

Etude expérimentale du capteur hybride photovoltaïque thermique

Khaled Touafek ^{1*}, Ali Malek ² et Mourad Haddadi ³

¹ Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
B.P. 88, ZI, G. Taam, Ghardaïa

² Division Energie Solaire Photovoltaïque, Centre de Développement des Energies renouvelables,
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

³ Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique,
Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger

(reçu le 28 Septembre 2005 – accepté le 30 Septembre 2006)

Résumé - La température des modules photovoltaïques peut être abaissée par extraction de la chaleur à l'aide d'une circulation naturelle ou forcée adéquate d'un fluide. La chaleur extraite pourrait alors être utilisée pour chauffer de l'eau ou transformée en une autre énergie. On augmenterait ainsi le rendement électrique du capteur et exploiter l'énergie thermique recueillie. L'objectif de notre travail est d'étudier expérimentalement et de mettre en œuvre un prototype de capteur hybride pour évaluer ses performances électriques et thermiques. Les résultats obtenus permettent de penser que ce type de capteur constitue une bonne alternative aux modules photovoltaïques et aux capteurs thermiques classiques installés séparément.

Abstract - The temperature of the photovoltaic modules can be lowered by extraction of the heat by means of an adequate natural or forced circulation of a fluid. The extracted heat could be then used to warm some water or transformed into another energy. One could thus increase the electric output of the sensor and exploit thermal energy collected. The objective of our work was to study experimentally and implement a prototype of the hybrid sensor to estimate his electrical and thermal performances. The obtained results allow to think that this type of sensor constitutes a good alternative to the photovoltaic sensors and to the classic thermal sensors separately installed.

Mots clés: Capteur solaire - Photovoltaïque - Thermique - Hybride - Prototype.

1. INTRODUCTION

Dans le meilleur des cas, le rendement de conversion des modules photovoltaïques ne dépasse pas les 16 %. Avec les recherches en cours de développement, il peut augmenter de 2 à 3 % dans les cinq prochaines années, mais avec un coût considérablement plus élevé.

Cependant, ce rendement dépend en grande partie de la température de fonctionnement. Typiquement la perte peut atteindre 15 – 20 % si aucun refroidissement du module n'est prévu. L'objectif de notre étude est de minimiser la température de fonctionnement du module photovoltaïque en prélevant un maximum de chaleur et ensuite l'utiliser pour chauffer de l'eau par exemple.

Le but est donc double: augmenter le rendement électrique du module et exploiter deux types d'énergies: électrique et thermique. Nous avons mis en œuvre un prototype de capteur hybride et nous l'avons étudié expérimentalement pour évaluer ses performances électriques et thermiques.

Pour cela, nous avons développé et réalisé un prototype de capteur hybride à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa et nous avons entamé des campagnes de mesures: de température, de puissance électrique et de rayonnement solaire sur une

* khaledtouafek@hotmail.com

période de temps qui nous a permis la détermination pratique de l'ensemble des caractéristiques électriques et thermiques de ce capteur [1].

La caractéristique $I(V)$ déterminée par expérimentation pour les deux capteurs a permis d'effectuer la comparaison des performances électriques du capteur hybride par rapport à un module photovoltaïque témoin laissé libre sur la même structure.

En général, deux types de capteurs PV/T peuvent être distingués: les collecteurs PV/T avec couverture en verre qui produisent une chaleur à haute température, mais avec un rendement électrique légèrement inférieur, et les capteurs PV/T sans vitrage qui produisent de la chaleur relativement à basse température et qui possèdent des performances électriques élevées [2, 3].

Les capteurs hybrides sans vitre supplémentaire délivrent relativement des températures faibles, et doivent être combinés avec des pompes à chaleur pour chauffer de l'air ambiant ou de l'eau [4, 5].

Une des applications des modules photovoltaïques en combinaison non directe avec les capteurs thermiques est dans les systèmes SDHW (Solar Domestic Hot Water) qui consistent en général à alimenter la résistance interne nécessaire au chauffage de l'eau par l'électricité générée par les modules photovoltaïques [6].

