

## Etude de l'influence des paramètres externes et internes sur le capteur hybride photovoltaïque thermique (PVT)

Abdelkrim Khelifa et Khaled Touafek\*

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables  
B.P. 88 Garat Ettaam, Ghardaïa, Algérie

(reçu le 05 Décembre 2011 – accepté le 28 Mars 2012)

**Résumé** - *Durant la conversion photovoltaïque du capteur solaire, une chaleur est générée, ce qui augmentera la température de la cellule photovoltaïque et causera une chute de son rendement. Ce phénomène est dû à la partie du rayonnement solaire non absorbée par les cellules et qui sera à l'origine de son échauffement. Cet échauffement a été considéré comme néfaste pour le rendement des capteurs solaires photovoltaïques, et plusieurs efforts ont été consentis pour évacuer cette chaleur. Il y a eu aussi l'aide d'exploiter ce phénomène par la combinaison des systèmes photovoltaïques avec un système thermique pour former le capteur hybride PVT, qui va générer en même temps de l'électricité et de la chaleur. L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des paramètres externes et internes sur les performances thermique et électrique du capteur hybride photovoltaïque thermique PVT.*

**Abstract** – *During the photovoltaic conversion of solar collector, heat is generated, which will increase the temperature of the photovoltaic cell and cause a drop in performance. This is due to the portion of solar radiation not absorbed by the cells and will be responsible for its heating. This heating was considered detrimental to the performance of photovoltaic solar collectors, and several efforts were made to evacuate the heat. There have also been using to exploit this phenomenon by the combination of photovoltaic systems with a thermal sensor to form the hybrid PVT, which together will generate electricity and heat. The objective of this work is to study the influence of external and internal parameters on the thermal and electrical performance of photovoltaic thermal hybrid collector PVT.*

**Mots clés:** Capteur solaire – Photovoltaïque – Thermique – Hybride - Rendement thermique.

### 1. INTRODUCTION

Un grand développement à petite échelle d'énergies renouvelables, telles que les systèmes solaires thermiques ou photovoltaïques, éoliennes, piles à combustibles a été enregistré ces dernières années. Cela a conduit à une combinaison des systèmes des différentes sources d'énergies. Ces systèmes sont appelés aussi les systèmes hybrides et ils sont utilisés pour satisfaire les besoins énergétiques. Plusieurs instituts et centres de recherches de part le monde ont étudié les capteurs hybrides.

Les capteurs hybrides utilisant de l'air et de l'eau avec absorbeur ont été évalués expérimentalement [1-3], analytiquement [4-6] et économiquement. Des travaux ont été menés pendant trois ans au Massachusetts Institute of Technology. La conclusion la plus importante de ce travail affirmait que la viabilité du capteur hybride PV/T sera

---

\* khaledtouafek@uraer.dz

décidée par la capacité du système à satisfaire les charges thermiques et électriques demandées.

Kern *et al.* 1978 [7], donnent les principaux concepts de ces systèmes par l'usage d'eau ou de l'air comme fluide caloporteur.

Hendrie, 1979 [8], présente un modèle théorique sur les systèmes PV/T qui utilisent des techniques du capteur plan thermique conventionnel.

Bhargava *et al.* 1991 [9] et Prakash, 1994 [10] présentent les résultats de leurs travaux sur l'effet du débit et de canal d'air. Des travaux sur les performances des capteurs hybrides ont l'effet du débit et de canal d'air.

Des travaux sur les performances des capteurs hybrides ont été étudiés par Sopian *et al.*, 1995 et 1996 [11]. Dans les travaux précités, le rendement thermique de ces systèmes PV/T était dans la gamme de 45 % à 65 %. On peut considérer pour les capteurs hybrides, un rendement total de conversion qui est la somme du rendement thermique et du rendement électrique.

Y. Tripanagnostopoulos a appliqué le système basé sur le refroidissement des capteurs photovoltaïques aux capteurs hybrides à concentrateurs [12].

Dans cet article, le capteur solaire hybride photovoltaïque thermique a été étudié en détail, et c'est ce dernier qui transforme à la fois l'énergie solaire en une énergie électrique et en une énergie calorifique. La production de cette énergie dépend de plusieurs paramètres internes et externes: le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température ambiante et la température de fluide caloporteur...

