

## Étude et modélisation thermoélectrique d'un capteur hybride PV/T à air.

Mohamed El Amine SLIMANI<sup>\*1</sup>, Madjid AMIRAT<sup>1</sup>, Sofiane BAHRIA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Département d'Energétique et Mécanique des Fluides, Université des Sciences et de la Technologie Houari BOUMEDIENE « USTHB ». B.P.32 EL-Alia, 16111 – Bab-Ezzouar, ALGER

<sup>2</sup>Division Energie solaire thermique et géothermie, Centre de Développement des Energies renouvelables B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

\* mslimani@usthb.dz

**Résumé** - Dans le présent article, une modélisation énergétique thermoélectrique d'un capteur hybride PV/T basé sur l'utilisation d'un module photovoltaïque du type amorphe QS60DGF a été effectuée. Une étude de l'influence de divers paramètres aérothermiques et physiques sur la performance énergétique du capteur à été menée, notamment l'effet de l'ajout d'une couverture vitrée. Le modèle de simulation numérique développé nous a permis d'approcher aux résultats expérimentaux relevés de la littérature. Les résultats numériques obtenus montrent l'efficacité énergétique de ce type de capteur solaire et son utilité intéressante comme un système énergétique de cogénération. Ces résultats révèlent également l'importance de l'effet de certains paramètres et des conditions de fonctionnement adoptées (température de ciel, température d'entrée de l'air, températures des cellules PV, débit d'air, flux de rayonnement solaire incident) sur les performances des capteurs hybrides.

**Mots clés**— capteur hybride PV/T, modélisation, performance, efficacité.

### Nomenclature

	<i>Symboles grecs</i>	
$C_i$ Chaleur spécifique du composant i ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )		
$C_f$ Facteur de conversion		
$D_H$ Diamètre hydraulique ( $m$ )	$\eta$	Rendement
$e_i$ Epaisseur du composant i ( $m$ )	$\lambda_i$	Conductivité thermique du composant i ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
$h_{c,i}$ Coefficient de transfert de chaleur par conduction entre les deux composants i et j ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	$\tau_i$	Transmittivité du composant i
$h_{r,i}$ Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre les deux éléments i et j ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	$\alpha_i$	Absorptivité du composant i
$h_{v,i}$ Coefficient de transfert de chaleur par convection entre les deux éléments i et j ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	$\rho_i$	Densité du composant i ( $kg.m^{-3}$ )
$G$ Eclairement solaire ( $W.m^{-2}$ )	$\square_i$	Emissivité du composant i
$L$ Longueur du capteur PV/T ( $m$ )	$\beta_{PV}$	Coefficient de température de rendement ( $K^{-1}$ )
$l$ Largeur du capteur PV/T ( $m$ )	$\beta$	Taux de remplissage
$M_i$ Masse du composant i (kg)	<i>Abréviations</i>	
$\dot{m}$ Débit massique ( $kg.s^{-1}$ )	a, amb	Ambiant

$n$	Nombre d'expériences effectuées	c	Cellules solaires
$Nu$	Nombre de Nusselt	éle	électrique
$Q_u$	Puissance électrique produite (W)	f	Fluide caloporteur (air)
$Q_u$	Puissance thermique produite (W)	i	isolant
$R$	Résistance thermique ( $K.m^2.W^{-1}$ )	PV/T	Photovoltaïque/ Thermique
$S$	Surface du capteur hybride ( $m$ )	RMS	Root Mean Square
$T_i$	Température de l'élément i ( $K$ )	s	Sol
$t$	Temps ( $s$ )	t	Tedlar
$U$	Coefficient de perte thermique ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	th	thermique
$V$	Vitesse de l'air ( $m.s^{-1}$ )	v	Plaque protectrice de verre

## 1. Introduction

Un capteur hybride photovoltaïque thermique (PV/T) associe un capteur solaire plan et un module photovoltaïque (cristallin ou amorphe) permettant ainsi, à partir du rayonnement solaire, de produire simultanément de l'électricité et de la chaleur. Il permet de réaliser une véritable cogénération énergétique en permettant d'exploiter l'électricité et la chaleur produites.

