

NUMERICAL MODELING OF A PARABOLIC TROUGH SOLAR COLLECTOR AT BOUZARÉAH, ALGERIA

M.Ghodbane* , B.Boumeddane

Faculty of Technology, University of Saad DAHLAB, Blida 1, Algeria

ABSTRACT

In this paper, we are interested in numerical study conversion of the solar energy into thermic energy using a Parabolic through Collector at Bouzaréah, Algeria. Water is used as a heat carrier fluid. A mathematical model drawn from the energy balance equation applied to the absorber tube, it was solved by the finite difference method. A computer program was developed to solve our problem. MATLAB used as a tool for simulation. This program allows calculating the change in thermal efficiencies, the absorber tube temperatures, the fluid temperatures, the glass temperatures and the coefficient of heat loss. The results are very honorable and encouraging, where the thermal efficiency of the concentrator had passed 60%.

Keywords: *Parabolic through Collector, outlet temperature, fluid, numerical simulation.*

Résumé

Dans ce travail, on s'intéresse à étude et simulation numérique de la conversion d'énergie solaire en énergie thermique en utilisant un concentrateur cylindro-parabolique (Parabolic Trough Collector) en Bouzaréah, Algérie. On utilise l'eau comme un fluide caloporteur. Un modèle mathématique établi à partir de l'équation du bilan énergétique appliquée au tube absorbeur. Le modèle mathématique résultant a été solutionné par la méthode des différences finies. Un modèle informatique a été développé pour la résolution de notre problème, on utilise en MATLAB comme outil de simulation. Ce programme nous permet de calculer la variation des rendements thermiques, les températures du tube absorbeur, les températures du fluide caloporteur, les températures de la vitre et le coefficient pertes thermique. Les résultats obtenus à partir de simulations numériques très honorables et encourageants, où le rendement thermique du concentrateur avait passé 60 %.

Mots clés: *Concentrateur cylindro-parabolique, solaire thermique, température de sortie, fluide, simulation numérique.*

© 2015 IJCPs. All rights reserved

* Corresponding author.
E-mail addresses: ghmokhtar39seminaire@gmail.com
© 2015 IJCPs. All rights reserved.

1. INTRODUCTION

Le soleil est la principale source d'énergie dans l'univers, où une moyenne de 1367 [W/m²] atteint du bord externe de l'atmosphère terrestre selon le centre radiométrique mondial de Davos (Suisse) [1], et 1366 [W/m²] selon la norme ASTM E490-00a [2]. Le rayonnement solaire global est la somme de deux composantes Directe et Diffus [3-6].

L'Algérie dispose d'un des gisements les plus élevés à l'Afrique. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara [7]. Dans cette étude numérique, nous allons tenter d'exploiter cette énergie solaire dans la production de vapeur en utilisant un concentrateur solaire linéaire, est le concentrateur cylindro-parabolique, ce genre de concentrateur nous donne une température de fluide que nous pouvons utiliser industriellement et en domestique dans une plage thermique entre 80 et 160 °C [8, 9]. Selon la taille et la position de le collecteur CCP, nous pouvons obtenir des températures de vapeur jusqu'à 1500°C, selon des études mentionné dans la littérature scientifique [10].

Dans des travaux antérieurs, nous devons étudier un concentrateur solaire avec les mêmes caractéristiques, mais dans une zone désertique « Wilaya D'El Oued, le sud-est de la Sahara algérienne », les résultats obtenus sont très encourageants et très honorable pour exploiter cette richesse solaire [9]. La figure (1) montre la moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale, période 1992-2002 dans le territoire national.

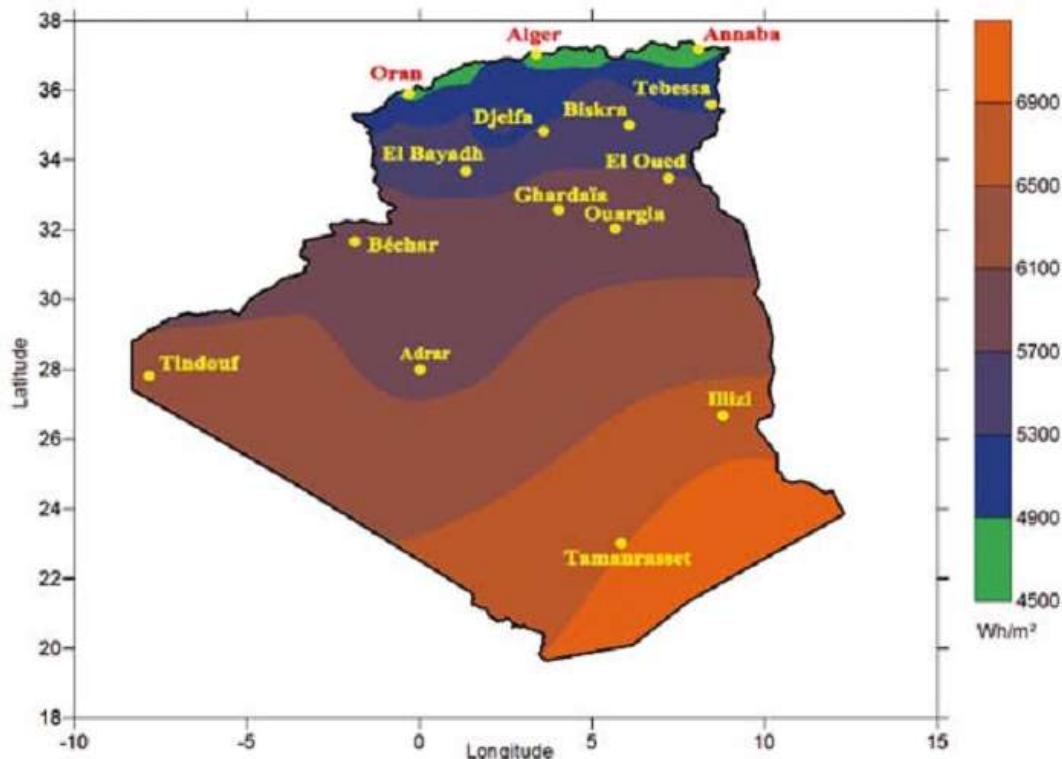


Figure .1. Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale, période 1992-2002 [Wh/m²] [2].