## 2. ELEMENTS DE CONSTRUCTION ET PRINCIPES

Le système étudié se compose de trois éléments essentiels, à savoir, (Fig. 1):

✱ le module photovoltaïque, qui a pour rôle la conversion des rayons solaires en une énergie électrique et se compose de trois couches: la première est une couche de verre, dont la face avant est exposée au rayonnement, la seconde couche qui contient les cellules photovoltaïques et la troisième couche représente la face arrière du module, réalisé en tedlar.

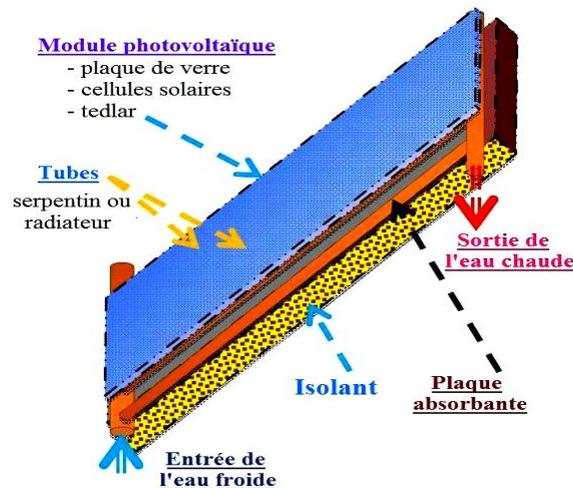


Fig. 1: Modèle d'un capteur hybride PVT

- \* une plaque en acier galvanisé qui a pour rôle d'absorber la chaleur,
- \* une tuyauterie sous forme de radiateur ou de serpentin, soudé à la plaque absorbante garantissant un bon contact thermique entre les deux éléments, et où circule un fluide caloporteur qui a pour rôle d'évacuer la chaleur emmagasinée par la plaque absorbante. Enfin, pour minimiser les pertes calorifiques du système, il faut isoler ses parois par une ou plusieurs couches d'isolation.

### 3. BILAN ENERGETIQUE DU CAPTEUR HYBRIDE PVT

Le capteur étudié est un modèle de 9 nœuds. Les différents nœuds du ce capteur solaire hybride sont indiqués sur la figure suivante:

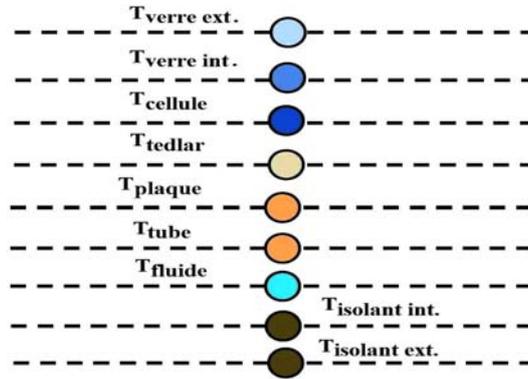


Fig. 2: Coupe du capteur représentant les températures des différents nœuds

L'énergie thermique fournie par le rayonnement solaire est donnée comme suit: [13]

$$Q_{\text{sun}} = A_{\text{verre}} \times G \times \tau_{\text{verre}} \times \alpha_{\text{cel}} \quad (1)$$

$A_{\text{verre}}$  : Surface de la plaque de verre

$\tau_{\text{verre}}$  : Transmittivité du verre

$\alpha_{\text{cellule}}$  : Coefficient d'absorptivité de la cellule solaire

$G$  : Rayonnement directe totale absorbée par la cellule solaire

Puisque le verre est opaque par rapport aux rayonnements émis, la plaque de verre devient donc une surface émettrice, les pertes thermiques par rayonnement sont exprimées comme suit:

$$Q_{\text{rad v-a}} = \sigma \times \varepsilon_v \times A_{\text{verre}} \times (T_{\text{verre}}^4 - T_{\text{ciel}}^4) \quad (2)$$

avec

$$T_{\text{ciel}} = 0.0552 \times (T_a)^{1.5} \quad (3)$$

Nous avons exprimé les pertes thermiques par convection par l'équation de transfert de chaleur entre le verre du capteur hybride et le milieu extérieur comme suit:

$$Q_{\text{conv v-a}} = h_{c-a} \times A_{\text{verre}} \times (T_{\text{verre}} - T_a) \quad (4)$$

avec:

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann ( $\text{W/m}^2\text{K}^4$ )

