

Etude des performances électriques et thermiques d'un capteur hybride PVT

Hanane Ben Cheikh El Hocine* and Mimia Marir-Benabbas

Laboratoire de Modélisation de Dispositifs à Energies Renouvelables et Nanométriques
Département d'Electronique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université Mentouri, Constantine, Algérie

(reçu le 7 Septembre 2012 – accepté le 25 Juin 2013)

Résumé – La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. Le capteur hybride photovoltaïque/thermique (PV/T) convertit l'énergie solaire en chaleur et en électricité. Nous présenterons dans cet article, une étude des performances électriques et thermiques d'un capteur hybride à travers l'élaboration d'un bilan thermique qui fait intervenir les échanges thermiques entre les différents composants du capteur hybride. Les résultats obtenus permettent de penser que ce type de collecteur constitue une bonne alternative aux modules photovoltaïques et aux capteurs thermiques classiques séparément installés.

Abstract – The combination of renewable energy sources to optimize the maximum power generation systems, both from technical and economic point of view. The hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector converts solar energy into heat and electricity. We present in this article, a study of the electrical and thermal performance of a hybrid collector through the development of a heat balance that involves heat exchange between the different components of hybrid collector. The results suggest that this type of collector is a good alternative to photovoltaic modules and thermal collectors installed separately.

Mots clés: Capteur solaire – Photovoltaïque – Thermique – hybride – Rendement électrique – Rendement thermique.

1. INTRODUCTION

Un module photovoltaïque (PV) classique de technologie silicium cristallin convertit entre 12 et 18 % de l'énergie solaire incidente. Pour arriver à ce résultat, un module PV absorbe en réalité entre 80 et 90% du rayonnement incident, dont la majeure partie est dissipée sous forme de chaleur, augmentant ainsi la température interne du module. Cette augmentation de la température réduit sensiblement les performances électriques du module.

Partant du constat que le rendement du panneau photovoltaïque décroît avec l'augmentation de la température, et que la fonction d'un capteur solaire est de transférer la chaleur captée par sa surface à un fluide caloporteur, l'idée est née d'associer ces deux technologies et d'en faire un prototype hybride nommé PV/T, qui permet à la fois de convertir l'énergie solaire captée en électricité mais aussi de valoriser l'autre part, habituellement perdue, en chaleur.

La recherche sur les capteurs solaires a débuté dans les années 70 et a été intensifiée dans les années 80. 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

* hanene_012009@hotmail.fr

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 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.

En 2005, Zondag [12] propose un état de l'art sur les capteurs solaires hybrides PV/T, en se basant sur le rapport du projet européen PV-catapult [13]. Parmi les premières études recensées par Zondag [12], certaines mettent l'accent sur les méthodes de modélisation.

En 2007, Tripanagnostopoulos [14] a fait l'étude de capteurs solaires hybride PVT dont le fluide caloporteur est soit de l'air, soit de l'eau, et pouvant être intégrés au bâti. L'objectif de ces travaux était de réduire la température de fonctionnement des modules PV, d'accroître la production d'air préchauffé et de réduire les pertes thermiques à travers l'isolant en sous face du composant.

Un modèle mathématique de capteur thermique PV/T d'air à double passage avec des ailettes est proposé par Ebrahim *et al.*, (2009) [15]. Chow *et al.*, (2007) [16] présentent la modélisation et une étude comparative des performances d'un capteur solaire PV/T à eau. Kribus *et al.*, (2006), ont discuté la conception d'un système PV/T en utilisant un concentrateur parabolique de petite taille, leur conception de système pouvait fournir le chauffage à très haute température. [16] Un nouveau type de collecteur PV/T est décrit par [17, 18].

L'étude expérimentale de ce nouveau collecteur a constitué une nouvelle approche technique qui a permis de maximiser la conversion totale avec un coût réduit comparé aux deux collecteurs séparément installés. Dans cet article, le concept de capteur hybride Photovoltaïque / Thermique est présenté. L'objectif de ce travail est d'étudier les performances électriques et thermiques d'un capteur hybride PV/T à eau.

