algérie*

¹ ghmokhtar39seminaire@gmail.com

² b.boussad@gmail.com

^{*} *Faculté science de Technologie, Université d'El Oued, Algérie*

³ largot_soulef@yahoo.fr

⁴ nourelhoudahaniete39@gmail.com

Résumé— L'utilisation des énergies solaires n'est pas liée uniquement à ses avantages économiques mais surtout à la protection de l'environnement ou il faut trouver des solutions aux problèmes de pollution (énergie propre). Dans la nature, il ya beaucoup de sources d'énergies renouvelables, l'énergie solaire est le plus important. Le présent travail propose une étude numérique d'un concentrateur cylindro-parabolique à eau en site d'El Oued, Algérie. Nous développons un outil de simulation en langage Matlab, ce dernier nous permet de calculer les rayonnements solaires directs (DNI) selon le modèle de semi-empiriques de PERRIN BRICHAMBAUT, le rendement thermique, la variation de la température du fluide caloporteur et le coefficient des pertes thermiques pour le 21^{ème} jour des mois suivants : Mars, Juin, Septembre, Décembre. Le rendement thermique du concentrateur avait passé 60 % et atteint jusqu'à 60,5 % pour le 21 Juin.

Mots clés— *concentrateur cylindro-parabolique ; rayonnement solaire direct ; solaire thermique ; eau ; simulation.*

I. INTRODUCTION

Actuellement, la conservation des ressources énergétiques est devenue une priorité à l'échelle planétaire, d'autre part, vue la demande vertigineuse en matière d'énergie, ce qui a poussé les spécialistes à trouver de nouvelles techniques, telles que les énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, et géothermie,...etc.) [1].

La réduction des réserves en combustibles fossiles et l'augmentation de la pollution atmosphérique ont relancé la recherche sur l'exploitation des énergies renouvelables et en particulier l'énergie solaire. Pour le souci de surmonter les problèmes d'épuisement des ressources en énergies fossiles et la pollution atmosphérique qui ne cesse d'augmenter, la science s'oriente de plus en plus vers la recherche et l'exploitation des énergies renouvelables et en particulier le gisement inépuisable d'énergie solaire.

Il existe deux techniques distinctes pour la collection de l'énergie solaire qui peuvent être identifiées, la première catégorie est les capteurs plans, et le deuxième type est les

concentrateurs solaires, qui fournissent une quantité de chaleur considérable [2].

Les concentrateurs cylindro-parabolique «PTC» (Parabolic Trough Collector) sont les concentrateurs linéaires les plus largement utilisés pour la conversion thermodynamique de l'énergie solaire, surtout dans les domaines industriels et domestiques qui exigeant une température de service entre 80°C et 160°C [3]. La production d'électricité nécessite des températures élevées de 400°C à 1200°C Nous pouvons produire de la vapeur surchauffée dans les centrales électrique, avec des concentrateurs cylindro-parabolique, ou la température atteignant jusqu'à 1500°C et plus [4].

Les concentrateurs cylindro-parabolique est les technologies les plus prometteuses pour prendre la place des énergies non renouvelables (les énergies fossiles et les énergies nucléaires) surtout dans le domaine industriel (centrales électriques, systèmes hybrides, le dessalement, l'air conditionné, la réfrigération, irrigation, ...etc.) [5, 6].

Dans ce travail, on a exposé une étude des performances de concentrateur cylindro-parabolique à eau pour les journées du 21 janvier, 21 mars, 21 juin et 21 septembre. On va effectuer une analyse thermique, cette analyse nous permettra de prévoir le rendement thermique, la variation de la température de sortie de fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur et le coefficient des pertes thermiques. Nous avons sélectionnée la région d'El Oued pour mener cette étude. La région bénéficie d'un potentiel d'énergie solaire très important. La ville d'El Oued (Latitude 33° 07' 00'' N et Longitude 7° 11' 00'' E) représente nord-est du Sahara algérien [7].

II. ETUDE OPTIQUE

La modélisation optique de notre concentrateur solaire a été effectuée à l'aide du logiciel SolTrace qui permet de quantifier l'intensité de flux solaire concentré reçu au niveau de l'absorbeur. Le code « SolTrace » est développé par le laboratoire américain NREL [8].