$T_{\text{ciel}}$  : Température du ciel (K)

$T_{\text{verre}}$  : Température du verre du capteur hybride (K)

$T_a$  : Température ambiante (K)

$h_{c-a}$  : Coefficient de transfert convectif, qui est fonction de la vitesse du vent, exprimé en ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ), il est donné par l'expression suivante [14]:

$$h_{c-a} = 2.8 + 3.0 \times V_{\text{vent}} \quad (5)$$

#### 4. PERFORMANCES THERMIQUES DES CAPTEURS HYBRIDES

Pour le calcul de l'énergie utile fournie par le capteur hybride, on utilise la même équation, que pour le cas d'un capteur thermique plan. Car en fait, une partie seulement du rayonnement solaire absorbé est convertie en énergie électrique, l'énergie utile est donc:

$$Q_{\text{util}} = A_c \times F_R \times [\tau \times \alpha^* \times G - U_{p-a} \times (T_e - T_a)] \quad (6)$$

où  $\alpha^*$ , est le facteur d'absorptivité [13] exprimé par:

$$\alpha^* = \alpha - \eta_{PV}$$

Dans l'équation (6), le gain utile de la chaleur  $Q_{\text{util}}$  est représenté en fonction de la surface de capteur  $A_c$ , du facteur d'extraction de la chaleur  $F_R$ , du rayonnement solaire  $G$ , du coefficient de pertes de chaleur de capteur  $U_{p-a}$ , et de la différence de température entre la température de refroidissement  $T_e$  et la température ambiante  $T_a$ .

Le facteur d'extraction de la chaleur  $F_R$ , représente la proportion du gain réel de l'énergie utile du collecteur au maximum du gain utile possible, si la surface du collecteur entière était à la température d'entrée du fluide, il peut être calculé comme suit:

$$F_R = \frac{\dot{m} \times C_f}{A_c \times U_{p-a}} \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{A_c \times U_{p-a} \times F'}{\dot{m} \times C_f}\right) \right] \quad (7)$$

où

$$F' = \frac{1}{U_{p-a}} \times \frac{1}{\frac{1}{W \times [U_{p-a} \times (D_{\text{ext}} + (W - D_{\text{ext}}) \times F')] + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi \times D_h \times h_{\text{convp-f}}}} \quad (8)$$

avec

$$F = \frac{\tanh\left(\frac{m(W - D_{\text{ext}})}{2}\right)}{\frac{m(W - D_{\text{ext}})}{2}} \quad (9)$$

Cette équation détermine l'efficacité du secteur à ailette entre les tubes adjacents en tenant compte de l'influence du lancement de tube  $W$  et du diamètre extérieur de tube  $D_{ext}$ .

Le coefficient global de pertes de chaleur  $U_{p-a}$  du capteur solaire hybride représente la somme des pertes vers l'avant du capteur  $U_{top}$  et vers l'extérieur du bord  $U_b$ .

Dans cette relation, on a supposé que le coefficient de pertes de chaleur vers l'avant  $U_{top}$ , pourrait être calculé en utilisant l'équation empirique de Klein comme donnée ci-après, [15].

$$U_{top} = \frac{1}{\left\{ \frac{N}{\frac{c}{T_{pm}} \left( \frac{T_{pm} - T_{a-f}}{N-f} \right)^e + h_{conv\ v-a}} \right\} + \frac{\sigma(T_{pm} + T_a) \times (T_{pm}^2 - T_a^2)}{\frac{1}{(\varepsilon_p + 0.00591 \times N \times h_{conv\ v-a})} + \frac{2N + f - 1 + 0.133 \times \varepsilon_p}{\varepsilon_v} - N}} \quad (10)$$

$$c = (520 - 0.000051 \times \beta^2) \quad (11)$$

$$f = (1 + 0.089 \times h_{conv\ v-a} - 0.1166 \times h_{conv\ v-a} \times \varepsilon_p) \times (1 + 0.07866 \times N) \quad (12)$$

$$e = 0.430 \times \left( 1 - \frac{100}{T_{pm}} \right) \quad (13)$$

$N$  est le nombre de couvertures ou de couches de verre;  $\varepsilon_v$ , l'émissivité de la couverture ou de la plaque de verre;  $\varepsilon_p$ , l'émissivité de la plaque absorbante;  $h_{conv\ v-a}$ , le coefficient de transfert thermique par convection dû au vent.

$$U_b = \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} \quad (14)$$

Le rendement, respectivement thermique et électrique, du capteur hybride sont déterminés par les deux expressions suivantes:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{util}}{A_c \times G} \quad (15)$$

$$\eta_{ele} = \frac{Q_{ele}}{A_c \times G} \quad (16)$$

## 5. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Avant d'étudier la distribution des différentes températures dans chaque couche du capteur PV/T, on va étudier l'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du système (PVT).