Durant le fonctionnement réel des modules photovoltaïques, la caractérisation expérimentale montre que le rendement électrique diminue de façon significative avec la montée en température des cellules photovoltaïques exposées au soleil. La perte d'énergie électrique peut atteindre 15% à 20% si aucun refroidissement du module n'est prévu [01]. La température des cellules photovoltaïques peut être abaissée par extraction de la chaleur à l'aide d'une circulation, naturelle ou forcée, d'un fluide caloporteur. Cela permet d'éviter une chute brutale du rendement électrique du module photovoltaïque tout en assurant une récupération d'une énergie thermique qui peut être exploitée dans une activité réclamant de la chaleur.

La majorité des recherches menées dans ce domaine ont pour objectif d'évaluer les performances thermiques et électriques ou d'analyser l'aspect économique des capteurs hybrides à travers l'estimation du taux de couverture solaire assuré [02].

## 2. Description de dispositif étudié

Le capteur hybride retenu dans cette étude est basé sur l'utilisation d'un module photovoltaïque amorphe de type QS60DGF, le tableau suivant montre les différents paramètres électriques et géométriques de ce capteur hybride :

Quand le rayonnement solaire tombe sur les cellules solaires du module photovoltaïque, une partie de ce rayonnement est convertie en énergie électrique et une autre partie en énergie thermique.

Tableau 1 : Différentes valeurs des paramètres électriques et géométriques du capteur hybride.

	Paramètre	Valeur		Paramètre	Valeur
PV Module type			QS 60DGF		
Courant de court	$I_{cc,ref}$	1.30 A	Puissance maximale	$P_{m,ref}$	60 W
Tension de circuit	$V_{oc,ref}$	77.00 V	Longueur du capteur	$L_m$	1,40 m
Courant au point de puissance maximale	$I_{mp,ref}$	1.00 A	Largeur du capteur	$l_m$	0,794 m
Tension au point de puissance maximale	$V_{mp,ref}$	60.0 V	Largeur de conduite d'air	$l_c$	0,790 m
Rendement électrique	$\eta_{ref}$	6 %	Epaisseur de conduit	$e_{if}$	0,025 m

Le capteur hybride se compose essentiellement d'un module PV amorphe, d'une couverture vitrée, d'une conduite d'air, d'une plaque métallique d'aluminium et d'un isolant thermique :

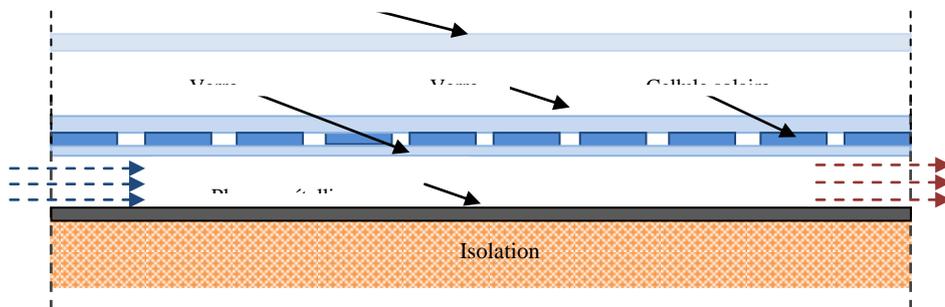


Figure 1. Représentation schématique du capteur hybride modélisé.