2. CONCEPT DE CAPTEUR HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE / THERMIQUE

Le concept de capteur hybride photovoltaïque / thermique consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Il est caractérisé par une combinaison sandwich séparant air et eau. Le fluide caloporteur est canalisé, ce qui permet une circulation forcée. La face inférieure est isolée et ne comporte pas d'absorbeur. La figure 1 présente une description d'un capteur PV/T utilisant l'eau comme fluide caloporteur.

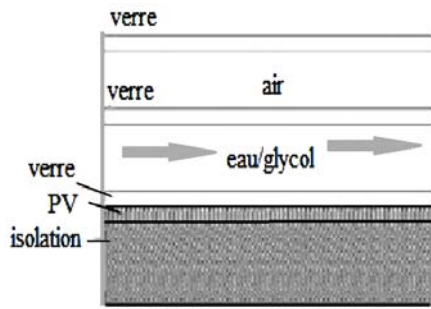


Fig. 1: Schéma descriptif prototype hybride PV/T à eau

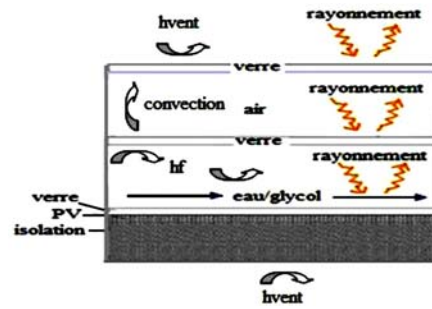


Fig. 2: Schématisation des transferts thermiques dans le PV/T

Schématisation des transferts thermiques

Les échanges thermiques entre les différentes couches du capteur au sein du prototype peuvent être présentés par la figure 2.

3. MODELISATION DU SYSTEME PV/T

L'analogie électrique traditionnelle permet une grande simplification des problèmes de thermique. C'est la méthode nodale qui permet une modélisation par analogie électrique des systèmes.

3.1 Schéma par analogie électrique du PV/T

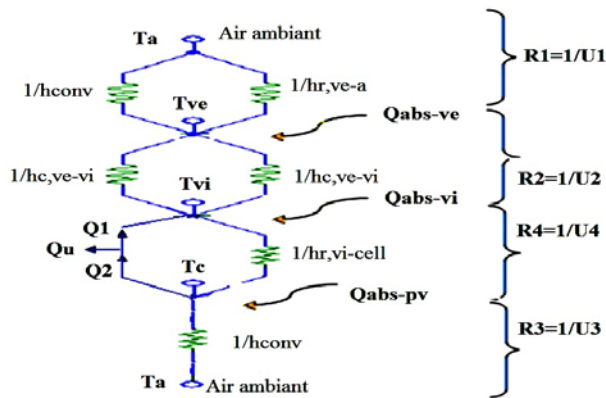


Fig. 3: Schéma électrique équivalent des Transferts thermiques du capteur hybride PV/T

3.2 Equations caractérisant le transfert de chaleur

Le PV/T est un système complexe qui fait intervenir un couplage de transfert thermique entre les différents éléments qui le constituent.

Les équations de bilan font apparaître des paramètres qui décrivent la géométrie du système, la nature de l'écoulement de l'eau et de l'air ambiant, les pertes par convection et par rayonnement. La précision du modèle dépend fortement de ces paramètres.

3.3 Bilans thermiques des différents constituants

Couverture en verre externe-air ambiant

$Q_{r,ve-a}$: Flux échangé par rayonnement entre la couverture et le milieu extérieur, avec,

$$Q_{r,ve-a} = \varepsilon_v \times \sigma \times (T_{ve}^4 - T_{ciel}^4) = h_{r,ve-a} \times (T_{ve} - T_{ciel}) \quad (1)$$

$$h_{r,ve-a} = \varepsilon_v \times \sigma \times (T_{ve}^2 + T_{ciel}^2) \times (T_{ve} + T_{ciel}) \quad (2)$$