Des travaux (2003 - 2004) ont été consacré aux aspects de la production simultanée de l'énergie calorifique et de l'énergie électrique par des modules photovoltaïques [7].

Les capteurs hybrides à base de silicium amorphe qui ont un rendement de conversion photovoltaïque faible (près de 7 %) ont été étudiés par K. Adamoto et son équipe [8].

M.J. Elswijk *et al.* [9] ont conclu dans une étude que dans l'habitat, un capteur hybride PV/T a besoin de 38 % moins d'espace de toiture qu'un système combiné de modules photovoltaïques et de collecteurs thermiques avec le même rendement approximatif. Le rendement thermique a été trouvé de l'ordre de 77 %, avec un coefficient de perte de chaleur de $23 \text{ W/m}^2\text{K}$ (travaux de M. Bakker *et al.* [10]).

H.A. Zondag *et al.* [11] ont étudié l'effet de la résistance thermique sur le rendement du capteur hybride. On peut considérer, que pour les capteurs hybrides, un rendement total de conversion comme étant la somme du rendement thermique et du rendement électrique.

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

2. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

L'objectif de l'étude expérimentale est de déterminer en premier lieu la distribution de la température du capteur hybride et de voir son influence sur la puissance électrique produite par le capteur. Pour cela, nous avons placé sur une seule structure, un module photovoltaïque de caractéristiques identiques que le module utilisé pour réaliser le capteur hybride et nous avons étudié ces deux capteurs.

La figure 1 montre une vue de dessus des deux capteurs disposés, côte à côte sur une même structure: le capteur hybride dans une enceinte qui lui offre une isolation thermique, et le module photovoltaïque non isolé thermiquement. Les deux capteurs sont orientés vers le sud avec une inclinaison en fonction de l'attitude du lieu.

2.1 Composition du banc d'essai

Le capteur hybride est un module photovoltaïque placé dans une enceinte métallique, contenant deux types d'isolations thermiques: une isolation latérale en laine de verre de 2 cm, et une isolation en face arrière du module en laine de verre et en polystyrène, respectivement 2 cm et 3 cm.

Le deuxième capteur est un module photovoltaïque de caractéristiques identiques à celui utilisé pour former le capteur hybride. Il est laissé libre pour comparer les performances électriques, entre autres son rendement électrique avec celui du capteur hybride.

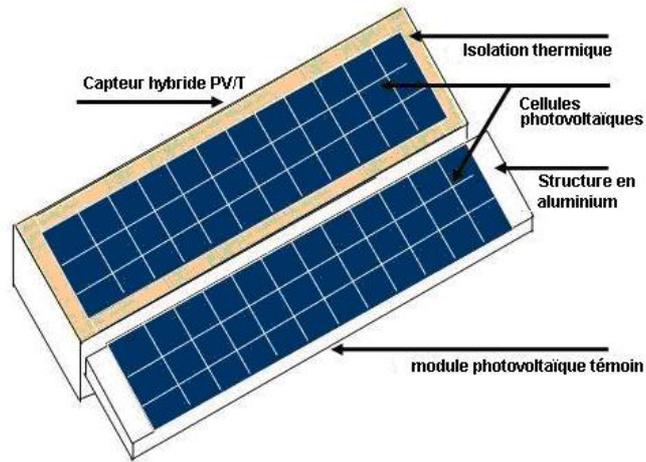


Fig. 1: Vue schématique du capteur hybride PV/T et du module photovoltaïque

2.2 Dispositif de mesures

Nous avons utilisé une acquisition de données de type Fluke Hydra séries II, 2625 A pour acquérir l'ensemble des paramètres. La mesure des températures a été faite par des PT100 RTD de résolution: 0.02 °C. Le rayonnement global a été mesuré par un pyranomètre de type Kipp&Zonen de coefficient: 0, 00000457 V.m²/W. Les deux capteurs sont connectés en circuit fermé sur une charge (résistance de 1 kΩ).