### 3. Formulation mathématique

#### 3.1 Bilan énergétique

Pour prédire les températures du système et déterminer ses performances thermiques et électriques, on applique le principe de conservation de l'énergie pour chaque élément constituant le capteur hybride. L'équation traduisant le bilan énergétique s'écrit sous la forme:

$$M_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = \sum_e Q_i - \sum_s Q_i \quad (01)$$

L'application de ce principe nous donne un système de huit équations, ces équations régissent les phénomènes de transfert énergétique dans chaque élément du capteur hybride :

Pour la couverture vitrée

$$M_v \cdot C_v \cdot \frac{dT_{cv}}{dt} = S \cdot \left[ \alpha_v \cdot G + h_{r,cv-ciel} \cdot (T_{ciel} - T_{cv}) + h_{r,cv-v} \cdot (T_{v1} - T_{cv}) \right. \\ \left. + h_{v,cv-a} \cdot (T_a - T_{cv}) - h_{v,v-cf} \cdot (T_{cv} - T_{cf}) \right] \quad (02)$$

La température équivalente du ciel est donnée par la relation de SWINBANK [03] :

$$T_{ciel} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (03)$$

Pour l'air confiné entre la vitre et le module PV

$$M_{cf} \cdot C_{cf} \cdot \frac{dT_{cf}}{dt} = S \cdot [h_{v,cf-cv} \cdot (T_{cv} - T_{cf}) - h_{v,cf-v1} \cdot (T_{cf} - T_{v1})] \quad (04)$$

Pour la plaque supérieure du verre protecteur

$$M_v \cdot C_v \cdot \frac{dT_{v1}}{dt} = S \cdot \left[ \alpha_v^2 \cdot G + h_{r,cv-v1} \cdot (T_{vc} - T_{v1}) + h_{v,v1-cf} \cdot (T_{cf} - T_{v1}) - h_{c,v1-c} \cdot (T_{v1} - T_c) \right] \quad (05)$$

Pour la plaque des cellules photovoltaïques

$$M_c \cdot C_c \cdot \frac{dT_c}{dt} = S \cdot [\tau_v^2 \cdot \alpha_c \cdot G - h_{c,c-v1} \cdot (T_c - T_{v1}) - h_{c,c-t} \cdot (T_c - T_t)] - Q_{u,ele} \quad (06)$$

La puissance électrique utile est liée avec la puissance de radiation solaire par la relation :

$$Q_{u,ele} = \tau_v^2 \cdot \beta \cdot G \cdot S \cdot \eta_{ele} \quad (07)$$

$\beta$  est le taux de remplissage du module PV par les cellules PV

Le rendement électrique est donné par la relation [04] :

$$\eta_{ele} = \eta_{ref} [1 - \beta_{PV} \cdot (T_c - T_{c,ref})] \quad (08)$$

Pour la plaque inférieure du verre protecteur

$$M_v \cdot C_v \cdot \frac{dT_{v2}}{dt} = S \cdot [h_{c,c-v2} \cdot (T_c - T_{v2}) - h_{v,f-v2} \cdot (T_{v2} - T_f) - h_{r,p-v2} \cdot (T_{v2} - T_p)] \quad (09)$$

Pour l'air caloporteur

$$M_f \cdot C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = h_{v,f-v2} \cdot S \cdot (T_{v2} - T_f) - h_{v,f-p} \cdot S \cdot (T_f - T_p) \quad (10)$$

En intégrant cette équation, la distribution de la température le long de la conduite est donnée par.

$$T_f(x) = \left[ \begin{aligned} & \left( T_{f,e} - \frac{(T_{v2} \cdot h_{v,f-v2} + T_p \cdot h_{v,f-p})}{(h_{v,f-v2} + h_{v,f-p})} \right) \cdot e^{-\frac{l \cdot (h_{v,f-v2} + h_{v,f-p})}{\dot{m} \cdot C_p} \cdot x} \\ & + \frac{(T_{v2} \cdot h_{v,f-v2} + T_p \cdot h_{v,f-p})}{(h_{v,f-v2} + h_{v,f-p})} \end{aligned} \right] \quad (11)$$

$T_{f,e}$  La température d'entrée, supposons qu'elle est la même du milieu ambiant.