$Q_{c,ve-a}$: Flux échangé par convection entre la couverture et l'air extérieur, qui dépend principalement de la vitesse du vent et peut se calculer par [21],

$$Q_{c,ve-a} = h_{conv} \times (T_{ve} - T_a) \quad (3)$$

$$h_{conv} = h_{vent} = 5.7 + 3.8 V_v \quad (4)$$

Le flux solaire absorbé par la couverture transparente

$$Q_{s,ve} = \alpha_v \times G \quad (5)$$

Couverture en verre externe-vitre interne

Q_{s-vi} : Flux solaire absorbé par la vitre intérieure

$$Q_{s-vi} = \alpha_v \times \tau_v \times G \quad (6)$$

$Q_{r,ve-vi}$: Flux échangé par rayonnement entre la couverture en verre extérieure et la vitre intérieure; il peut être calculé en considérant la couverture en verre extérieur et la vitre intérieure comme deux surfaces parallèles infinies.

$$Q_{r,ve-vi} = \frac{\sigma \times (T_{ve}^4 - T_{vi}^4)}{\left(\frac{2}{\varepsilon_v} - 1 \right)} = h_{r,ve-vi} \times (T_{ve} - T_{vi}) \quad (7)$$

avec,

$$h_{r,ve-vi} = \frac{\sigma \times (T_{ve}^2 + T_{vi}^2) \times (T_{ve} + T_{vi})}{\left(\frac{2}{\varepsilon_v} - 1 \right)} \quad (8)$$

$Q_{c,ve-vi}$: Flux échangé par convection-conduction entre la couverture en verre extérieur et la vitre intérieure.

$$Q_{c,ve-vi} = h_{c,ve-vi} \times (T_{ve} - T_{vi}) \quad (9)$$

où, $h_{c,ve-vi}$ est le coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces parallèles délimitant un espace clos contenant de l'air, calculable par la corrélation suivante [18]:

$$h_{c,ve-vi} = \frac{Nu \times \lambda_{air}}{W_{ve-vi}} \quad (10)$$

Le nombre de Nusselt, Nu , pouvant se calculé par le biais de corrélations caractérisant un écoulement entre plaques planes définissant un volume fermé [18].

$$Gr < 1700 + 47.8 \phi \quad Nu = 1.013 \quad (11)$$

$$Gr > 80000 \quad Nu = 2.5 + 0.0133 \times (90 - \phi) \quad (12)$$

$$\text{Autrement} \quad Nu = \left[0.06 + 3 \times 10^{-4} \times (90 - \phi) \right] \times Gr^{0.33} \quad (13)$$

Gr , est le nombre de Grashof

$$Gr = \frac{g \times \beta \times \Delta T \times b^3}{\nu^2} \quad (14)$$

β , est le coefficient de dilatation, pour de l'air $\beta \approx T^{-1}$; b , largeur entre les deux plans (canal d'air: w_{air}); ΔT l'écart de température entre les deux plans.

Vitre interne – cellule photovoltaïque

L'énergie totale absorbée par le module photovoltaïque

$$E_c = \tau_v \times \alpha_c \times G \quad (15)$$

L'énergie électrique produite par le module photovoltaïque

$$E_{ce} = \eta_e \times \tau_{pv} G \quad (16)$$

$Q_{r,vi-cellule}$: Flux échangé par rayonnement entre la vitre intérieure et le module photovoltaïque. L'énergie électrique produite par le module photovoltaïque:

$$Q_{r,vi-cellule} = \frac{\sigma \times (T_{vi}^4 - T_{cell}^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{1}{\epsilon_{cell}} - 1 \right)} = h_{r,vi-cellule} \times (T_{vi} - T_{cell}) \quad (17)$$

où,

$$Q_{r,vi-cellule} = \frac{\sigma \times (T_{vi}^2 + T_{cell}^2) \times (T_{vi} - T_{cell})}{\left(\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{1}{\epsilon_{cell}} - 1 \right)} \quad (18)$$

Entre le verre / panneau PV et l'eau glycolée [17], le coefficient d'échange par convection h_f est calculé selon le régime d'écoulement et le nombre de Nusselt, on a choisi, $Nu_2 = 5.385$ [20].