La technologie de réflecteurs cylindro-paraboliques est la plus fréquente et est actuellement utilisée par les plus puissantes centrales solaires au monde, nous citons dans ce contexte, La centrale solaire de Kramer Junction en Californie [11]. Elles représentent une capacité totale installée de 354 MW. Ce type de centrale se compose

d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, orientés sur l'axe nord-sud qui tournent autour de ce dernier pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal, où circule un fluide caloporteur qui servira à transporter la chaleur vers des échangeurs de chaleur.

Dans cette étude s'intéresse à la conversion de l'énergie solaire à l'énergie thermique en utilisant un concentrateur cylindro-parabolique à eau. Notre but dans cette étude consiste à caractériser les performances optiques et thermiques de concentrateur cylindro-parabolique en fonction des paramètres géographiques et conditions climatiques du site de Bouzaréah, Algérie.

On étude d'abord la performance optique du collecteur solaire avec le logiciel de calcul par lancer de rayons, est SolTrace. Dans la deuxième étape, Un modèle mathématique a été établi avec Matlab pour calculer le rendement thermique, les températures de sortie du fluide, les températures de l'absorbeur, les températures de la vitre et coefficient des pertes thermiques. La simulation est effectuée avec des intensités différentes d'ensoleillement.

2. ETUDE OPTIQUE

La modélisation optique a été effectuée à l'aide du logiciel SolTrace, le code est développé par le laboratoire américain NREL [12]. Le système optique du concentrateur considéré dans notre étude est composé de la surface réfléchissante du concentrateur et de l'absorbeur. La surface réfléchissante du concentrateur est modélisée comme un seul miroir de section parabolique. Le tableau (1) présente les paramètres géométriques du collecteur.

Tableau.1. Les paramètres géométriques du collecteur.

Caractéristique géométrique	Valeur
Diamètre extérieur de l'absorbeur ($D_{A,ext}$)	22
Diamètre intérieur de l'absorbeur ($D_{A,int}$)	20
Diamètre extérieur de la vitre ($D_{V,ext}$)	26
Diamètre intérieur de la vitre ($D_{V,int}$)	23,5
Longueur de miroir (L)	1500
largeur de miroir (l)	1100

On admet que les propriétés optiques (Coefficient de réflexion, absorptivité, transmissivité,...etc.) sont uniformes sur l'intégralité de la surface réfléchissante. On considère que le suivi solaire est très précis et donc que l'ouverture du concentrateur est constamment perpendiculaire aux rayons provenant du disque solaire.

Comme nous l'avons dit précédemment, la surface réfléchissante du concentrateur est modélisée comme un seul miroir de section parabolique avec une erreur optique moyenne globale ($\sigma_{optique}$). Les paramètres optiques du collecteur sont indiqués au tableau (2).

Tableau.2. Les paramètres optiques du collecteur.

paramètre	Valeur
erreur optique moyenne globale ($\sigma_{optique}$)	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
L'émissivité du tube absorbeur (ε_A)	0,12

Pour les concentrateurs solaires, l'énergie solaire absorbée dépend du rayonnement solaire normal (DNI) car seulement la composante directe [9], Le rayonnement direct provient directement du Soleil. Les radiations solaires directes peuvent être mesurées par un pyrhéliomètre.

La figure (2) représente les valeurs du rayonnement global mensuel reçu sur un plan horizontal obtenues pour le site de Bouzaréah, W. Alger, Algérie.

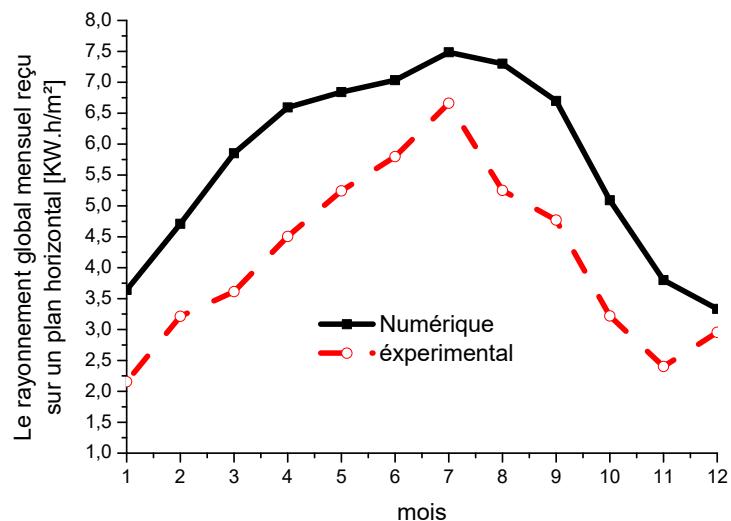


Figure .2. Le rayonnement global mensuel reçu sur un plan horizontal [KW.h/m²].

La figure (3) traduise la variation du rayonnement direct (DNI) durant les quatre journées comme suite : 22 Mars, 17 Juin, 12 septembre et 03 Décembre. On remarque que pour la journée du 12 septembre, le rayonnement direct est maximal au midi solaire vrai qui peut atteindre 915 [w/m²].

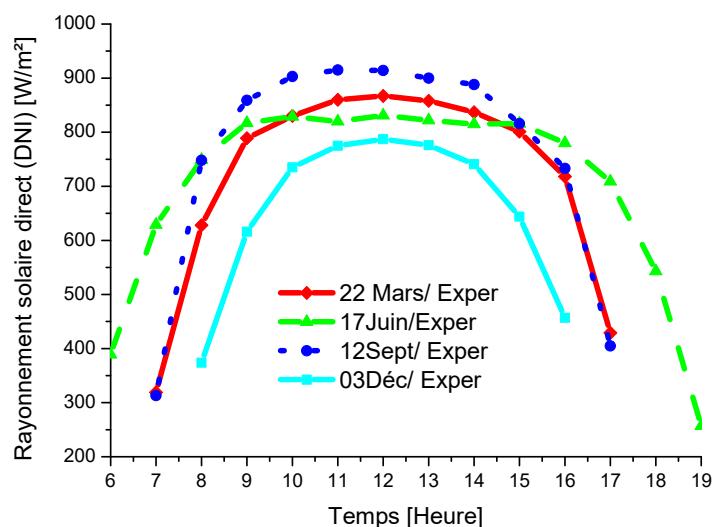


Figure .3. Mesures expérimentales du rayonnement direct dans le site de Bouzaréah.