Pour la plaque métallique

$$M_p \cdot C_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = S \cdot [h_{c,p-i} \cdot (T_i - T_p) - h_{v,f-p} \cdot (T_p - T_f) - h_{r,p-v2} \cdot (T_p - T_{v2})] \quad (12)$$

Pour l'isolant

$$M_i \cdot C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = S \cdot [h_{c,p-i} \cdot (T_p - T_i) - h_{v,i-a} \cdot (T_i - T_a) - h_{r,gr-i} \cdot (T_i - T_s)] \quad (13)$$

La température du sol est donnée par la corrélation suivante [05] :

$$T_s = T_a + 2 \quad (14)$$

Un autre paramètre assez important qui examine l'efficacité totale du capteur hybride est donné comme la somme de l'efficacité thermique ( $\eta_{th}$ ) et l'équivalent de l'efficacité électrique en thermique ( $\eta_{éle,th}$ ) [04, 06, 09, 10]:

$$\eta_T = \eta_{th} + \eta_{éle,th} = \eta_{th} + \frac{\eta_{éle}}{C_f} \quad (15)$$

Où  $C_f$  est le facteur de conversion.

Ces équations représentent le bilan thermique dans la couverture vitrée, l'air stagné dans l'espace de vitrage, le verre de protection face avant, les cellules PV, le verre de protection face arrière, l'air caloporteur, la plaque métallique et l'isolant thermique respectivement.

### 3.2 Coefficients des échanges thermiques

La vitre du capteur hybride PV/T échange l'énergie par rayonnement thermique avec le ciel, selon le coefficient d'échange suivant [05] :

$$h_{r,c-cv} = \sigma \cdot \varepsilon_v \cdot \frac{(T_{cv}^2 - T_{ciel}^2) \cdot (T_{cv}^2 + T_{ciel}^2)}{(T_{cv} - T_{amb})} \quad (16)$$

Et avec la couche supérieure du verre protecteur par la relation:

$$h_{r,cv-v1} = \sigma \cdot \frac{(T_{cv} + T_{v1}) \cdot (T_{cv}^2 + T_{v1}^2)}{2 \cdot \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} \quad (17)$$

L'échange radiatif entre la plaque inférieure du verre et la plaque métallique, le coefficient d'échange est déterminé par la relation suivante [05]:

$$h_{r,v2-p} = \sigma \cdot \frac{(T_{v2} + T_p) \cdot (T_{v2}^2 + T_p^2)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (18)$$

L'échange thermique par conduction s'effectue à travers les constituants adjacents du capteur. Le coefficient d'échange dans ce mode de transfert s'exprime par la relation suivante :

$$h_{c,i} = \frac{\lambda_i}{e_i} \quad (19)$$

Le coefficient de transfert par convection dû au vent est décrit par la relation de HOTTEL et WOERTZ suivante [08] :

$$h_{v,i-a} = 5,67 + 3,86 \cdot V_v \quad (20)$$

Une autre relation est établie par STULTZ et WEN, qui tient compte l'effet de l'inclinaison défini par [07] :

$$h_{v,i-a} = 1,27 \cdot [(T_v - T_a) \cdot \cos \varphi]^{1/3} + 2,658 \cdot V_v \quad (21)$$

Le coefficient d'échange thermique par convection dans la lame du fluide caloporteur est déterminé à l'aide de la relation suivante, donnant le nombre de Nusselt :

$$Nu = \frac{h_{v,f-v2} \cdot D_H}{K_f} \quad (22)$$

## 4. Résultats et discussion

La simulation numérique a été faite en utilisant les données climatiques de la station météorologique du Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzaréah, Alger, pour la journée de 11 juin 2013. Les coordonnées géographiques du lieu sont: latitude 36,8° N, longitude 3,12 E, azimut - 20° et altitude 345 m.