Q_1 : Flux de chaleur cédé par convection au débit d'eau par la vitre intérieure.

Q_2 : Flux de chaleur cédé par convection au débit d'eau par le module photovoltaïque.

Calculons le flux de chaleur convectif Q_1 échangé entre la vitre intérieure à T_{vi} et le débit d'eau à T d'une part et le flux Q_2 échangé entre le module PV à T_{cell} et le

débit d'eau d'autre part. La somme de ces deux flux donne la quantité d'énergie utile récupérée par le fluide.

Les pertes thermiques du fond du capteur vers le bas s'écrivent:

$$Q_b = \frac{(T_b - T_a)}{\frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (19)$$

L'ensemble des équations constituant le bilan de puissance [21], compte tenu du schéma de la figure 3, est présenté de la manière suivante:

$$(\tau_v \alpha_c - \tau_{pv} \eta_{el}) \times G = U_3(T_{cell} - T_{vi}) + Q_2 + U_3(T_{cell} - T_a) \quad (20)$$

$$Q_u + Q_1 = Q_2 + (\tau \alpha)_{eau} \times G \quad (21)$$

$$Q_{s-vi} = U_2(T_{vi} - T_{ve}) + U_3(T_{vi} - T_{cell}) - Q_1 \quad (22)$$

$$Q_{s-ve} = U_2(T_{ve} - T_{vi}) + U_1(T_{ve} - T_a) \quad (23)$$

La résolution de ce système de 4 équations et 4 inconnues: T_{ve} , T_{vi} , T_{fs} et T_{cell} permet de caractériser en puissance le prototype. La résolution numérique sous Matlab de ce système d'équation est envisagée.

4. ETUDE DES PERFORMANCES ELECTRIQUES ET THERMIQUES

Dépendant de la température du panneau, le rendement électrique η_e diminue lorsque cette température devient supérieure à une température de référence T_{ref} [22].

$$\eta_e = \eta_0 [1 - \beta(T_{pv} - T_{ref})] \quad (24)$$

η_0 est le rendement nominal sous conditions standards [23],

$$\eta_0 = \frac{P_{max}}{A \times G} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{A \times G} \quad (25)$$

V_{max} et I_{max} sont respectivement la tension et le courant maximum du module photovoltaïque. Le rendement électrique est lié au rendement des cellules η_{cell} par la surface des cellules sur la surface totale (connu par le facteur de remplissage):

$$\eta_e = \frac{A_{cell} \times \eta_{cell}}{A} = \beta \times \eta_{cell} \quad (26)$$

La puissance utile récupérée par l'eau est:

$$Q_u = \dot{m} \times C_p (T_{fs} - T_{fe}) \quad (27)$$

Dépendant du débit d'eau et de la chaleur massique, des températures d'entrée et de sortie de l'échangeur, respectivement T_{fs} et T_{fe} , le rendement thermique est exprimé fonction de la surface totale recevant le rayonnement S et la surface du collecteur A_c [24].

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A_c \int S \times dt} = \frac{\dot{m} \times C_p \times \int (T_{fs} - T_{fe}) \times dt}{A_c \int S \times dt} \quad (28)$$

Tableau 1: Valeurs utilisées dans la simulation

Paramètres du collecteur PV / T à eau	Valeur
Largeur du capteur, b	0.45 m
Longueur du capteur, L	1.2 m
Débit d'eau, $\dot{u}$	76 m ³ /h
Angle du collecteur, ϕ	36 °
Epaisseur du canal d'air, w_{air}	0.01 m
Epaisseur du canal d'eau, w_{eau}	0.01 m
Vitesse du vent, V_v	1 m/s
Coefficient de transmission/absorption à eau, $\tau \alpha_{\text{eau}}$	0.16
Emissivité du verre, ε_v	0.88
Epaisseur du verre, e_v	0.003 m
Conductivité thermique du verre, λ_v	1 W/mK
Coefficient d'absorption, α_v	0.066
Transmission du verre, τ_v	0.95
Epaisseur du silicium, e_{si}	0.0003 m
Conductivité thermique du silicium, λ_{si}	0.036 W/mK
Coefficient de transmission de PV, τ_{pv}	0.87
Emissivité de la cellule PV, $\varepsilon_{\text{cell}}$	0.95
Coefficient d'absorption des cellules, α_{cell}	0.85
Epaisseur de l'isolant, e_i	0.05 m
Coefficient de remplissage des cellules, β_{cell}	0.83
Coefficient thermique de l'isolant, λ_i	0.035 W/mK
Coefficient de température des cellules, β	0.0045 °C ⁻¹

5. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

La résolution du système d'équations régissant les transferts thermiques au sein du prototype permet d'estimer les performances thermiques et électriques du prototype.

Les résultats typiques de programme de simulation sous les conditions suivantes: $T_{\text{fin}} = T_{\text{amb}} = 298 \text{ K}$, $V = 1 \text{ m/s}$ et $G = 1000 \text{ W/m}^2$.

La figure 4 montre l'influence de rayonnement G sur les différentes températures du capteur hybride.

La valeur de rayonnement varie de 200 W/m^2 à 1000 W/m^2 , la figure 5 montre l'influence de la température ambiante sur les différentes températures du capteur hybride pour un ensoleillement égale à 1000 W/m^2 , en maintenant les autres valeurs constantes, la vitesse du vent est maintenue à 1 m/s .

Ces courbes montrent une évolution linéaire des températures en fonction de l'éclairement et de la température ambiante.

Tableau 2: Les résultats typiques de programme de simulation

Paramètres du collecteur hybride PV / T à eau	Valeur
Rendement thermique, η_{th}	60.38 %
Rendement électrique, η_{el}	11.61 %
Température de sortie, T_{fout}	304.85 K
Température de cellule, T_{cell}	305.16 K
Température moyenne, $\bar{T}$	301.42 K
Capacité calorifique de l'eau, C_p	4180 J/kg.°C
Débit massique, $\dot{m}$	0.02 kg/s
Coefficient de transmission et d'adsorption, $(\tau\alpha)_{eau}$	0.519 W/mK

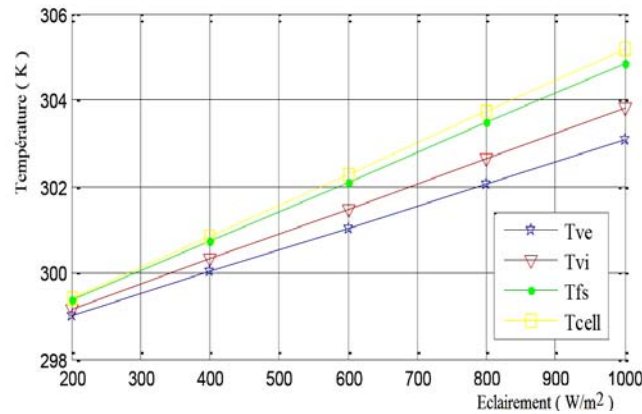


Fig. 4: Variation des différentes températures en fonction de l'éclairement

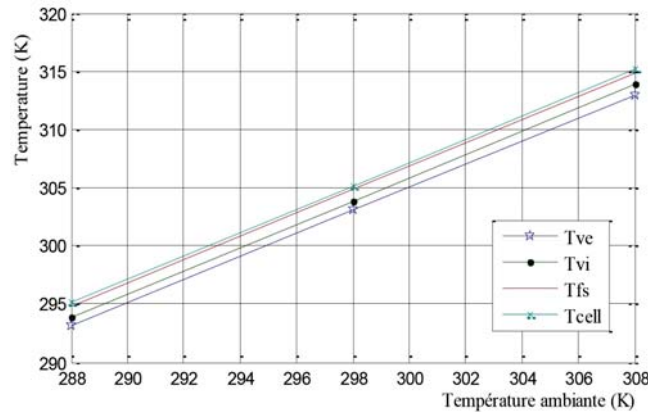


Fig. 5: Variation des différentes températures en fonction de la température ambiante

Une étude paramétrique a été réalisée sur la température du fluide en faisant varier le débit massique et le rayonnement G . La température du fluide à la sortie diminue en fonction du débit massique et sa valeur augmente avec l'augmentation du rayonnement G (Fig. 6 et 7).

