

## Modélisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique

Nourreddine Nouah<sup>\*</sup>, Nabil Djennaoui et Tinhinane Hassani

Laboratoire de Mécanique Energétique et Systèmes de Conversion  
Département Thermo-Energétique, Faculté de Génie Mécanique & Génie des Procédés  
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene  
B.P. El Alia, Bab Ezzouar, Algiers, Algeria

(reçu le 14 Février 2014 – accepté le 30 Décembre 2014)

**Résumé** - *La plus grande ressource d'énergie techniquement accessible sur la planète est disponible dans les régions désertiques. Nous allons étudier plus particulièrement l'énergie solaire qui permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, cela par la conversion de l'énergie noble (énergie solaire) en énergie thermique par la mise en œuvre des capteurs solaires thermiques. Les centrales thermiques solaires à concentration (appelées aussi Concentrating Solar Power, CSP) sont idéales pour produire de l'électricité de manière sûre. Cette étude vise la modélisation du transfert de chaleur d'un collecteur solaire cylindro-parabolique qui a été comparé avec les résultats obtenus de Nevada. L'objectif du travail consiste à déterminer la variation de la température de sortie du capteur, l'éclairement solaire et la puissance utile en fonction du temps solaire vrai dans une région choisie.*

**Abstract** - *The largest energy resource technically accessible on the planet is available in desert regions. We will study in particular solar energy that recovers heat from solar radiation in a fluid, by converting the noble energy (solar energy) into thermal energy by the implementation of solar thermal collectors. The concentrating solar thermal power plants (also called Concentrating Solar Power, CSP) are ideal for producing electricity safely. This study is the modeling of heat transfer of the solar collector parabolic trough which was compared with the results obtained from Nevada. The objective of the labor is to determine the variation of the outlet temperature of the sensor, the solar light and the useful power in a selected area.*

**Mots clés:** Energie solaire - Concentrateur cylindro-parabolique - Centrale thermique.

### 1. INTRODUCTION

Une importance particulière est en train d'être accordée à la recherche dans le domaine des énergies renouvelables, ceci pour plusieurs causes qui peuvent être principalement résumées, d'une part, en la croissance accrue de la demande mondiale en énergie conventionnelle et ses problèmes d'approvisionnement, et d'autre part, en l'élévation de son coût et la pollution qu'elle provoque. L'eau, le soleil, le vent, les végétaux, les marées, la chaleur de la terre peuvent fournir de l'énergie propre qui favorise un développement durable.

Parmi les sources utilisées pour le remplacement des énergies produites des combustibles fossiles, on retrouve le soleil qui représente la source primaire de production d'énergie, l'énergie produite par le Soleil suite à la réaction de fusions nucléaires est rayonnée et émise dans toutes les directions et reçue par la terre.

Ce flux solaire est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption ou diffusion, suivant les conditions météorologiques et la latitude du lieu. L'énergie solaire, c'est une source d'énergie naturelle, on peut la capter par des méthodes basées

---

<sup>\*</sup> nouah.nourreddine@yahoo.fr

sur des techniques différentes comme exemple, les capteurs plans, les capteurs photovoltaïques et les tours solaires.

Dans ce travail, on a exposé l'étude d'un capteur solaire plan cylindro-parabolique. Dans un premier lieu, on va effectuer l'analyse thermique d'un concentrateur cylindro parabolique.

Cette modélisation permet de prévoir la variation de la température de sortie de fluide caloporteur, de la puissance utile et de l'éclairement solaire en fonction de temps solaire vrai. Pour cela, notre choix est porté sur Oran et Touggourt qui représentent le Nord et le Sud de notre pays et cela pour les journées du 21 Janvier, 21 Mars, 21 Juin et 21 Septembre.

## 2. PRINCIPE DE CAPTATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Le capteur plan est considéré comme un simple absorbeur de rayonnement solaire direct et diffus qui les transforme en chaleur. Le rayonnement solaire est non seulement absorbé par le ciel, mais aussi par tout l'environnement [1]. Un capteur plan est relativement insensible aux conditions du ciel, dont la réalisation ne demande pas une conception compliquée. Cependant, la conception d'un collecteur avec effet de concentration, fait appel à des techniques plus au moins complexes, dont le principe consiste à focaliser le rayonnement incident sur un absorbeur de surface réduite que la surface d'ouverture du collecteur, afin d'augmenter la concentration du rayonnement direct aux niveaux de l'absorbeur.