La figure (4) illustre l'énergie solaire capturée, comme présentée dans SolTrace. On essaie de montrer l'importance et l'efficacité de collecteur cylindro-parabolique dans le domaine de la concentration solaire.

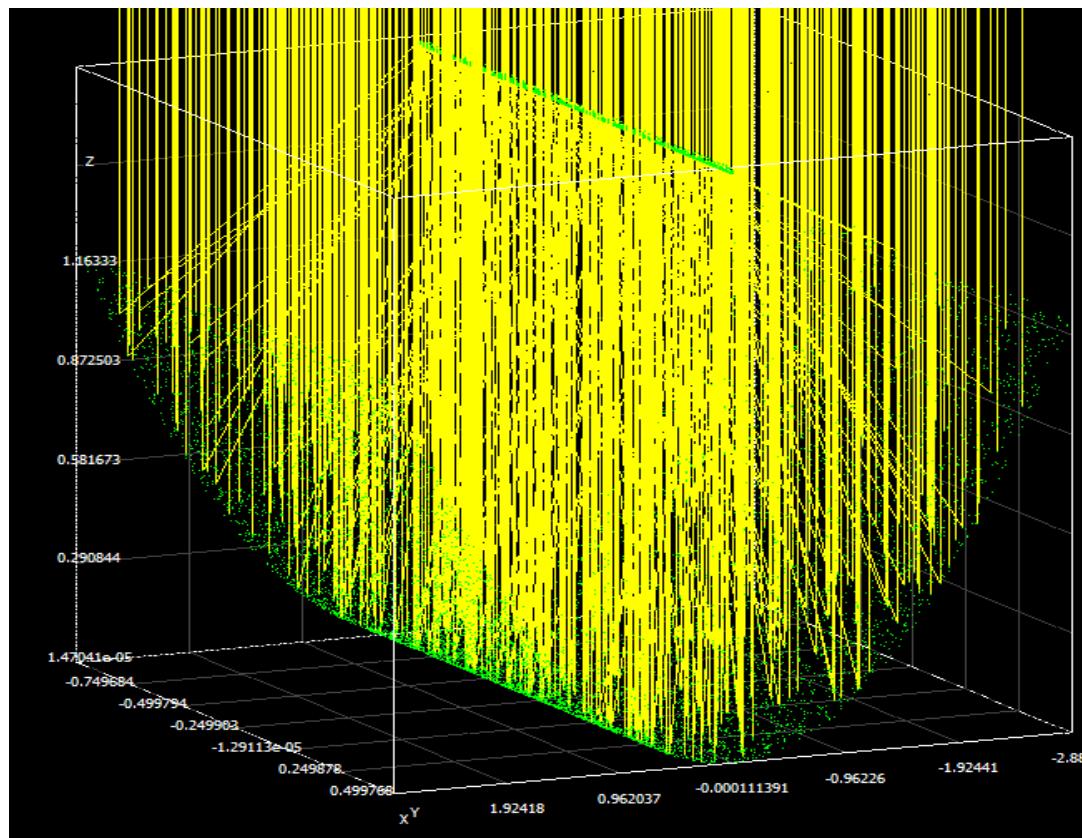


Figure .4. Schématisation de concentrateur cylindro-parabolique par SolTrace.

3. ETUDE THERMIQUE

Dans cette partie, on va effectuer l'analyse thermique et la modélisation numérique d'un concentrateur cylindro-parabolique (CCP). Cette modélisation est employée pour prévoir la variation de la température de sortie d'un fluide caloporteur (eau) en fonction de l'éclairement solaire direct du site d'Alger Bouzaréah. Les échanges thermiques existant dans le système concentrateur ont lieu entre les trois éléments : le fluide caloporteur, l'absorbeur et la vitre. La modélisation de la température est basée sur les bilans énergétiques caractérisés par les équations différentielles des trois températures : T_F (pour le fluide), T_v (pour la vitre) et T_A (pour le tube absorbeur), ces équations varient en fonction de deux paramètres, à savoir le temps (t) et la longueur (x) de l'absorbeur. Pour le calcul des bilans énergétiques, on pose comme hypothèses [9, 13]:

- 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.

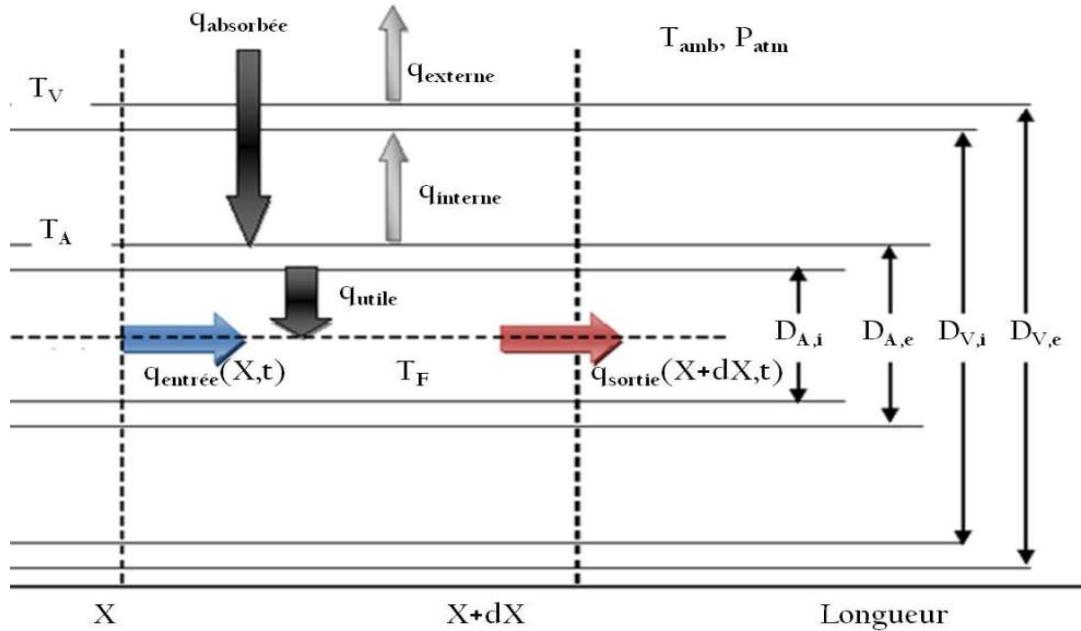


Figure .5. Bilan thermique d'un élément de surface du concentrateur cylindro parabolique.