2.3 Relevé de la caractéristique I (V) des capteurs

Nous avons utilisé une charge électronique de type PVPM 2540C (Fig. 2) pour caractériser les deux capteurs et déterminer leurs paramètres électriques à des buts de comparaison.



Fig. 2: Charge électronique pour caractérisation

Cet appareil permet de déterminer tous les paramètres internes et permet de tracer la caractéristique I (V) d'un module photovoltaïque.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Performances électriques du capteur photovoltaïque isolé thermiquement et sans vitre

La figure 3 présente une comparaison entre les deux caractéristiques dans une configuration où le capteur est isolé et sans vitre (PV/T). Nous remarquons que le rendement est plus faible pour le capteur avec isolation que pour le module photovoltaïque libre (PV). Il a chuté de 8 %.

Le fait d'isoler thermiquement le module photovoltaïque a fait chuter le rendement électrique, c'est-à-dire que la production électrique de ce capteur a diminué par rapport à celle du module photovoltaïque laissé libre et non isolé. Ceci est dû au fait que ce dernier est ventilé naturellement.

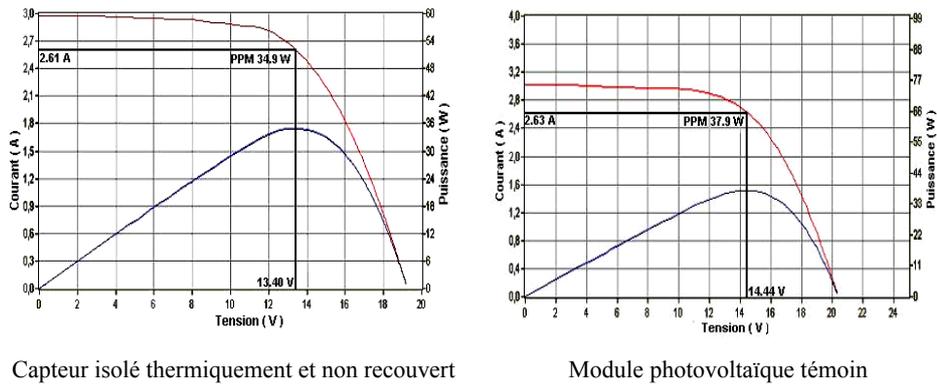


Fig. 3: Comparaison des caractéristiques I (V) des deux systèmes pour la première configuration

3.2 Distribution de la température dans le capteur photovoltaïque isolé

Dans cette configuration, le capteur photovoltaïque étant isolé thermiquement, nous avons mesuré la température au niveau de chaque couche du capteur. La figure 4 montre la distribution de la température en fonction du temps pour une variation d'éclairement G donné sur la même figure.

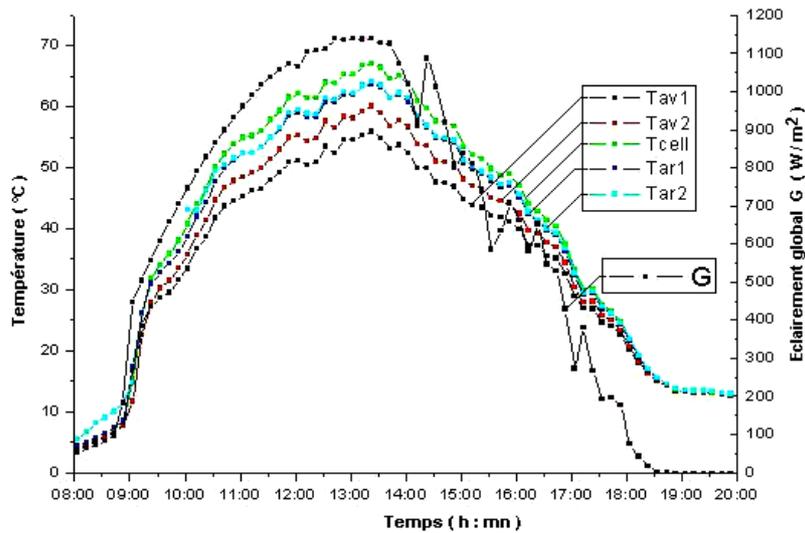


Fig. 4: Températures sur les trois faces du capteur isolé

Nous remarquons que les températures sont presque homogènes sur une même face du capteur, sur la face avant et sur la face arrière. Ce qui était prévu par la théorie. Cela est dû au fait que chaque couche est constituée de la même matière (le verre pour la face avant et le tedlar pour la face arrière).