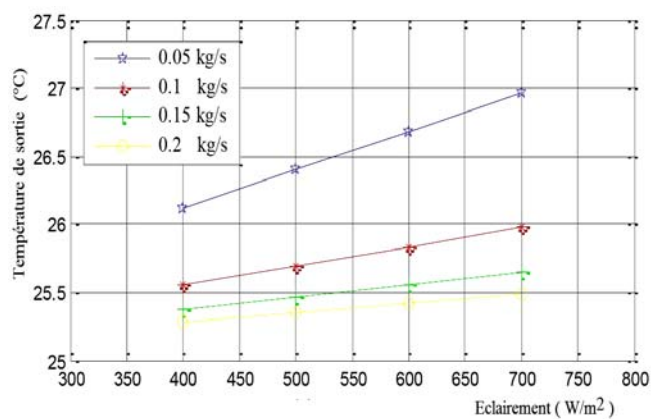


Fig. 6: Effet de radiation solaire dans la température de sortie T_{fs} pour différentes valeurs de débit massique

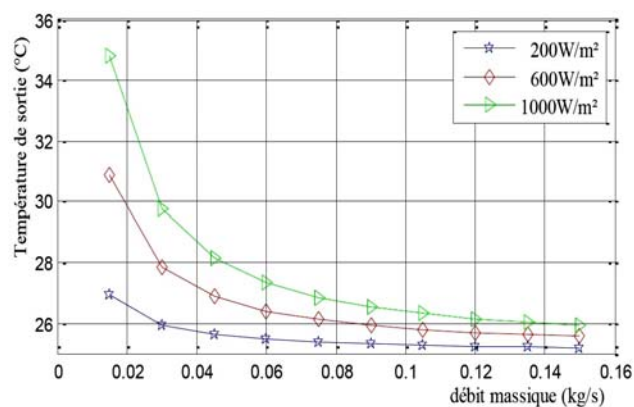


Fig. 7: Variation de la température de sortie T_{fs} en fonction de débit massique pour différentes valeurs de l'éclairement

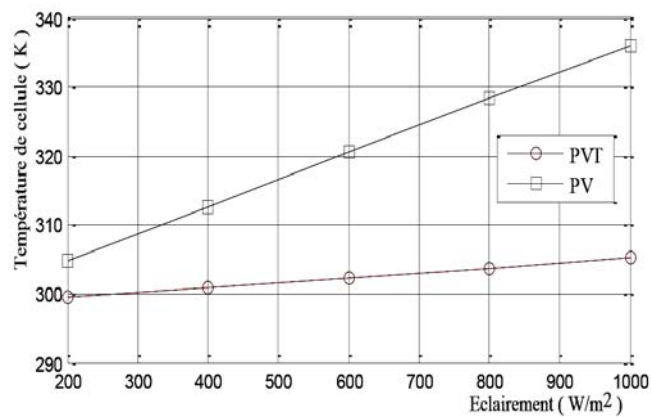


Fig. 8: Température de la cellule solaire en fonction de l'éclairement

Pour la figure 8, on remarque que la température de la cellule dans le cas d'un module PV est plus élevée que celle dans le cas d'un capteur hybride PVT qui assure le refroidissement des modules PV. Et par conséquent, on trouve que le rendement électrique dans le cas d'un capteur hybride PVT est plus élevé que celui dans le cas d'un module PV, tel qu'il est montré dans la figure 9.