Les capteurs plans utilisent le rayonnement diffus provenant du ciel et du sol, par contre les concentrateurs n'utilisent que le rayonnement direct. La figure 1 montre le principe de captation par les deux types de conversion thermique de l'énergie solaire.

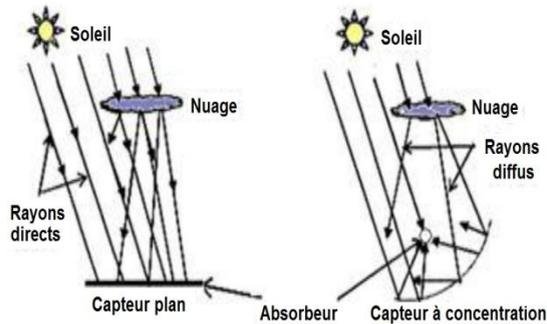


Fig. 1: Principe de captation de l'énergie solaire

Les concentrateurs solaires utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques (CCP) pour concentrer les rayons solaires respectivement dans un foyer ponctuel ou linéaire. Dans le foyer ponctuel ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbeurs) qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée.

Naturellement, ces concentrateurs doivent suivre le mouvement apparent du soleil. Dans un concentrateur cylindro-parabolique, le fluide caloporteur (eau, huile thermique ou gaz) peut être porté à environ 400 °C. On peut obtenir des températures plus élevées jusqu'à 1500 °C pour les concentrateurs ponctuelles.

Ces types de collecteurs solaires sont plus adaptés pour la production de chaleur industrielle et d'électricité. L'utilisation des systèmes à concentration présente des avantages et des inconvénients.

### 3. MODELISATION D'UN CONCENTRATEUR CYLINDRO-PARABOLIQUE

#### 3.1 Calcul de l'éclairement direct

Le rayonnement solaire direct sur un plan récepteur normal à ce rayonnement vaut donc: [2]

$$I_b = G_0 \exp\left(\frac{-T_L}{0.9 + 9.4 \sin(h)}\right) \quad (1)$$

Avec,

L'énergie reçue en fonction du jour de l'année peut être calculée avec la formule suivante

$$G_0 = I_0 e \quad (2)$$

$$\text{Où, } e = \left[1 + 0.03344 \cos\left(360 \times (j - 2.7206) / 365.25\right)\right]$$

$$\text{Donc, } G_0 = 1367 \times \left[1 + 0.03344 \cos\left(360 \times (j - 2.7206) / 365.25\right)\right]$$

Avec,  $j$ , le nombre de jour qui varie de 1 à 365, du premier janvier au 31 décembre, et

$T_L$ , le facteur de trouble de Linke, où  $T_L = 2.4 + 14.6\beta + 0.4(1 + 2\beta) \ln(p_V)$

#### 3.2 Calcul de la puissance utile

Le flux transmis au fluide (puissance gagnée au collecteur) est le suivant: [2]

$$Q_u = Q_{\text{abs}} - Q_p$$

$$Q_u = \eta_{\text{op}} I_b A_a - U_L (T_A - T_{\text{amb}})$$

$$Q_u = F_r \times \left[\eta_{\text{op}} I_b A_a - U_L A_r (T_{\text{fe}} - T_{\text{amb}})\right] \quad (3)$$

$$\text{Où, } C = \frac{(W - D_{A,e})L}{\pi D_{A,e} L} \quad \text{et} \quad A_r = A_a / C$$

$$F_r = \frac{\dot{m} C_p}{A_a U_L} \times \left[1 - e^{\left(\frac{A_a U_L F'}{\dot{m} C_p}\right)}\right] \quad \dots\dots(4)$$

Avec,

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

#### 3.3 Calcul de la température de sortie de fluide caloporteur

Pour calculer la température de sortie, l'équation suivante a été utilisée, [3].