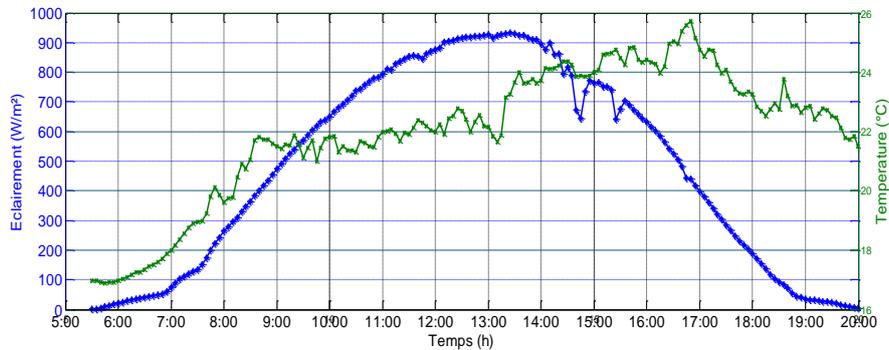


Figure 2. Évolution au cours du temps de l'éclairement solaire pendant la journée d'essai.

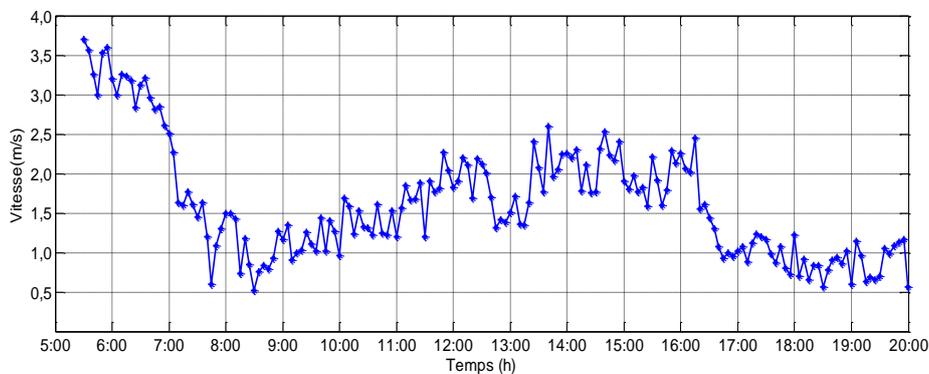


Figure 3. Évolution au cours du temps la vitesse du vent pendant la journée d'essai.

Les données climatiques mesurées comprennent l'éclairement solaire, la température ambiante et la vitesse du vent, notons que la vitesse d'entrée d'air a été prise avec une valeur de 1 m/s.

La figure 4 ci-dessous donne une évolution comparée entre les différentes températures évaluées. Elle montre une conformité et une logique dans la distribution des températures des éléments du capteur hybride. En effet, les températures de cellules et de verre protecteur (face avant et arrière) sont les plus élevées dans le capteur hybride, atteignent une valeur maximale de 70 °C vers midi. Toutes les températures des éléments du capteur étant supérieures à la température de l'ambiance.

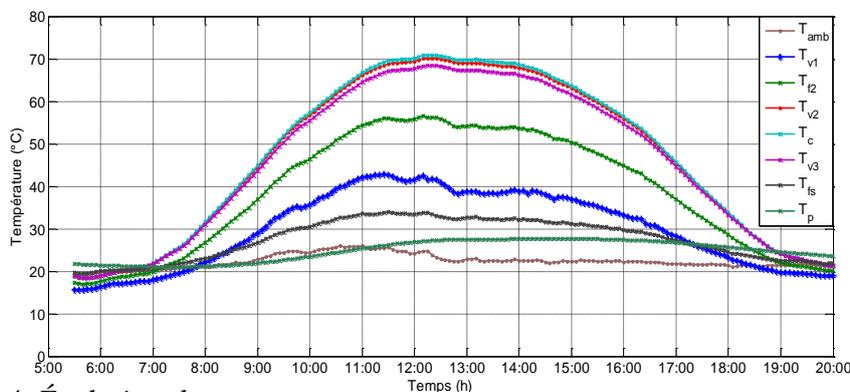


Figure 4. Évolution des températures des composants du capteur hybride au cours du temps.