Les résultats sont présentés sous forme de graphes, en tenant compte de la considération suivante:

Les calculs sont effectués à partir d'un instant initial " $t_0$ " pour chaque composant du capteur, à une température initiale et avec un pas de temps égal à une heure.

Nous avons étudié également l'effet de la distance entre deux tubes successifs et de la vitesse du vent sur les performances du capteur solaire PVT. Nous avons donné plusieurs valeurs à ces deux paramètres.

Les figures suivantes représentent l'évolution des températures pour chaque composant du capteur solaire hybride.

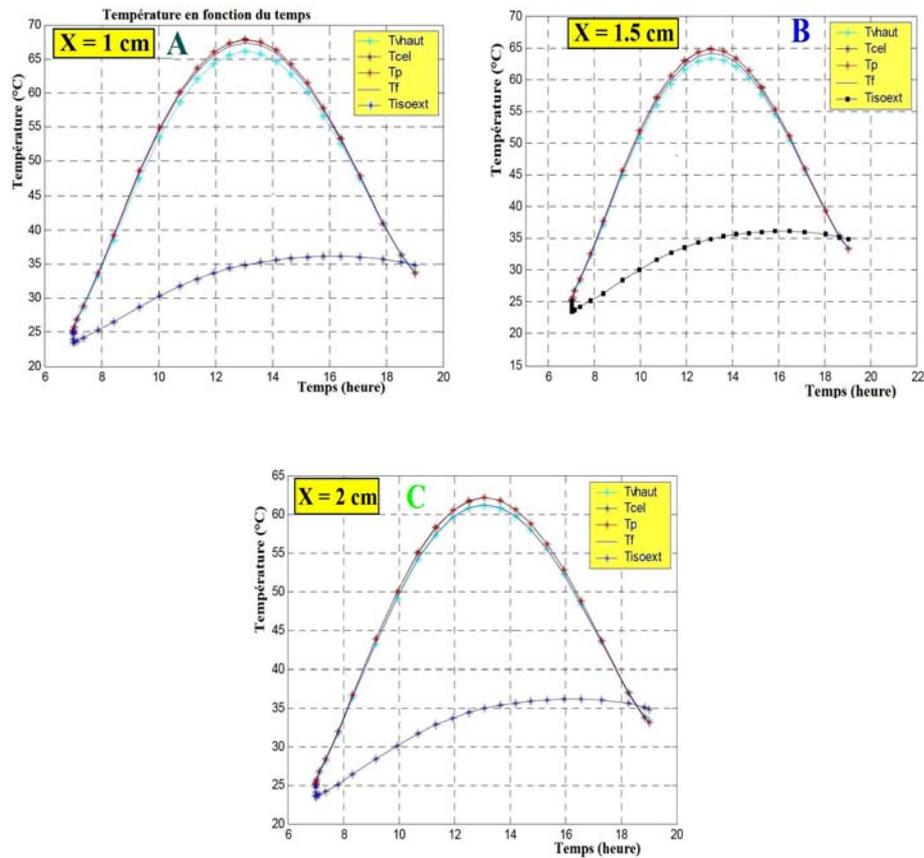


Fig. 3: Variations des températures de chaque couche d'un PVT

**A** pour  $X = 1$  cm, **B** pour  $X = 1.5$  cm, **C** pour  $X = 2$  cm

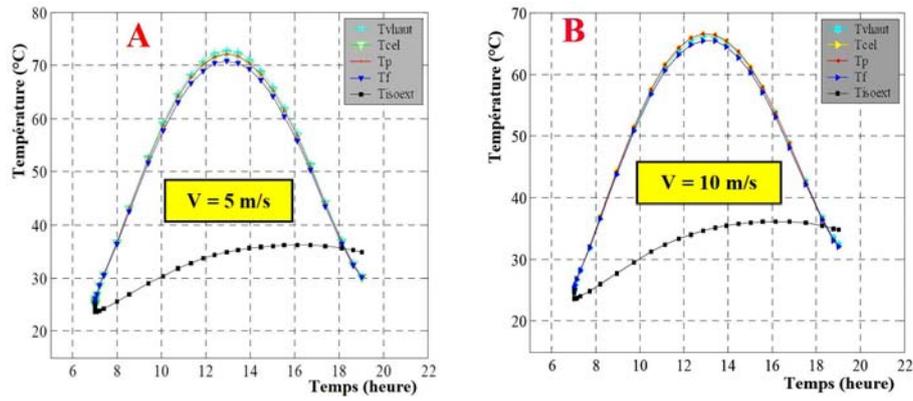


Fig. 4: Influence de la vitesse du vent sur les températures du PVT  
**A** pour  $V_{\text{vent}} = 5 \text{ m/s}$  et **B** pour  $V_{\text{vent}} = 10 \text{ m/s}$

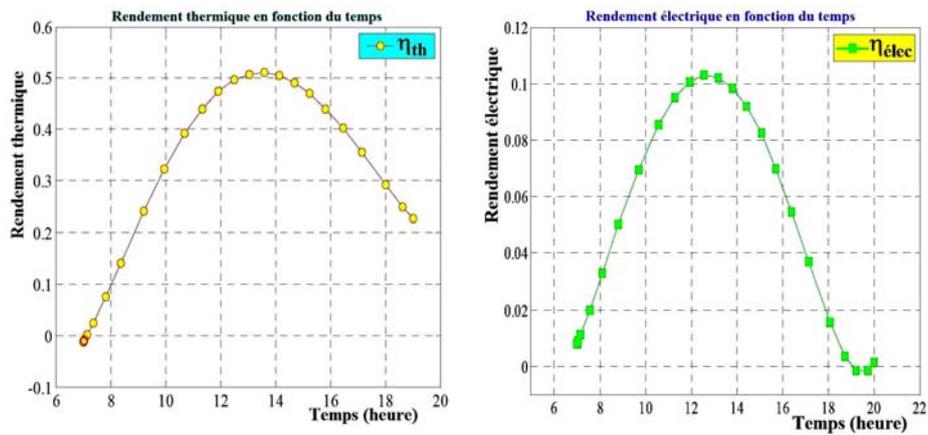


Fig. 5: Variation du rendement, thermique et électrique, du capteur PVT

A partir des figures 3 et 4, on remarque que lorsque l'on augmente les valeurs de  $X$  ou bien de  $V_{\text{vent}}$  légèrement, les valeurs des températures maximums de chaque couche du système sont démunies de 68 °C pour  $X = 1 \text{ cm}$ , de 60 °C pour  $X = 2 \text{ cm}$ , et de 73 °C pour  $V_{\text{vent}} = 5 \text{ m/s}$ , de 68 °C pour  $V_{\text{vent}} = 10 \text{ m/s}$ .

Ces valeurs des température sont liées à la température d'entrée du fluide caloporteur, et aussi avec le coefficient d'échange par convection entre le tube et le fluide d'une part, et d'autre part avec le coefficient d'échange par convection entre la couche du verre et le milieu extérieur  $h_{c-a}$ .

## 6. CONCLUSION

La combinaison d'un capteur thermique et d'un module photovoltaïque dans un seul panneau permet l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire.

Au cours des précédentes années, une grande quantité de travaux de recherches sur les capteurs PVT ont été menés.

Les résultats obtenus dans le travail présenté dans cet article mettent en évidence l'influence des paramètres internes et externes sur la distribution des différentes températures dans chaque couche du capteur PV/T. Il apparaît clairement que le rendement est une fonction proportionnelle de l'irradiation solaire globale qui joue un rôle prépondérant.

En outre, l'augmentation de la distance entre les tuyauteries du fluide caloporteur et de la vitesse du vent favorise l'évacuation de la chaleur de panneau photovoltaïque, ce qui permet d'améliorer leurs performances électrique et thermique.