Le tableau (1) présente les paramètres géométriques du collecteur.

TABLE I
 LES PARAMETRES GEOMETRIQUES DU COLLECTEUR

Caractéristique géométrique	Valeur (mm)
Diamètre extérieur de l'absorbeur (D_o)	22
Diamètre intérieur de l'absorbeur (D_i)	20
Diamètre extérieur de la vitre ($D_{v,o}$)	26
Diamètre intérieur de la vitre ($D_{v,i}$)	23,5
Longueur de miroir (L)	1500
largeur de miroir (l)	1100

On admet que les propriétés optiques (Coefficient de réflexion, absorptivité,...etc.) sont uniformes sur l'intégralité de la surface réfléchissante. On considère que le suivi solaire est très précis, dont l'ouverture du concentrateur est constamment perpendiculaire aux rayons provenant du disque solaire. Le système optique du collecteur considéré dans cette étude est composé de la surface réfléchissante du concentrateur et du tube absorbeur solaire, la surface réfléchissante est modélisée comme un seul miroir de section parabolique. Le logiciel utilise une technique de lancer de rayons comme une méthode de calcul [9], ce logiciel utilise la méthode de Monte Carlo. On applique une erreur optique moyenne globale ($\sigma_{optique}$) pendant la modélisation optique. Les paramètres optiques du collecteur sont indiqués au tableau (2).

TABLE III
 LES PARAMETRES OPTIQUES DU COLLECTEUR

paramètre	Valeur
erreur optique moyenne globale	03 mrad
Coefficient de réflexion de miroir (ρ_m)	0,92
Transmissivité de la vitre	0.945
Coefficient d'absorbions de l'absorbeur (α)	0,94

La simulation optique permet :

- estimer les flux incidents sur la surface de l'absorbeur ;
- calculer la concentration d'énergie solaire sur l'absorbeur.

Au cours de modélisation optique, nous prenons en compte tous:

- Valeur de rayonnement solaire à chaque instant,

- La valeur de l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur le miroir réfléchissant.
- Les propriétés de chaque miroir (ingénierie et optique)
- Les propriétés de l'absorbeur (géométriques et optiques)

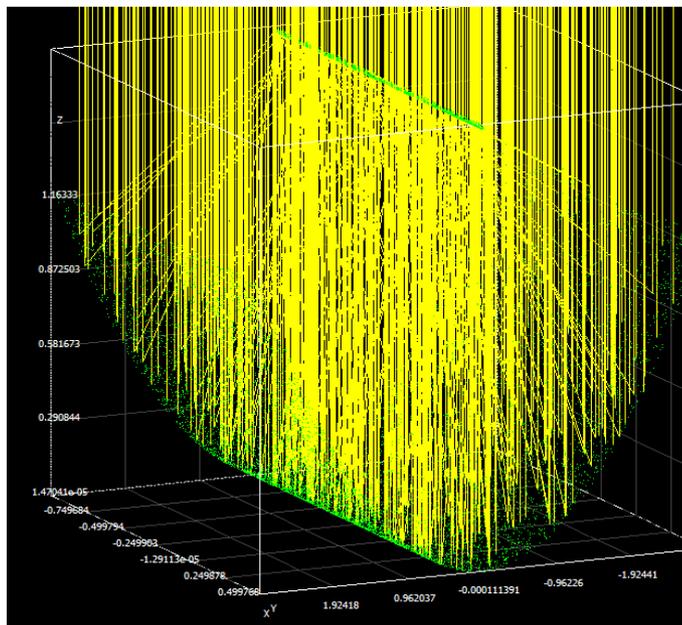


Fig.1. Schéma de concentrateur cylindro-parabolique avec le logiciel SolTrace.

III. ETUDE THERMIQUE

Pour le calcul des bilans énergétiques on pose comme hypothèses :

- Le fluide caloporteur est incompressible ;
- La forme de parabole est symétrique;
- La température ambiante autour du concentrateur est uniforme;
- L'effet de l'ombre du tube absorbeur sur le miroir est négligeable ;
- Le flux solaire au niveau de l'absorbeur est uniformément réparti ;
- La vitre est considérée comme opaque aux radiations infrarouges ;
- Les échanges par conduction dans l'absorbeur et la vitre sont négligeables.