$$T_{\text{fs}} = T_{\text{fe}} + \frac{Q_u}{\dot{m} C_p} \quad (5)$$

On peut calculer la température en tout point  $x$  du tube absorbeur par l'équation: [2]

$$T_{fs}(x) = \left( \frac{C I_b}{U_L} + T_{amb} - T_{fe} \right) \times \left[ 1 - \exp \left( - \frac{F' \pi D_{A,e} U_L x}{\dot{m} C_p} \right) \right] + T_{fe} \quad (6)$$

Le coefficient des pertes thermiques est donné par l'expression suivante:

$$U_L = \left( \frac{1}{C_1 \left[ \frac{T_A - T_{amb}}{1 + f} \right]^{0.25}} + \frac{D_{A,i}}{D_{A,e}} \times \frac{1}{h_v} \right)^{-1} + \left( \frac{\sigma (T_A^2 + T_{amb}^2) (T_A + T_{amb})}{\varepsilon_A - 0.04(1 - \varepsilon_A) \left( \frac{T_A}{450} \right) - \left[ \frac{D_{A,i}}{D_{A,e}} \times \left( \frac{1}{h_v} \right) + f \varepsilon_v \right]} \right) \quad (7)$$

Le facteur  $f$  tient compte des pertes dues au vent, et qui peut être obtenu par l'équation suivante:

$$f = \frac{D_{A,i}}{D_{A,i}^{1.4}} (0.61 + 1.3 \varepsilon_A) h_V^{-0.9} \exp [0.00325 (T_A - 273)] \quad (8)$$

Où,  $C_1$ , est donné par l'expression empirique suivante:

$$C_1 = \frac{1.45 + 0.96(\varepsilon_A - 0.5)^2}{D_{A,i} (1/D_{A,i}^{0.6} + D_{A,e}^{0.6})^{1.25}} \quad (9)$$

Et où,  $h_v$ , est le coefficient par convection du au vent, est donné par:

$$h_v = 4 V_{vent}^{0.58} \times D_{V,e}^{-0.42} \quad (10)$$

#### 4. RESULTATS ET DISCUSSION

La modélisation des capteurs cylindro-paraboliques est effectuée par une procédure de calcul et de programmation.

Pour cela, nous avons élaboré un programme de calcul pour simuler la température de sortie du fluide caloporteur, ainsi que l'éclairement direct et la puissance utile pour un capteur cylindro-parabolique; tout dépend de son emplacement, ainsi que la journée à étudier pour les deux sites algériens.

1. Oran: située au fond d'une baie ouverte au Nord;
2. Touggourt: située dans le Sud, mais il contient les eaux saumâtres.

Les coordonnées des deux sites, les dimensions et les caractéristiques optiques de capteur sont données par les **Tableaux** suivants.

**Tableau 1:** Caractéristiques du concentrateur cylindro-parabolique LS-2

<b>Tube absorbeur</b>	
Emissivité du tube absorbeur	0.01
Emissivité de l'enveloppe transparente en verre	0.89
<b>Paramètres géométriques du capteur</b>	
Longueur et largeur (m)	588 - 5.75
Diamètre intérieur et extérieur du tube absorbeur (m)	0.033 - 0.035
Diamètre intérieur et extérieur du verre	0.057 - 0.060
<b>Paramètres optiques du capteur (miroir)</b>	
Facteur d'interception	0.845
Facteur de réflectance du miroir	0.960
Coefficient de transmission du verre	0.963
Coefficient d'absorption de l'absorbeur	0.960
<b>Débit de fluide caloporteur VP1</b>	
Débit de fluide VP1 (kg/s)	9
<b>Température <math>T_{fe}</math></b>	
Température du fluide VP à l'entrée (K)	400

**Tableau 2:** Données des sites

	<b>Oran</b>	<b>Touggourt</b>
Latitude (°)	35.69111	31.1000
Longitude (°)	-0.64167	6.0667
Vitesse du vent (m/s)	2.5	3.5
Température ambiante (K)	288.15	303.15
Coef. de trouble atmosphérique	0.1	0.05
Journées	21 Janvier	
	21 Mars	
	21 Juin	
	21 Septembre	

Le fluide caloporteur choisi, est le Biphenly-Diphenyl Oxide (Therminol VP-1), pour 293 – 396 °C. Les propriétés thermo-physiques sont données par les corrélations suivantes: [4]