La figure 5 montre les évolutions de la puissance thermique et électrique du capteur hybride, Ces puissances laissent apparaître une similitude avec l'évolution du rayonnement solaire reçu sur le capteur hybride. Les valeurs maximales équivalentes atteintes 230 W pour la puissance thermique 50 W pour la puissance électrique. Elles sont enregistrées vers 13h.

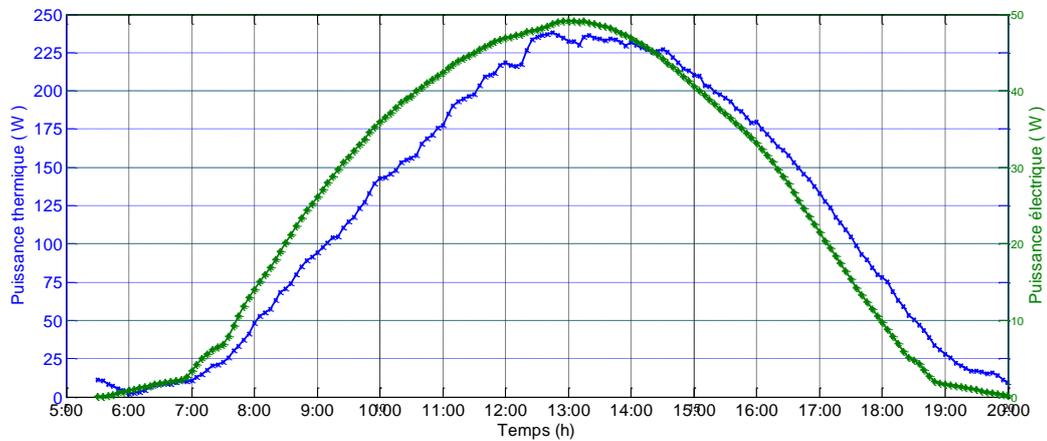


Figure 5. Évolution des puissances électrique et thermique du capteur hybride au cours du temps.

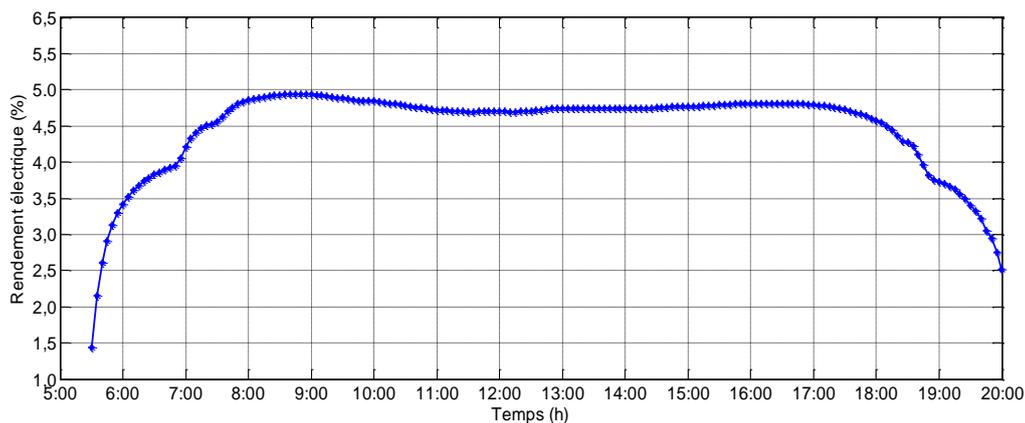


Figure 6. Évolution de rendement électrique du capteur hybride au cours du temps.