Le flux transmit au fluide (la puissance gagnée au collecteur) est donné par la relation suivante [10]:

$$q_{\text{utile}} = F_r \left[\eta_{\text{op}} \text{DNI} A_a - U_L A_r (T_i - T_{\text{amb}}) \right] \quad (1)$$

Avec

DNI est le rayonnement solaire direct, [W.m⁻²].

A_a est la surface d'ouverture du collecteur, [m²].

A_r est la surface du tube absorbeur, [m²].

T_i est la température d'entrée de fluide, [K ou °C].

T_{amb} est la température de l'ambiance, [K ou °C].

F_r est le facteur de dissipation de la chaleur [10].

$$F_r = \frac{\dot{m} C_p}{A_a U_L} \left[1 - e^{-\left(\frac{A_a U_L F'}{\dot{m} C_p} \right)} \right] \quad (2)$$

Avec

\dot{m} est le débit massique, [Kg.s⁻¹].

C_p est la capacité thermique de fluide, [J.kg⁻¹. K⁻¹].

On peut exprimer l'efficacité optique (η_{opt}) du concentrateur par [11]:

$$\eta_{\text{opt}} = \alpha \cdot \rho_m \cdot \gamma \cdot K_{\text{cam}} \quad (3)$$

Avec

α est le coefficient de l'absorption du tube absorbeur.

ρ_m est le facteur de réflectance du miroir.

K_{cam}: le facteur de correction d'angle d'incidence.

(U_L) est le coefficient de perte thermique [10].

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_w + h_{r,c-a}) A_v} + \frac{1}{h_{r,r-a}} \right]^{-1} \quad (4)$$

Avec

A_v est la surface de la vitre, [m²].

Ou (h_w) est le coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'ambiance, [W.m⁻².K⁻¹] [10].

$$h_w = \frac{0,3 \text{Re}^{0,6} K}{D_{v,o}} \quad (5)$$

Avec

Re est le nombre de Reynolds

K est le coefficient de conductivité thermique de l'absorbeur, [W.m⁻¹.k⁻¹].

($h_{r,c-a}$) est le coefficient d'échange radiatif entre la vitre et l'ambiance, [W.m⁻².K⁻¹] [10].

$$h_{r,c-a} = \varepsilon_v \sigma (T_v + T_{\text{amb}})(T_v^2 + T_{\text{amb}}^2) \quad (6)$$

($h_{r,r-a}$) est le coefficient d'échange radiatif entre l'absorbeur et la vitre, [W.m⁻².K⁻¹] [10, 12].

$$h_{r,r-a} = \frac{\sigma (T_v + T_r)(T_v^2 + T_r^2)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{A_r}{A_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_v} - 1 \right)} \quad (7)$$

Avec

σ est la constante de Stephan ($\sigma = 5,66897 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{k}^{-4}$)

T_v est la température de la vitre, [K ou °C].

T_r est la température de l'absorbeur, [K ou °C].

A_c est la surface de la vitre, [m²].

ε_r est l'émissivité d'absorbeur.

ε_v est l'émissivité de la vitre.

F' est le facteur d'efficacité du miroir [10].

$$F' = \frac{1}{U_L} \frac{1}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \left(\frac{D_o}{2K} \ln \frac{D_o}{D_i} \right)} \quad (8)$$

Avec

h_f est le coefficient d'échange thermique à l'intérieur de l'absorbeur, $[W.m^{-2}.K^{-1}]$.