Chaleur spécifique-

$$C_p(T_{fm}) = 1000 \times (1.509 + 0.002496 \times T_{fm} + 0.0000007888 \times T_{fm}^2)$$

Conductivité thermique-

$$K(T_{fm}) = 0.1381 - 0.00008708 \times T_{fm} - 0.0000001729 \times T_{fm}^2$$

Viscosité dynamique-

$$V(T_{fm}) = 0.001 \times (10^{0.8703} \times T_{fm}^{(0.2877 + \log(T_{fm}^{-0.3638}))})$$

Température-  $T_{fm}$ , c'est la température moyenne du fluide VP-1, telle que-

$$T_{fm} = T_{fe} - T_{fs} / 2$$

Les calculs effectués ont permis de tracer les courbes suivantes:

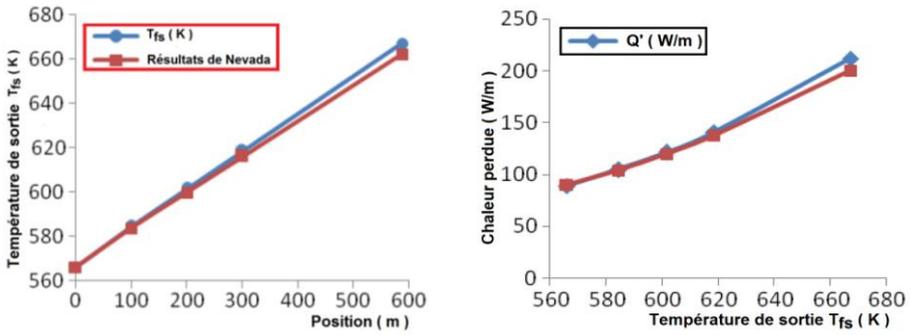


Fig. 2: Comparaison des pertes de chaleur et de la température de sortie de fluide caloporteur avec le modèle de Nevada

D'après la figure 2, on remarque que notre modélisation est presque confondue avec les résultats de Nevada. Donc on peut dire que le programme solaire est valable et que tous les résultats de nos problèmes sont acceptables avec ce programme.

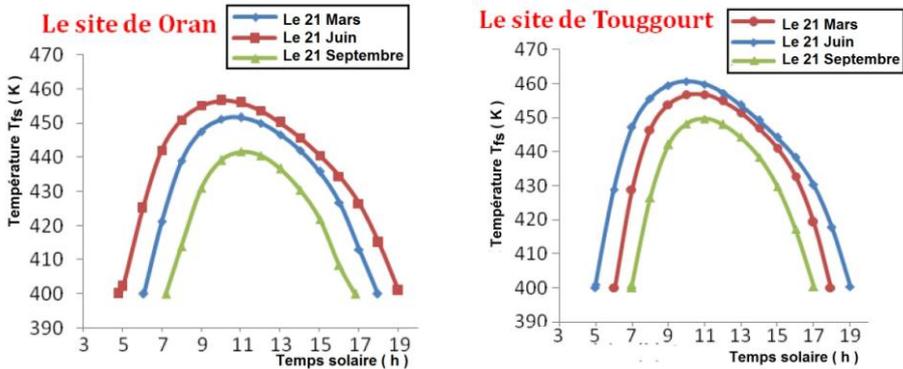


Fig. 3: Evolution de la température de sortie en fonction du temps solaire vrai pour les trois journées type de l'année, Oran et Touggourt

La figure 3 représente l'évolution des températures de sortie en fonction du temps solaire vrai (TSV), et cela pour les deux villes choisies aux journées étudiées. On remarque que les courbes de la température de sortie présentent la même allure pour les deux sites et pour toutes les journées. La seule chose qui varie, ce sont les intervalles de temps où varie cette température. On distingue quatre intervalles comme suit:

**Premier intervalle-** On observe une croissance de la température de sortie ( $T_{fs}$ ) due à l'accroissement considérable de l'éclairement direct ( $I_b$ ), qui se traduit directement par l'augmentation de la puissance utile.

**Second intervalle-** La température de sortie ( $T_{fs}$ ) continue à croître. Mais le taux d'augmentation de l'énergie utile ( $Q_u$ ) diminue à cause de la stabilisation de l'éclairement direct ( $I_b$ ), cela est justifié par l'inertie du tube absorbeur.