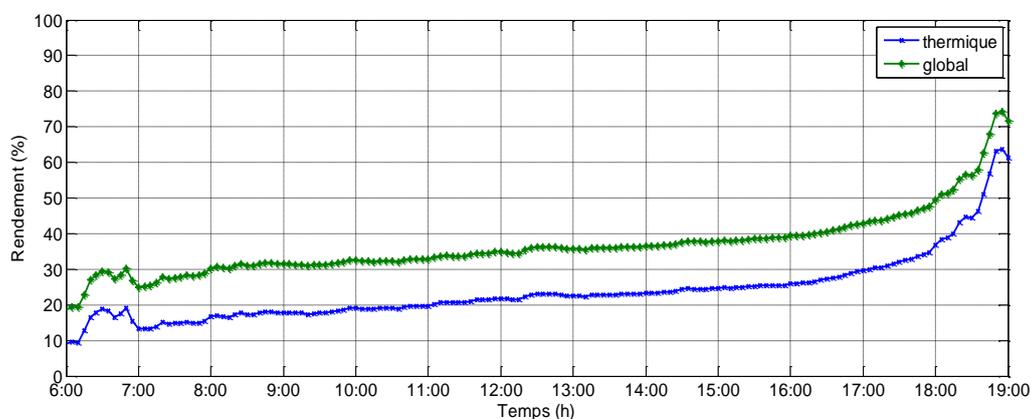


Figure 7. Évolution des rendements thermique et global du capteur hybride au cours du temps.

Les évolutions au cours du temps des rendements électriques et des rendements thermiques calculés montrent que les rendements électriques sont le plus stables entre 4,5 et 5%, le rendement

thermique et rendement global atteignent leur maximum de 64 % et 75% respectivement, ces valeurs sont remarquées vers 19h00.

## 5. Conclusion

Les résultats obtenus après exploitation du modèle réalisé et présentés dans cette étude révèlent également l'importance de l'effet de certains paramètres et des conditions de fonctionnement adoptées (température de ciel, température d'entrée du fluide, températures des cellules PV, débit d'air, flux de rayonnement solaire incident) sur les performances des capteurs hybrides.

Les résultats de simulation montrent que ce type de capteur présente effectivement des caractéristiques intéressantes notamment pour ce qui se rapporte à ses performances globales (thermique et électrique), avec un rendement bien meilleur que celui d'un module photovoltaïque standard, ou que celui d'un capteur solaire à air classique seul. Le rendement thermique global peut aller jusqu'à plus de 70 %, cela montre l'utilité et l'efficacité du capteur hybride comme un système de cogénération.

## Références

- [01] k. touafek, a. malek, m. haddadi, etude expérimentale du capteur hybride photovoltaïque, revue des énergies renouvelables vol. 9 n 3, (2006) 143 – 154.
- [02] ya brigitte assoa, performances de capteurs solaires pv/t hybrides bi-fluides intégrables à l'architecture des bâtiments. etude expérimentale et modélisation adaptée, thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de lyon 2008.
- [03] e. karima amori, m. hussein, taqi al-najjar, analysis of thermal and electrical performance of a hybrid (pv/t) air based solar collector for iraq, applied energy, vol. 98, (2012) pp. 384–395
- [04] a.s. joshi, a. tiwari, g.n. tiwari, i. dincer, b.v. reddy, performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (pv/t) (glass-to-glass) system, vol.48, (2009) pp. 154–64.
- [05] k. touafek, m. haddadi, a. malek, design and modeling of a photovoltaic thermal collector for domestic air heating and electricity production, energy and buildings, vol 59, (2013) pp. 21–28.
- [06] s. sarhaddi, s. farahat, h. ajam, a. behzadmehr, m. mahdavi adeli, an improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (pv/t) air collector, applied energy vol. 87, (2010) pp. 2339–2349
- [07] h. ben cheikh el hocine, simulation numérique de modèle de collecteur hybride pv/t, thèse de doctorat, université de constantine, 2009.
- [08] s. bahria, influence de la pose de chicanes sur le rendement d'un capteur solaire plan à air, thèse de doctorat, usthb, 30 / 2010-m / ph, 2010.
- [09] s. nayak, g.n. tiwari, energy and exergy analysis of photovoltaic/thermal integrated with a solar collector, energy and buildings 40 (11) (2008) 2015–2021.
- [10] b. agrawal, g.n. tiwari, optimizing the energy and exergy of building integrated photovoltaic thermal (bipvt) systems under cold climatic conditions, applied energy 87 (2010) 417–426.