## NOMENCLATURE

$A_c$ : Surface du capteur PVT, $m^2$	$G$ : Eclairement global, $W/m^2$
$C$ : Chaleur spécifique [ $1/kg.K$ ]	$F$ : Efficacité de l'ailette
$D_{int}$ : Diamètre intérieur du tube, m	$M$ : Masse, kg
$D_{ext}$ : Diamètre extérieur du tube, m	$\dot{m}$ : Débit massique, $kg/s$
$h_{cond}$ : Coefficient d'échange par conduction, $W/m^2K$	$h_{conv}$ : Coefficient d'échange par convection, $W/m^2K$
$F_R$ : Facteur d'extraction de la chaleur du collecteur	$h_{c-a}$ : Coefficient d'échange par convection avec l'ambient, $W/m^2K$
$Q_{th}$ : Puissance thermique, W	$U_{p-a}$ : Coefficient des pertes de chaleur
$W$ : Distance entre deux tubes, m	$\lambda$ : Conductivité thermique, $W/m.K$
$\varepsilon$ : Emissivité	$\rho$ : Masse volumique, $kg/m^3$
$\tau$ : Transmittivité du verre	$\mu$ : Viscosité dynamique de l'eau, $kg/m.s$
$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann	$\alpha_{cel}$ : Coefficient d'absorption de la cellule
$\delta$ : Epaisseur, m	$\eta$ : Rendement, %
$\tau\alpha$ : Transmittivité - absorptivité du rayonnement par le capteur	

## REFERENCES

- [1] R. Tscharnner, H. Curtins, J.P. Häring, R. Schwarz and A.V. Shah, 'Low Temperature Liquid PV/T Collector', Proceedings of the 5<sup>th</sup> E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, CEC, Athen, pp. 560 - 564, October 1983.
- [2] B. Lalovic, T. Pavlovic, Z. Kiss and J. Van Dine, 'The Application of Hybrid a-Si:H PV and Thermal Collectors for Different Usages', Proceedings of the 8<sup>th</sup> E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, (CEC), pp. 280 - 283, 1988.
- [3] S.V. Sudhakar and M. Sharon, 'Fabrication and Performance Evaluation of a Photovoltaic/Thermal Hybrid System', SESI Journal, Vol. 4, N°1, pp. 1 - 7, 1994.

- [4] L.W. Florschuetz, 'Extension of the Hottel-Whillier Model to the Analysis of Combined Photovoltaic/Thermal Flat Plate Collectors', Solar Energy, Vol. 22, N°4, pp. 361 - 366, 1979
- [5] T. Takashima, 'New Proposal for Photovoltaic/Thermal Solar Energy Utilization Method', Solar Energy, Vol. 52, N°3, pp. 241 - 245, 1994.
- [6] T. Bergene and O.M. Lovvik, 'Model Calculations on a Flat-Plate Solar Heat Collector with Integrated Solar Cells', Solar Energy, Vol. 55, N°6, pp. 453 - 462, 1995.
- [7] J.A. Duffie and W.A. Beckman, 'Solar Energy Thermal Process', Wiley-Interscience, New York, 1974.
- [8] ASHRAE Standard 93-86, 'Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors', American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 1986.
- [9] SRCC Document RM-1, 'Methodology for Determining the Thermal Performance Rating for Solar Collectors', Solar Rating and Certification Corporation, Florida, 1994.
- [10] K.G.T Hollands, T.E. Unny, G.D. Raithby and L. Konicek, 'Free Convection Heat Transfer Across Inclined Air Layers', Transactions of ASME, Series C, Journal of Heat Transfer, Vol. 98, pp. 189 - 193, 1976.
- [11] Y. Yiqin, K.G.T. Hollands and A.P. Brunger, 'Measured Top Heat Loss Coefficients for Flat Plate Collectors with Inner Teflon Covers', Proceedings of the Biennial Congress of the International Solar Energy Society, Denver, Colorado, USA, August 19-23, pp. 1200 - 1210, 1991.
- [12] Y. Tripanagnostopoulos, T. Nousia, M. Souliotis and P. Yianoulis, 'Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Systems', Solar Energy, Vol. 72, N°3, pp. 217 - 234, 2002.
- [13] K. Touafek, 'Etude d'un Capteur Solaire Hybride Photovoltaïque Thermique', Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005.
- [14] A. Khelifa, 'Etude Numérique et Modélisation d'un Capteur Solaire Hybride Photovoltaïque Thermique (PVT)', Mémoire de Magister, Université de Batna, 2011.
- [15] J.A. Duffie and W.A. Beckman, 'Solar Engineering of Thermal Processes', New York, Etats-Unis, Wiley-Interscience, 1980.