3.1. Bilan énergétique pour le fluide

Le bilan énergétique pour le fluide caloporteur qui circule dans le tube absorbeur est exprimé par la relation suivante :

$$\rho_F \cdot C_F \cdot A_{A,int} \cdot \frac{\partial T_F(X,t)}{\partial t} = q_{utile} - \rho_F \cdot C_F \cdot \dot{V} \cdot \frac{\partial T_F(X,t)}{\partial X} \quad (1)$$

Les conditions initiales et les conditions aux limites de l'équation (1) sont :

$$\begin{aligned} T_F(0,t) &= T_{F,entrée}(t) = T_{amb}(t) \\ T_F(X,t) &= T_{F,initial}(t) = T_{amb}(0) \end{aligned} \quad (2)$$

3.2. Bilan énergétique pour l'absorbeur

Le bilan énergétique pour l'absorbeur est donné par la relation suivante :

$$\rho_A \cdot C_A \cdot A_A \cdot \frac{\partial T_F(X,t)}{\partial t} = q_{absorbé}(t) - q_{sortie}(X,t) - q_{utile}(X,t) \quad (3)$$

Les conditions initiales relatives à l'équation (3) sont :

$$T_A(X,t) = T_{A,initial}(t) = T_{amb}(0) \quad (4)$$

3.3. Bilan énergétique de la vitre

De la même façon le bilan énergétique pour la vitre est donné par :

$$\rho_v \cdot C_v \cdot A_v \cdot \frac{\partial T_v(X,t)}{\partial t} = q_{int\,erne}(X,t) - q_{externe}(X,t) \quad (5)$$

La condition initiale de l'équation (5) est :

$$T_v(X,t) = T_{v,initial}(t) = T_{amb}(0) \quad (6)$$

Pour résoudre ce problème, nous avons choisi la méthode des différences finies. Un programme de calcul en Matlab a été établi après la discréétisation des équations non linéaire ce qui nous a permis d'obtenir un ensemble de résultats numériques.

La puissance thermique émise par le soleil et reçue par le concentrateur vaut donc[14] :

$$q_{absorbée} = \alpha \cdot \rho_m \cdot \gamma \cdot S_e \cdot K \cdot DNI \quad (7)$$

On peut exprimer l'efficacité optique (η_{opt}) du concentrateur par [15]:

$$\eta_{opt} = \alpha \cdot \rho_m \cdot \gamma \cdot K \quad (8)$$

et l'efficacité thermique (η) par [15]:

$$\eta = \eta_{opt} - \frac{U_L \cdot A_A \cdot (T_A - T_{amb})}{DNI \times A_C} \quad (9)$$

3.4. Pertes thermiques dans un concentrateur cylindro-parabolique

Le coefficient des pertes thermiques U_L est exprimé par :

$$U_L = \left(\frac{1}{C_1 \left[\frac{T_A - T_{amb}}{1 + f} \right]^{0,25}} + \frac{D_{A,int}}{D_{A,ext} \times h_v} \right)^{-1} + \left(\frac{\sigma (T_A^2 + T_{amb}^2) \cdot (T_A + T_{amb})}{\left[\varepsilon_A - 0,04(1 - \varepsilon_A) \left(\frac{T_A}{450} \right) \right]^{-1} - \left[\left(\frac{D_{A,int}}{D_{A,ext}} \right) \left(\frac{1}{\varepsilon_v} \right) \left(\frac{f}{\varepsilon_v} \right) \right]} \right) \quad (10)$$

Où le facteur f tient compte du coefficient des pertes du au vent, et qui peut être obtenu par l'équation suivante :

$$f = D_{A,int}^{-0,4} (1,61 + 1,3 \varepsilon_A) h_v^{-0,9} \exp[0,00325(T_A - 273)] \quad (11)$$

C_1 est donné par l'expression empirique suivante :

$$C_1 = \frac{1,45 + 0,96(\varepsilon_A - 0,5)^2}{D_{A,int} \left(\frac{1}{D_{A,int}^{0,6} - D_{A,ext}^{0,6}} \right)^{1,25}} \quad (12)$$

Le terme h_v est le coefficient de la convection du vent, et qui peut être obtenu par l'équation suivante (selon McAdams (1954)) [16]:

$$h_v = 5,7 + 3,8V \quad (13)$$

Selon Watmuff et al. (1977), h_v peut être obtenu par l'équation suivante [16]:

$$h_v = 2,8 + 3V \quad (14)$$

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les concentrateurs solaires cylindro-parabolique sont une technologie relativement récente, possédant un important dans les domaines d'exploitations des énergies solaires thermiques. Ils offrent une opportunité aux pays ensoleillés comme l'Algérie pour l'investissement et de construction des centraux solaires.

Nous choisis la ville de Bouzaréah pour mener l'étude sur notre concentrateur. La ville de Bouzaréah se trouve à une altitude de 260 mètres, sa latitude est de 36°47'24" Nord et sa longitude est de 03° 01'04" Est. Le concentrateur est dirigé vers le sud. On a choisi l'eau comme fluide caloporteur avec un débit de 0.015 [kg/s].

L'absorbeur est le siège de la conversion du rayonnement solaire concentré en chaleur sensible à haute température, les figures (6a, 6b, 6c et 6d) traduisent les contours des intensités moyennes des flux thermiques sur la surface de l'absorbeur en fonction du rayonnement solaire direct (DNI).

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'évolution du flux maximal en fonction de l'angle d'incidence des rayons solaires.