Pour calculer la température de sortie, l'équation suivante a été utilisée [12],

$$T_o = T_i + \frac{q_{utile}}{\dot{m} C_p} \quad (9)$$

On peut calculer le rendement thermique par l'équation [10]:

$$\eta_{th} = \frac{q_{utile}}{DNI A_a} \quad (10)$$

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

La modélisation thermique de le concentrateur cylindro-parabolique est faite par une procédure de calcul et programmation, pour cela nous avons élaboré un programme de calcul pour simuler le rendement thermique, la température de fluide à la sortie de l'absorbeur et le coefficient des pertes thermique ainsi que l'éclairement direct et la puissance utile. Dans le calcul du concentrateur, l'énergie solaire absorbée dépend du rayonnement solaire normal (DNI) car seulement la composante directe est focalisée et concentrée par les systèmes de concentrateurs solaires. La figure (2) traduit la variation du rayonnement solaire direct (DNI) durant quatre journées comme suite : 21 Mars, 21 Juin, 21 septembre et 21 Décembre. Pour calculer le rayonnement solaire globale du lever jusqu'au coucher du soleil, on a élaboré un algorithme qui permet de simuler le rayonnement solaire direct par le modèle semi-empiriques de PERRIN BRICHAMBAUT [13].

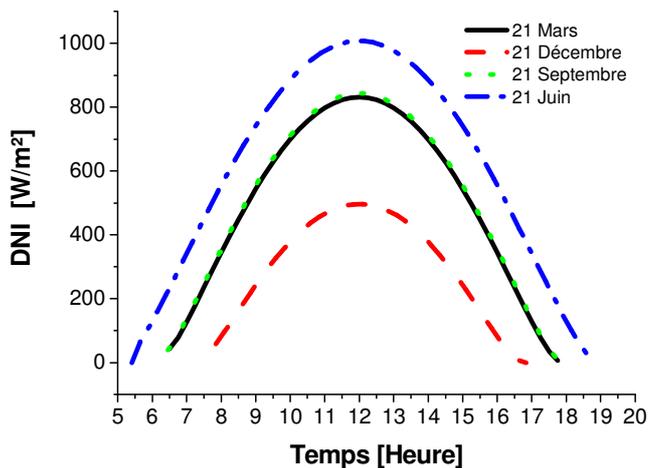


Fig.2. L'évolution du rayonnement solaire direct (DNI) $[W.m^{-2}]$.

On remarque que pour la journée du 21 Juin, le rayonnement direct est maximal au midi solaire vrai qui peut atteindre $1000 [W.m^{-2}]$.

Notons que cette évaluation permet seulement d'approcher les valeurs réelles des flux impactant l'absorbeur avec une réflectivité des miroirs de 92 % et des valeurs réels d'éclairement. L'objectif principal de la caractérisation optique de notre concentrateur est de connaître le pouvoir de concentration de collecteur cylindro-parabolique, et l'observation de l'évolution du flux thermique au niveau de l'absorbeur en fonction de la variation de l'angle d'incidence des rayons solaire. La figure (3) présente le contour de l'intensité de flux thermique moyen avec une valeur de rayonnement solaire direct égal à $900 [W.m^{-2}]$.

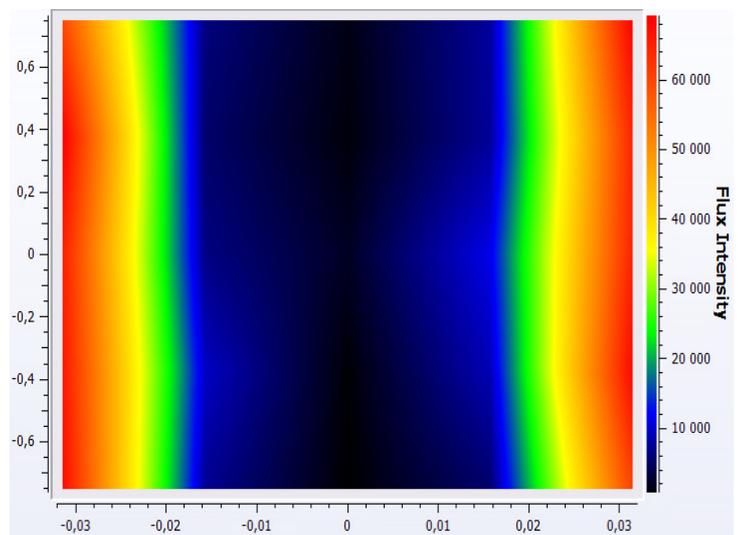


Fig.3. le contour de l'intensité de flux moyen au niveau de l'absorbeur avec $DNI = 900 [W.m^{-2}]$.