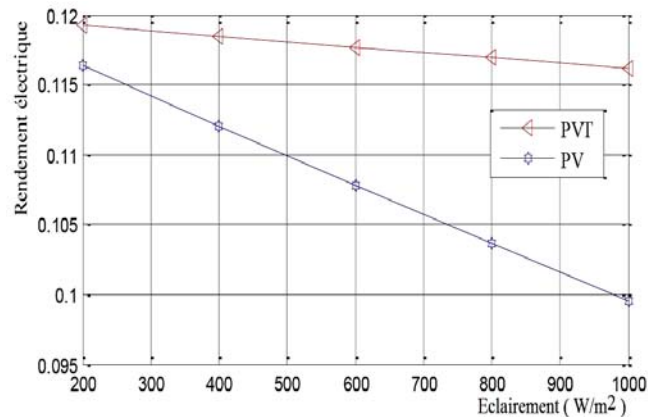


Fig. 9: La variation du rendement électrique en fonction de l'éclairement

La figure 10 présente l'influence de rayonnement G sur le rendement thermique du capteur hybride. Il varie linéairement avec l'éclairement, il atteint une valeur de 60.38 % pour un éclairement de 1000 W/m² et pour une température d'entrée du fluide égale à la température ambiante, en maintenant les autres valeurs constantes.

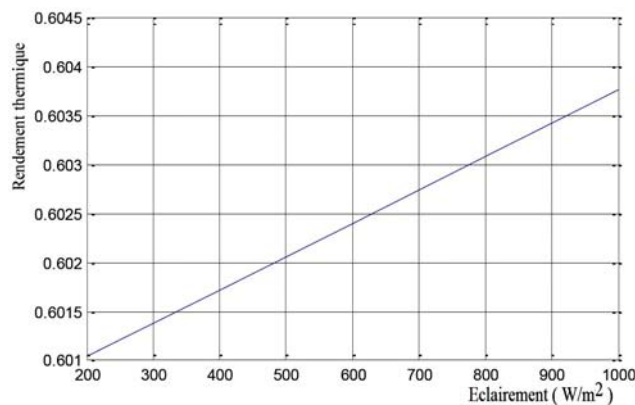


Fig. 10: Rendement thermique en fonction de l'éclairement

6. CONCLUSION

Une alternative intéressante aux modules photovoltaïques ordinaires est d'utiliser les générateurs photovoltaïques combinés avec les capteurs thermiques pour former les capteurs hybrides, le capteur ainsi réalisé permet de produire simultanément de l'électricité et de la chaleur.

Ce travail nous a permis d'étudier le capteur hybride PVT à eau, en déterminant ses performances thermiques et électriques, comme température des cellules et la température de sortie de fluide, le rendement électrique et thermique, pour différents valeurs de débit massique et différents valeurs de radiation solaire. Les résultats obtenus permettent de penser qu'il constitue une bonne alternative aux générateurs photovoltaïques et aux capteurs thermiques classiques séparément installés.

La chaleur extraite pourrait alors être utilisée pour chauffer de l'eau ou être transformée en une autre énergie (mécanique ou électrique), de même pourrait aider à éviter le problème de 'hot spot' dans le générateur photovoltaïque. On augmenterait ainsi le rendement électrique du capteur et exploiter l'énergie thermique recueillie.

NOMENCLATURE

G : Eclairement global, W/m^2	e : épaisseur, m
$h_{r,ve-amb}$: Coefficient d'échange par rayonnement verre- ambiance, W/m^2K	h_{conv} : Coefficient d'échange par convection dû au vent, W/m^2K
$h_{r,ve-vi}$: Coefficient d'échange par rayonnement verre ext-verre int, W/m^2K	$h_{r,vi-cel}$: Coefficient d'échange par rayonnement verre int-cell, W/m^2K
$h_{c,ve-vi}$: Coefficient d'échange par convection verre ext-verre int, W/m^2K	h_f : Coefficient d'échange par convection du fluide, W/m^2K
λ : Conductivité thermique, W/mK	ε : Emissivité
σ : Constante Stefan-Boltzmann, W/m^2K^4	α : Coefficient d'absorption
τ : Coefficient de transmission	T : Température, K
w_{air} : Largeur du canal d'air, m	w_{eau} : Largeur du canal d'eau, m
β_c : Coefficient remplissage des cellules	μ : Viscosité cinématique, m^2/s
V_v : Vitesse du vent, m/s	R : Résistance thermique, m^2K/W
g : Accélération de la pesanteur, m/s^2	ϕ : Angle d'inclinaison du capteur
Nu : Nombre de Nusselt	vi, ve : Vitre interne, vitre externe
cel, amb, v : Cellule, Ambiant, Verre	si, i : Silicium, Isolant