On choisit la méthode des différences finies pour la résolution du système d'équations non linéaires des bilans thermique. Un programme de calcul en Matlab a été élaborer après la discréétisation des équations linéaire ce qui nous a permis d'obtenir un ensemble de résultats numériques, à travers laquelle nous serons en mesure de connaître les performances de notre concentrateur.

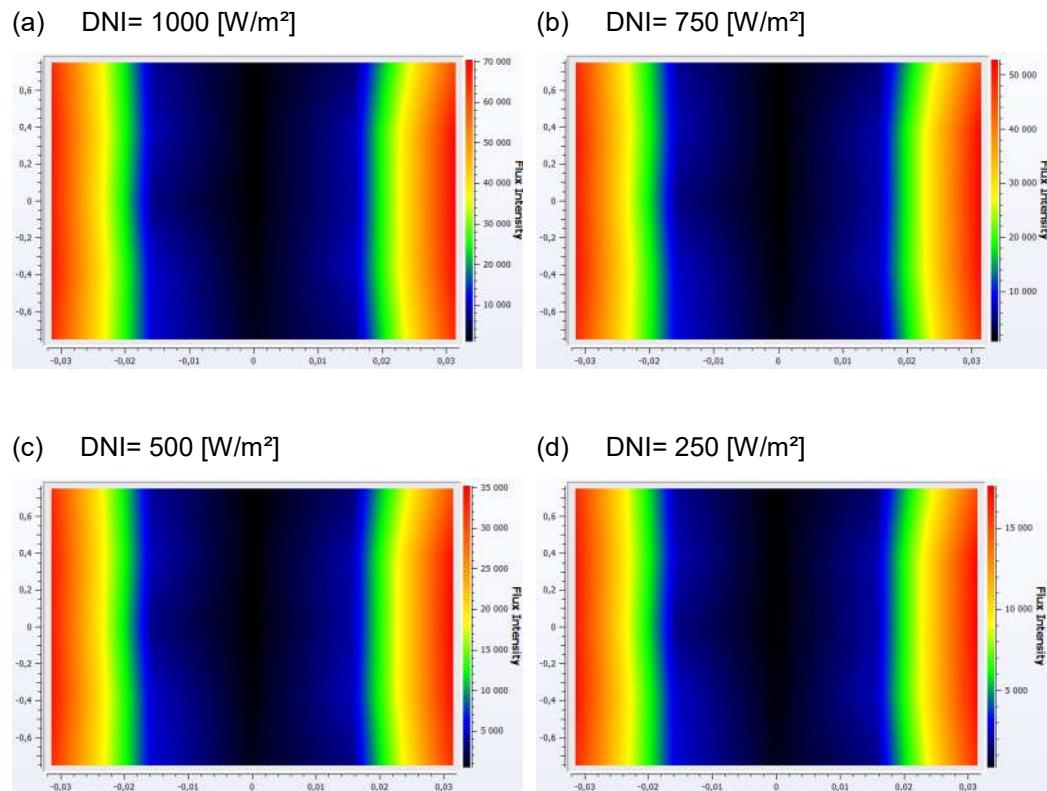
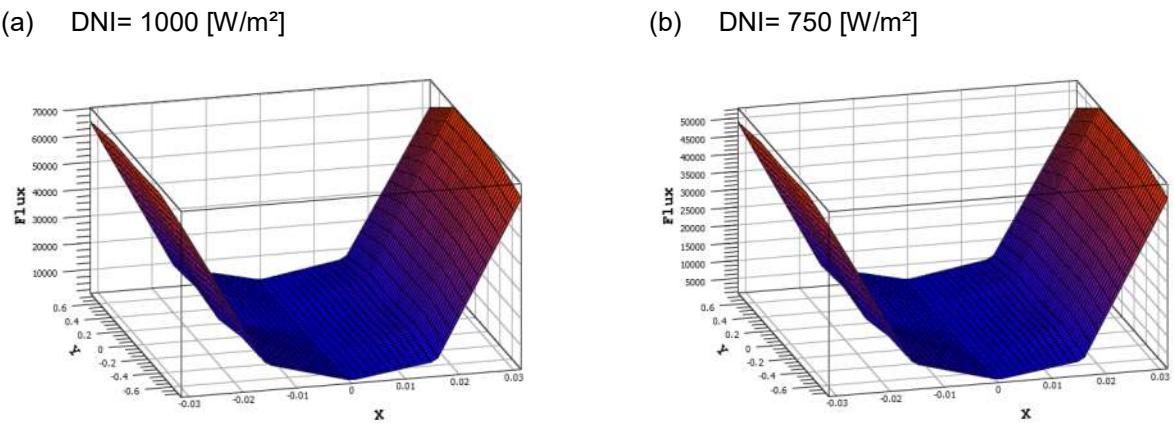
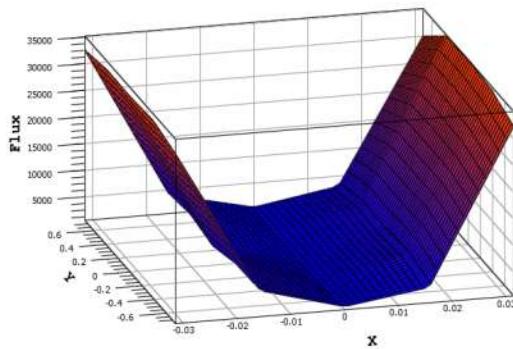


Figure .6. Le contour de l'intensité de flux au niveau de l'absorbeur [w/m²].

Les figures (7a, 7b, 7c et 7d) traduisent les distributions moyennes des flux thermiques. Nous observons bien une bonne répartition de flux thermique au niveau de surface de l'absorbeur. On peut dire que notre concentrateur est éprouvé et présente dans l'ensemble un bon comportement optique. Ainsi, nous pouvons conclure que les distributions moyenne de flux thermique fournies par le logiciel de lancer de rayons sont représentatives des distributions de flux réelles délivrées par le concentrateur cylindro-parabolique.