**Troisième intervalle-** La puissance utile et la température de sortie diminue avec la diminution de l'éclairement directe ( $I_b$ ).

**Quatrième intervalle-** Un abaissement de la température de sortie ( $T_{fs}$ ) provoqué par une chute de l'énergie utile, due à la décroissance de l'éclairement direct ( $I_b$ ).

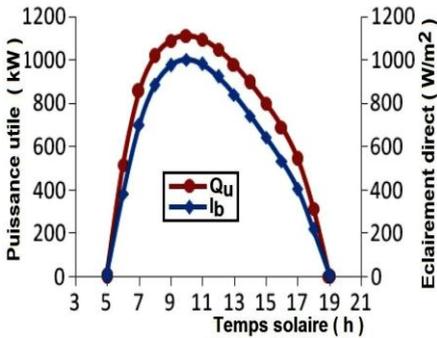


Fig. 4a- Solstice d'été  
21 Juin (Touggourt)

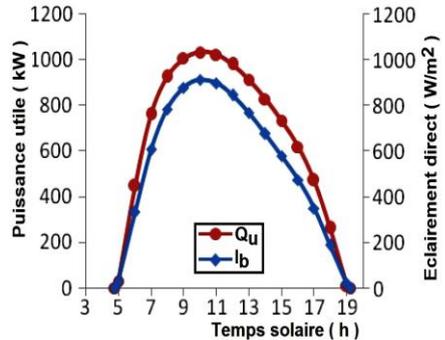


Fig. 4b- Solstice d'été  
21 Juin (Oran)

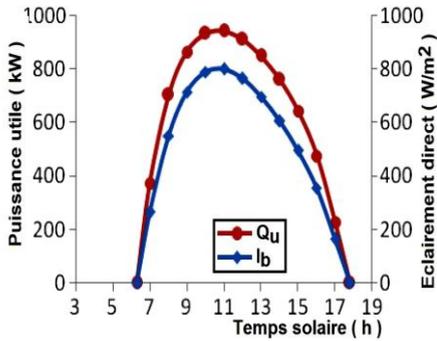


Fig. 4c- Equinoxe de printemps  
21 Mars (Touggourt)

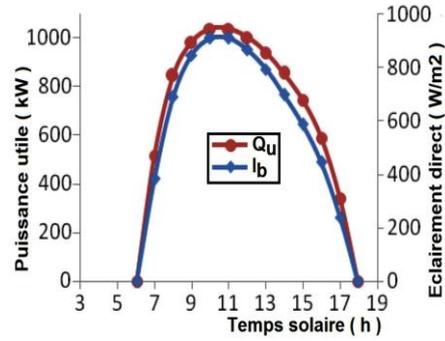


Fig. 4d- Equinoxe de printemps  
21 Mars (Oran)

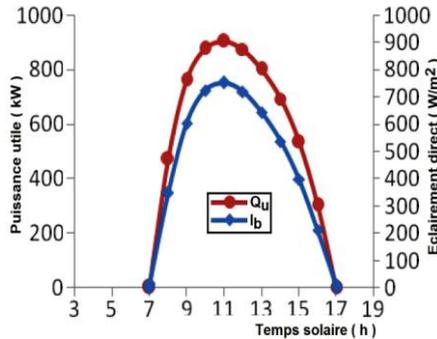


Fig. 4e- Equinoxe d'automne  
21 Mars (Touggourt)

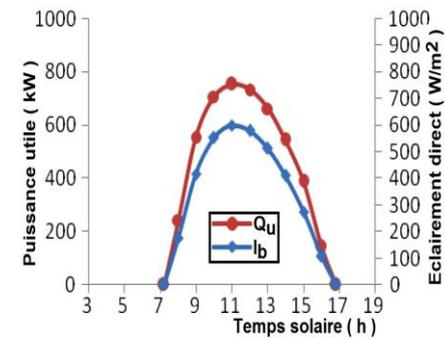


Fig. 4f- Equinoxe d'automne  
21 Mars (Oran)

Fig. 4: Evolution de l'irradiation solaire et de la puissance utile en fonction du temps solaire vrai pour les villes d'Oran et Touggourt, pour les quatre journées types de l'année.