REFERENCES

- [1] R. Tscharnner, H. Curtins, J.P. Häring, R. Schwarz and A.V. Shah, 'Low Temperature Liquid PV/T Collector', Proceedings of the 5th 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 8th 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, NewYork, 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, N°2, 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] H.A. Zondag, 'Flat Plate PV-Thermal Collector's and Systems: A Review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, N°4, pp. 891 – 959, 2008.
- [13] H.A. Zondag, M. Bakker and W.G.J. Helden, 'PV / T Roadmap-a European Guide for the Development and Market Introduction of PV-Thermal Technology', *Rapport EU-Projet PV-Catapult*, 87 p., 2005.
- [14] Y. Tripanagnostopoulos, 'Aspects and Improvements of Hybrid Photovoltaic / Thermal Solar Energy Systems', *Solar Energy*, Vol. 81, N°9, pp. 1117 – 1131, 2007.
- [15] Ebrahim M. Ali Alfegi, Kamaruzzaman Sopian, Mohd Yusof Hj Othman and Baharudin Bin Yatim, 'Mathematical Model of Double Pass Photovoltaic Thermal Air Collector with Fins', *American Journal of Environmental Sciences*, Vol. 5, N°5, pp. 592 - 598, 2009.
- [16] T.T. Chow, W. HE, J. Ji and A.L.S. Chan, 'Performance Evaluation of Photovoltaic – Thermosyphon System for Subtropical Climate Application', *Solar Energy*, Vol. 81, N°1, pp. 123 – 130, 2007.
- [17] K. Touafek, A. Malek et M. Haddadi, 'Etude Expérimentale du Capteur Hybride Photovoltaïque Thermique', *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 9, N°3, pp. 143 – 154, 2006.
- [18] K. Touafek, M. Haddadi and A. Malek, 'Experimental Study on a New Hybrid Photovoltaic Thermal Collector', *Applied Solar Energy*, Vol. 45, N°3, pp. 181 – 186, 2009.
- [19] Rapport de Stage, 'Pré-étude d'un Système Couplé Photovoltaïque/Thermique', Université Joseph Fourier, Grenoble, 2010.
- [20] J. Bernards, 'Energie Solaire Calculs et Optimisation', France, Août 2004.
- [21] G.N. Tiwari, 'Solar Energy: Fundamentals, Design, Modeling and Applications', Narosa Publishing House, New Delhi (2002).
- [22] H.A. Zondag , D.W. de Vries, W.G.J. van Helden, R.J.C. van Zolingen and A.A. van Steenhoven, 'The Yield of Different Combined PV-Thermal Collector Designs', *Solar Energy*, Vol. 74, N°3, pp. 253 – 269, 2003.
- [23] Y. Jannot, 'Thermique Solaire', Ecole des Mines, Nancy, 2012.
- [24] L.W. Florschuetz, 'On Heat Rejection from Terrestrial Solar Cell Arrays with Sunlight Concentration', In: *Photovoltaic Specialist Conference 11th* Scottsdale, Arizona, May 3-8, 1975, pp. 318 – 326, 1975.
- [25] H.G. Teo, P.S. Lee and M.N.A. Hawlader, 'An Active Cooling System for Photovoltaic Modules', *Applied Energy*, Vol. 90, N°1, pp. 309 – 315, 2012.
- [26] S. Boddaert, R. Morlot, C. Menezo, D. Quenard et J. Brau, 'Etude et Optimisation du Potentiel d'un Capteur Thermique Photovoltaïque de Faible Epaisseur Intégrable au Bâti', 12^{èmes} Journées Internationales de Thermique, Tanger, Maroc du 15-17 Novembre 2005.