(c) DNI= 500 [W/m²]



(d) DNI= 250 [W/m²]

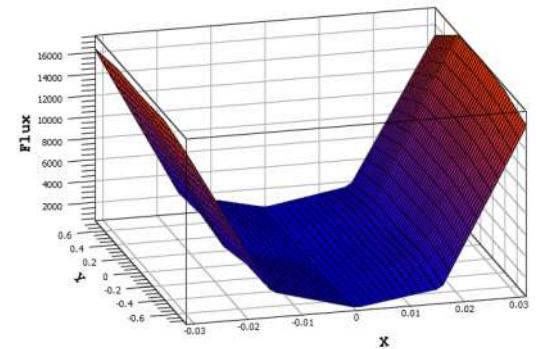


Figure .7. la distribution moyenne du flux thermique au niveau de l'absorbeur.

Le tableau (3) présente les valeurs maximum des rendements optiques et thermiques de concentrateur pour les quatre jours d'étude.

Table.3. Résumé des rendements de collecteur

La date	η_{opt} maximal	temps	η maximal	temps
22/03/2011	0,61851708	12 :00	0,615863121	10 :25
17/06/2011	0,616537285	14.00	0,61292866	07 :25
12/09/2011	0,61942754	11 :25	0,616843	10 :25
03/12/2011	0,61950078	14 :20	0,61809832	10 :00

La figure (8) montre l'évolution des rendements thermique en fonction du temps pour les journées d'études.

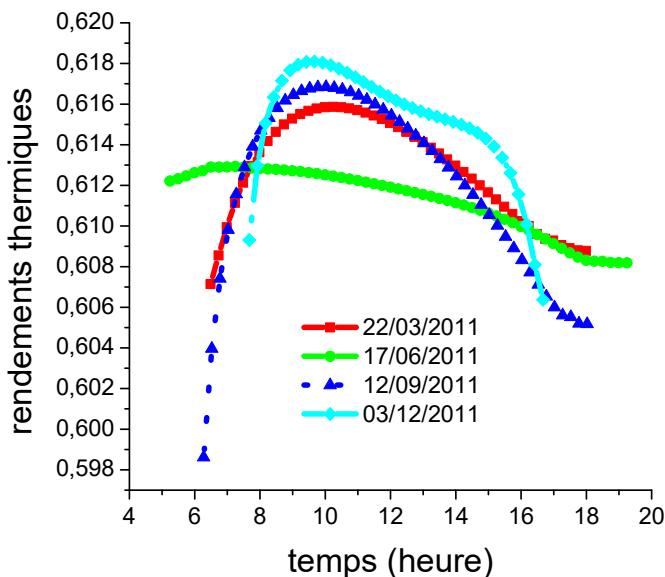


Figure .8. Évolution des rendements thermique de concentrateur cylindro-parabolique.

On remarque que le rendement optique de notre collecteur est supérieur de 61%. Pour le rendement thermique, on observe que le rendement diminue après la valeur maximal, car la température d'entrée de l'eau est presque identique à la température ambiante, ce qui correspond 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 du conduit de l'absorbeur du concentrateur.

Les figures (9, 10 et 11) représentent les variations des températures de l'absorbeur, du fluide à la sortie du tube absorbeur et la température du vitre en respectivement, durant les quatre journées des tests.

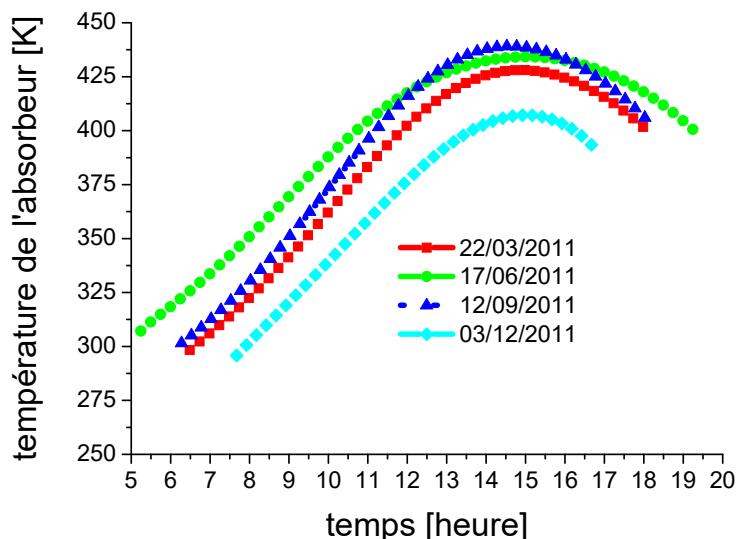


Figure .9. Évolution de la température de l'absorbeur.

On observe que la température la plus élevée est la température de le tube absorbeur ensuite la température de fluide et enfin, la température du vitre, où l'intensité de flux solaire à un grand effet sur les trois températures. La puissance absorbée par le tube absorbeur, une grande partie de celui-ci est transmis au fluide, et la partie restante sera sous la forme de perte thermique vers l'air ambiant.

On remarque que, la température de l'absorbeur (T_A) est proche de (T_F) où avez la valeur maximale le 12 Septembre à 13h30, nous avons enregistré une température de l'absorbeur égal à 439 °C, ceci est un signe d'une bonne isolation thermique, et une faible perte de chaleur entre le tube absorbant et l'air environnant. Nous pouvons dire que le tube absorbeur à une grande capacité à absorber les rayons solaires visibles, et l'importance de la surface sélective est très claire, elle augmente la capacité du tube absorbeur pour absorber le rayonnement solaire, et aussi elle contribue à réduire les pertes perte thermiques vers l'environnement, car il a un faible coefficient d'émissivité et un grand coefficient d'absorption, Ainsi un corps noir idéal a une émissivité de 1 ($\epsilon = 1$) alors que n'importe quel matériau réel à une émissivité inférieure à 1,0 [17]. Les surfaces sélectives profitent des différentes longueurs d'onde du rayonnement solaire incident [18], afin que la sélectivité de la surface se traduise par une absorption maximale dans le spectre solaire et minimale en infrarouge. Donc, le tube absorbeur possède un pouvoir d'absorption élevé pour le rayonnement solaire visible et un pouvoir émissif faible pour le rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde du fait du revêtement

sélectif de l'absorbeur. Ce revêtement est possible de conserver la plus grande partie de l'énergie solaire incidente sur la surface de l'absorbeur et de ne perdre que très peu de chaleur par rayonnement dans la grande longueur d'onde quand la surface absorbante devient chaude.