La figure (4) traduit la distribution moyenne de flux thermique. Nous observons bien, une bonne répartition de flux thermique au niveau de la surface l'absorbeur. On peut dire que notre concentrateur est éprouvé et présenté dans l'ensemble un bon comportement optique.

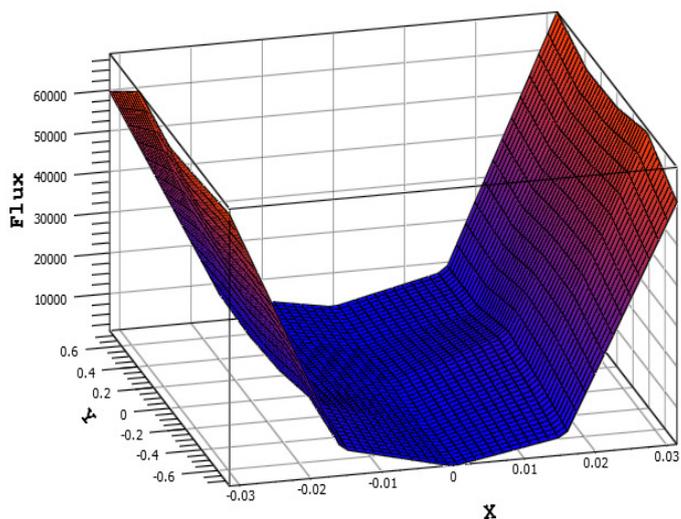


Fig.4. la distribution moyenne du flux thermique au niveau de l'absorbeur DNI =900 [W.m⁻²].

La figure (5) montre l'évolution des rendements thermiques en fonction du temps pour les quatre journées des tests.

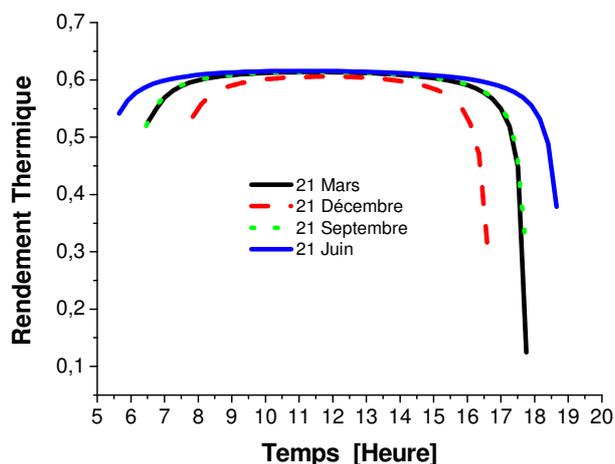


Fig.5. Evolution des rendements thermiques.

le rendement optique de notre collecteur est supérieur de 61%. Pour le rendement thermique, on remarque que le rendement diminue après la valeur maximal (60,5%), car la température d'entrée de l'eau est presque identique à la température ambiante, ce qui correspond ainsi à une parfaite isolation thermique et des pertes thermiques plus faible vers l'ambiance. On peut dire que cette diminution est due aux pertes thermiques qui croient avec l'augmentation des températures de l'eau respectivement à l'entrée et à la sortie de l'absorbeur.

Le débit moyen d'eau à l'intérieur du tube absorbeur est égal à 0,015kg.s⁻¹. La figure (6) représente l'évaluation de la température de fluide à la sortie de tube absorbeur, durant le déroulement des tests en fonctions du temps.