La figure 4 représente la variation de l'éclairement direct ( $I_b$ ) et de la puissance utile ( $Q_u$ ) en fonction du temps solaire vrai (TSV), et cela pour les deux villes choisies

et pour l'ensemble des journées étudiées. On remarque que les courbes de la puissance utile ( $Q_u$ ) et de l'éclairement directe ( $I_b$ ) des deux villes présentent une forme de Gauss, accroissement depuis le lever du soleil en passant par un maximum suivi d'un décroissement jusqu'au coucher.

## NOMENCLATURE

$Q_u$ - Quantité d'énergie transmise au fluide caloporteur (énergie utile)	$T_a$ - Température de l'absorbeur (température du caloporteur)
$Q_{abs}$ - Quantité d'énergie reçue à l'absorbeur	$\eta_{op}$ - Rendement optique du concentrateur
$F_r$ - Facteur de dissipation de la chaleur	$F'$ - Facteur d'efficacité du miroir
$Q_p$ - Quantité d'énergie perdue	$U_L$ - Coefficient des pertes thermiques
$T_{amb}$ - Température ambiante	$C$ - Rapport de concentration
$A_r$ - Section du récepteur	$A_a$ - Section de l'absorbeur
$\dot{m}$ : Débit massique de fluide caloporteur	$T_A$ - Température de l'absorbeur
$W$ - Ouverture ou diamètre de l'ouverture de capteur	$U_L$ : Coefficient global des pertes thermiques, $W/m^2K$
$D_{A,i}$ - Diamètre int. du tube absorbeur	$D_{A,e}$ - Diamètre ext. du tube absorbeur
$e_g$ - Epaisseur de l'enveloppe transparente en verre	$\varepsilon_v$ - Emissivité de l'enveloppe transparente en verre
$h_v$ - Coefficient du transfert par convection du au vent, $W/m^2K$	$K_v$ - Conductivité thermique de l'enveloppe en verre, $W/mK$
$T_v$ : Température de la vitre	

## 5. CONCLUSION

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. L'énergie thermique reçue est collectée et absorbée pour ensuite être utilisée au chauffage du fluide caloporteur à température élevée, qui est pompé dans des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée. L'utilisation thermique de l'énergie solaire a tous les avantages quand l'approvisionnement en énergie classique est entré en crise, mais le prix de revient des éléments de ce capteur est le principal facteur qui limite son application économique. Le champ solaire est une source importante pour les pays désertique, il assure la production de l'électricité et de l'énergie thermique.

L'utilisation des concentrateurs est particulièrement intéressante, puisque ces capteurs qui sont très développés dans ces dernières années, notamment pour la production de la vapeur surchauffée pour alimenter des turbines à vapeur, 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.

Pour assurer un bon fonctionnement de ces concentrateurs il est préférable de travailler à des températures élevées et à faible débit qui est favorable au système de production d'énergie. Car pour des longueurs infinies, le concentrateur peut absorber une grande quantité d'énergie et la température peut atteindre des valeurs très importantes. Dans cette étude, le fluide caloporteur (VP-1) peut atteindre 400 degrés.

**REFERENCES**

- [1] D. Guerraiche, '*Simulation et Prédiction de la Radiation Solaire Directe Absorbée par un Champ de Capteurs Cylindro-Paraboliques*', Mémoire de Magister, Batna, Algérie, 2002.
- [2] M. Collares- Pereira and A. Rabi, '*The Average Distribution of solar Radiation Correlation between Diffuse and Hemispherical and Daily and Hourly Insulation Values*', Solar Energy, Vol. 22, N°2, pp .155 - 164, 1979.
- [3] A. Gama, '*Etude et Réalisation d'un Banc d'Essai Hybride Photovoltaïque Thermodynamique*', Mémoire de Magister, ENP, Mai 2008.
- [4] F. Burkholder and C. Kutscher, '*Heat Loss Testing of Schott's 2008 PTR70 Parabolic Trough Receiver Implemented in Engineering Equation Solver*', National Renewable Energy Laboratory, Technical Report, NREL/TP-550-34169, 2003.