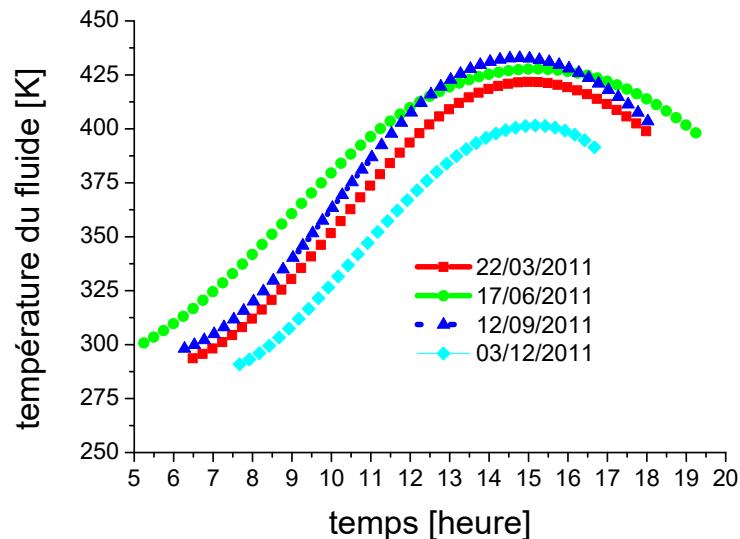


Figure .10. Évolution de la température du fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

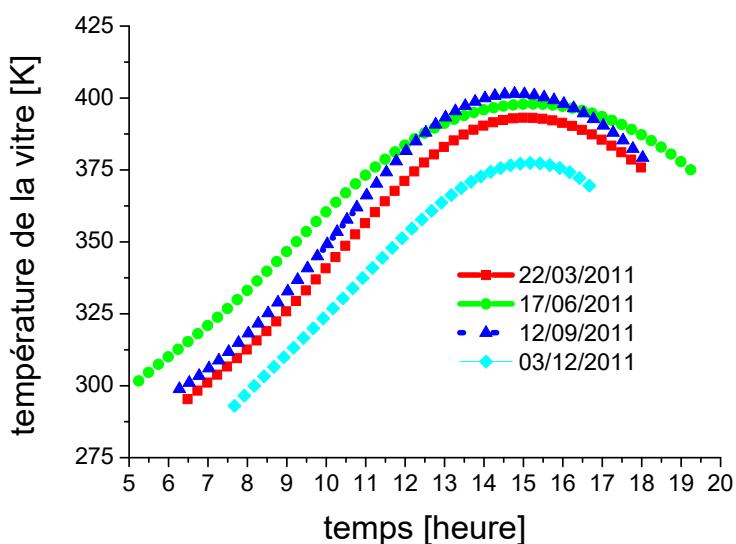


Figure .11. Évolution de la température de fluide caloporteur à la sortie de l'absorbeur.

Pour les quatre jours et pour un débit volumique constant, la température dépend principalement du $q_{\text{absorbée}}(t)$, qui est fonction des paramètres optiques, géométrique du concentrateur et du rayonnement direct reçu par le collecteur. La température du fluide (T_F) est inférieure à (T_A) pour les quatre journées, car la face interne de l'absorbeur absorbe le rayonnement infrarouge, qui subit une augmentation de la température (T_A)

(effet de serre). Par conséquent, la température de la face externe est plus basse et est proche du milieu ambiant soumis principalement à la vitesse du vent, qui crée un phénomène de convection à l'extérieur de l'absorbeur, c'est pour ça les renseignements sur les données météorologiques, notamment la vitesse du vent et la température ambiante sont deux paramètres très importants.

La figure (12) représente l'évolution du coefficient des pertes thermiques en fonction de la différence de température entre le tube absorbeur et l'ambiante ($T_A - T_{\text{amb}}$).

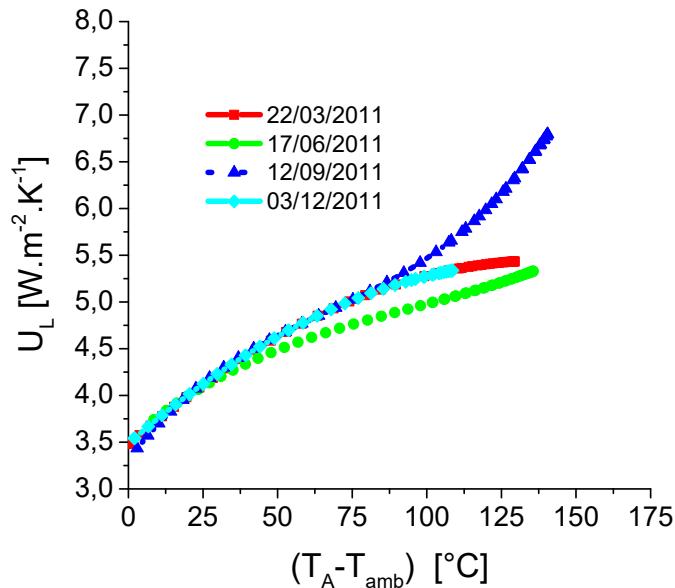


Figure .12. Évolution du coefficient des pertes thermiques.

On remarque que les pertes augmentent avec l'accroissement de la température de l'absorbeur. Pour diminuer les pertes thermiques vers l'extérieur on recouvre le tube absorbeur par une enveloppe en verre spécial appelé plexiglas, et à la même direction pour augmenter l'absorbance des rayonnements solaires on recouvre aussi l'absorbeur par une couche de peinture sélective. Une autre méthode pour diminuer les pertes thermiques par conduction et par convection entre l'absorbeur et l'enveloppe transparente est la création du vide entre ces derniers mais c'est une procédure très délicate, qui nécessite des joints d'étanchéité spécial et des capteurs de pression pour chaque collecteur.

Grâce à ce travail, et à travers notre étude dans wilaya d'El Oued [9], nous pouvons dire que les résultats obtenus sont très encourageants pour exploiter et construire des champs des concentrateurs cylindro-parabolique dans toutes les régions de notre pays (nord, sud, est et ouest).