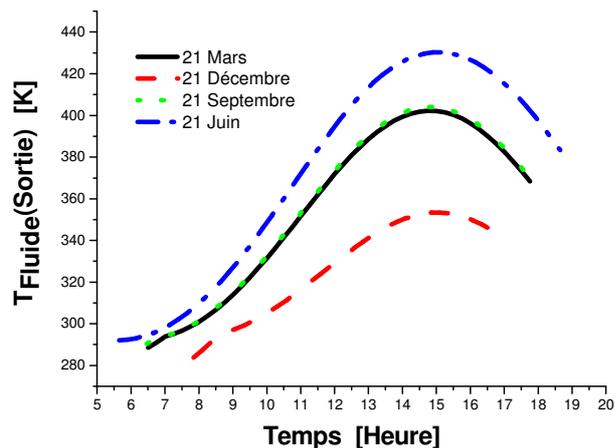


Fig.6. L'évolution de la température de sortie en fonction du temps.

Dans les quatre courbes l'évolution des températures est la même, la différence réside uniquement au niveau des pentes des courbes.

On montre des valeurs significatives qui varient entre 20 jusqu'à un maximum de 135 °C obtenues entre 12h30 et 14h00 pour la journée de 21 Juin. Donc, l'utilisation des concentrateurs solaires cylindro-paraboliques permettent d'atteindre des températures très élevées, Les résultats obtenus sont très encourageants pour l'investissement de ce type dans plusieurs domaines industrielles.

Le modèle thermique prend en compte tous les modes de transfert de chaleur; convection dans le conduit de récepteur, dans l'espace annulaire entre le récepteur et l'enveloppe de verre d'une part, et de l'enveloppe de verre et l'air ambiant d'une autre part.

Les résultats montrent que la température de sortie du fluide caloporteur dépend du flux solaire incident et des conditions climatiques environnantes. Ces résultats sont très satisfaisants en comparant avec les résultats numérique de site d'Alger [14] avec le même débit massique de fluide caloporteur (0,015 Kg.s⁻¹), ou la température de sortie du fluide caloporteur (eau) pour le site d'Alger atteint sa valeur maximale de l'ordre 439 [K] enregistrée au midi solaire vrai pour la journée du 12 Septembre.

La figure (7) représente l'évolution du coefficient des pertes thermiques en fonction de la différence de température entre le tube absorbeur et l'ambiance.

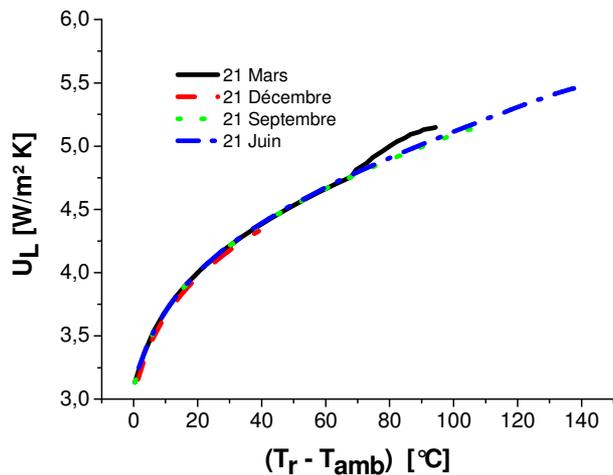


Fig.7. Évolution du coefficient des pertes thermiques.

On observe que les pertes augmentent avec l'accroissement de la température de l'absorbeur, donc l'absorbeur est le siège des pertes thermiques, la création de vide entre l'absorbeur et l'enveloppe transparente en verre pourrait réduire nettement les pertes par convection. Par conséquent, la corrélation du coefficient des pertes thermiques moyennes pour notre prototype était:

$$U_L = 0,022(T_r - T_{amb}) + 3,446 \quad (11)$$

Avec un coefficient de détermination (R^2) sur la graphique égale à 0,981.

Nous mentionner que notre prototype a des petites dimensions. Si nous voulons obtenir des températures de fluide plus élevées, vous devez utiliser un concentrateur cylindro-parabolique avec des plus grandes dimensions.

V. CONCLUSION

La technologie de réflecteurs cylindro-paraboliques est la plus fréquente. Actuellement, elle est utilisée par les plus puissantes centrales solaires au monde. Ce travail propose une étude d'efficacité thermique d'un concentrateur cylindro-parabolique qui utilise l'eau comme fluide caloporteur. Ce fluide est caractérisé par son grand coefficient de transfert de chaleur. L'absorbeur est l'élément essentiel du capteur solaire, il doit absorber la plus grande partie des rayonnements solaires et transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec le minimum des pertes. L'étude basée sur un modèle thermique pour contrôler le rendement thermique, la température de sortie du fluide à la sortie de tube absorbeur et le coefficient des pertes thermiques.