5. CONCLUSION

Ce travail propose une étude la performance d'un concentrateur cylindro-parabolique. L'eau est utilisée comme fluide caloporteur. Notre concentrateur solaire contient miroir réfléchissant sous la forme d'un demi-cylindre, et un tube absorbant situé le long de la ligne focale. Le tube absorbeur est tube circulaire en cuivre avec une couche sélective convenable pour améliorer la performance énergétique de notre concentrateur, l'absorbeur est entouré par une enveloppe en verre qui permettant le transit du les rayons soleil vers le tube de cuivre naturellement. Notre modèle thermique prend en

compte tous les modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) entre le tube de cuivre, le tube de verre, l'espace annulaire et l'air ambiant. Selon ce modèle, on peut contrôler la température de l'absorbeur, la température de sortie du fluide et la température de la vitre. L'efficacité thermique du concentrateur dépasse 60 %, où la température de fluide calporteur dépasse 401,53 [K] le 03 Décembre (en Hiver). Les résultats obtenus sont très encourageants pour le développement de ce type de concentrateur dans notre pays. L'énergie solaire est une énergie renouvelable, propre, et gratuitement. Ils ont besoin d'exploiter seulement.

Nomenclature

\dot{V}	débit volumique (m^3/s)
γ	le facteur d'interception
A_A	Surface de l'absorbeur (m^2)
A_c	la surface d'ouverture de collecteur (m^2).
C_A	la chaleur spécifique de l'absorbeur ($J/kg\ K$).
C_F	la chaleur spécifique du fluide ($J/kg\ K$).
C_p	capacité thermique ($J/kg\ K$).
$D_{A,ext}$	diamètre externe de l'absorbeur (m).
$D_{A,int}$	diamètre interne de l'absorbeur (m).
$D_{V,ext}$	diamètre externe de la vitre (m).
$D_{V,int}$	diamètre interne de la vitre (l'enveloppe transparente) (m).
h_v	h : Coefficient du transfert par convection du au vent ($W/m^2\cdot K$).
K	le facteur de correction d'angle d'incidence modifié
$q_{absorbée}$	La chaleur absorbée au niveau par le tube absorbeur (W/m^2).
$q_{externe}$	quantité de chaleur perdue vers l'extérieur (convection +conduction) entre la vitre et milieu ambiant (W/m^2).
$q_{interne}$	la chaleur interne (convection +conduction) entre la vitre et milieu ambiant (W/m^2).
q_{utile}	La chaleur échangée par convection entre l'absorbeur et le fluide (W/m^2).
S_e	la surface effective d'un réflecteur du capteur (m^2).
T_A	température de l'absorbeur (K).
T_{amb}	Température d'ambiente (K).
T_F	température du fluide (K).
T_V	température de la vitre (K).
U_L	Coefficient global des pertes thermiques ($W/m^2\cdot K$).
ϵ_A	l'émissivité du tube absorbeur.
ϵ_V	l'émissivité de l'enveloppe transparente en verre.
ρ_A	la densité de l'absorbeur (kg/m^3).
ρ_F	la densité du fluide (kg/m^3).
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2\cdot K^4$).

6. RÉFÉRENCES

- [1] BESSEMOULIN P, OLIVIERI J. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. La Météorologie, 8, septembre 2000, pp. 42-59.
- [2] YAICHE M R, BOUHANIK A. Atlas solaire algérien. Portail des Énergies Renouvelables, Centre de Développement des Énergies Renouvelables, 2002, pp. 16, 28.
- [3] KALOGIROU S A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. (1st ed), Academic Press, 2009, pp. 7- 42.
- [4] RABL A. Active solar collectors and their applications. NewYork Oxford, OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1985, pp. 3- 25.
- [5] GOSWAMI D Y. Energy Conversion: Solar Energy Resources (Chapter 5). Taylor & Francis Group, LLC, 2007, pp. 1- 9.

- [6] SEN Z. Flat Plate Collectors: Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques: Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy. Springer, 2008, pp. 246-249.
- [7] MINISTERE DE L'ENERGIE. Potentiels National des Energies Renouvelables. Site de web : <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?> page=potentiels-national-des-energies-renouvelables, 03/11/2015.
- [8] AL-RUBAIAN, ALI I, AL-FARES, 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
- [9] GHODBANE M, BOUMEDDANE B, LARGOT S, HENIAT N. Simulation Numérique d'un Concentrateur Cylindro-Parabolique en El Oued, Algérie. International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET), 3, 2015, pp. 68-74.
- [10] VAILLANT J R. Utilisation et promesse de l'énergie solaire. 1978.
- [11] JUNCTION K. Kramer Junction (Californie) : La plus grande centrale Solaire Thermique du monde. 2015.
- [12] WENDELIN T, DOBOS A, LEWANDOWSKI A. SolTrace: A Ray-Tracing Code for Complex Solar Optical Systems, Technical Report, October 2013, pp. 1-14.
- [13] GHODBANE M, BOUMEDDANE B, LARGOT S, HENIAT N. Etude optique et thermique d'un concentrateur cylindro-parabolique en site d'Alger, Algérie. Presented at IXth International Congress on Renewable Energy and the Environment, Djerba, Tunisie, 18-20 March 2015.
- [14] BONNET S, ALPHILIPPE M, STOUFFS P. Conversion thermodynamique de l'énergie solaire dans des installations de faible ou de moyenne puissance: Réflexion sur choix du meilleur degré de concentration, Rev. Energ. Ren. : presented at 11 ème journées internationales de thermique, 2003, pp. 73-80
- [15] GOSWAMI D Y, KREITH F, KREIDER J F. Off-Normal Incidence Effects: in Principles of solar engineering, (2nd ed), Taylor & Francis, 1999, pp. 139.
- [16] DUFFIE J A, BECKMAN W A. Solar energy of thermal processes. John Wiley & Sons, (4th ed), 2013.
- [17] WIKIPEDIA. Emissivité. Site de web:
<http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89missivit%C3%A9>, 2014.
- [18] GOUHMAN M K G, MILEVSKAYA N, EYDINOVA F. Surfaces sélectives : propriétés optiques et estimation de l'efficacité énergétique dans l'application aux récepteurs solaires. Phys. Appl, 15, 1980, pp. 393-396.