On remarque que la température de fluide à la sortie du tube absorbeur est supérieure à 100°C, ceci montre qu'on peut avoir de la vapeur sans énergie consommée et un faible taux d'émission. Les résultats obtenus sont très

encourageants pour plusieurs applications industrielles. L'utilisation des concentrateurs cylindro-parabolique est particulièrement intéressante, puisque ces concentrateurs qui sont très développés dans les dernières années, notamment pour la production de la vapeur surchauffée pour alimenter des turbines à vapeur qui peuvent servir à assurer l'énergie nécessaire au fonctionnement des installations. Dans le Sud, où l'ensoleillement est très important, le solaire peut fournir l'énergie nécessaire à l'industrie au moindre coût. Et sans risques pour l'environnement. Le travail qui nous a été proposé à travers de cet étude nous permis d'élargir nos connaissances scientifiques surtout en ce qui concerne un domaine d'avenir pour notre pays.

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos sincères remerciements à l'équipe de l'Université de Blida 1, spécifiquement le département de génie mécanique, et nous n'oublions pas de remercier l'équipe d'université d'El Oued sur les grands efforts qu'ils ont fait pour encourager la recherche scientifique.

REFERENCES

- [1] Wikipédia. (2015) Énergie renouvelable, [en ligne], disponible: http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable
- [2] Wikipédia. (2015) Énergie solaire, [en ligne], disponible: http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire
- [3] Al-Rubaian, Ali I, Al-fares and Hamad, "Performance of single Axis tracking solar parabolic trough in Riyadh Saudi Arabia," presented at World renewable energy congress VIII, Denver, Colorado USA, August 29-September 3, 2004
- [4] J.R.Vaillant, *Utilisation et promesse de l'énergie solaire*, 1978.
- [5] Arif Hepbasli and Zeyad Alsuhaibani, "A key review on present status and future directions of solar energy studies and applications in Saudi Arabia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . vol. 15, pp. 5021–5050, 2011.
- [6] A. Fernandez-Garcia, E. Zarza, L. Valenzuela and M.Pérez, "Parabolic-trough solar collectors and their applications", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1695–1721, 2010.
- [7] Wikipédia. (2014) El Oued, [en ligne], disponible: http://fr.wikipedia.org/wiki/El_Oued
- [8] NREL, *SolTrace: A Ray-Tracing Code for Complex Solar Optical Systems*, Technical Report October 2013.
- [9] P. Garcia, A. Ferriere, and J.-J. Beziau, "Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: A comparative review," *Solar Energy*, vol. 82, pp. 189-197, 2008.
- [10] S. Kalogirou, "Thermal analysis of parabolic trough collectors," in *solar energy engineering- processes and systems, Thermal analysis of parabolic trough collectors*, 1 ed, 2009, pp. 199-202.
- [11] D Yogi Goswami, Frank Kreith and Jan F Kreider, *Principles of solar engineering: Off-Normal Incidence Effects*, T. Francis, 2nd Edition, 1999, pp. 139.
- [12] M. Li and L.L. Wang, "investigation of Evacuated Tube Heated by Solar Trough Concentrating System," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 3591–3601, 2006.
- [13] Mokhtar GHODBANE, Boussad BOUMEDDANE, Soulef LARGOT et Nour el houda HENIAT, "développement d'un programme informatique pour la simulation du rayonnement solaire reçu par une surface inclinée," presented at Journée d'étude sur les

énergies renouvelables et leurs applications, Université d'El Oued,
Avril 2015.

- [14] Mokhtar GHODBANE, Boussad BOUMEDDANE, Soulef LARGOT et Nour el houda HENIAT, "étude optique et thermique d'un concentrateur cylindro-parabolique en site d'Alger, Algérie," presented at IXth International Congress on Renewable Energy and the Environment, 18-20 March 2015, Djerba, Tunisia, Avril 2015.