Les résultats obtenus sont identiques à ceux que l'on a observé en simulation. En effet, la température de la cellule photovoltaïque est supérieure à la température dans la couche du vitrage protecteur et à celle de la couche de tedlar. Ceci s'explique par le fait que la cellule photovoltaïque est un générateur thermique, convertissant le rayonnement solaire reçu en électricité et en chaleur.

3.3 Effet de l'ajout d'une vitre sur le capteur isolé thermiquement

3.3.1 Température du capteur

La figure 5 montre l'effet de l'ajout d'une vitre supplémentaire au dessus du capteur isolé thermiquement.

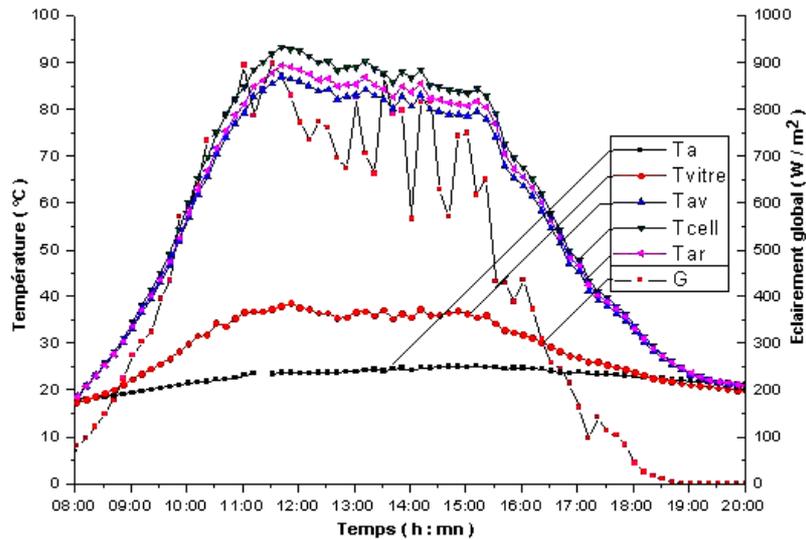


Fig. 5: Température du capteur isolé thermiquement avec ajout d'une vitre

L'ajout d'une vitre supplémentaire au-dessus du capteur a provoqué une augmentation de la température de toutes les couches. Elle a atteint 87 °C sur la face avant, 93 °C sur la couche de la cellule et 89 °C sur la face arrière du capteur.

L'augmentation de ces températures concorde avec ce qui a été prévu dans la phase de simulation, car la vitre ajoutée a provoqué un effet de serre et donc les rayons solaires sont piégés entre la vitre et la face avant du capteur isolé thermiquement, ce qui a eu pour effet une augmentation des températures.

La température de la vitre (face extérieure) est restée relativement faible et proche de la température ambiante.

3.3.2 Comparaison avec le capteur photovoltaïque libre

Nous avons relevé les températures des capteurs dans un laps de temps court (entre 09 :00 et 14 :00) à cause des températures élevées obtenues.

La figure 6 montre la différence des températures des cellules du capteur photovoltaïque isolé thermiquement avec une vitre supplémentaire placée sur la face avant et celles du capteur photovoltaïque laissé libre et donc aéré naturellement.

Le placement d'une vitre supplémentaire sur le capteur a pour effet d'augmenter les performances thermiques de ce dernier. Nous constatons sur la figure 6 que la température de la cellule du capteur isolé thermiquement et vitré a atteint les 120 °C.

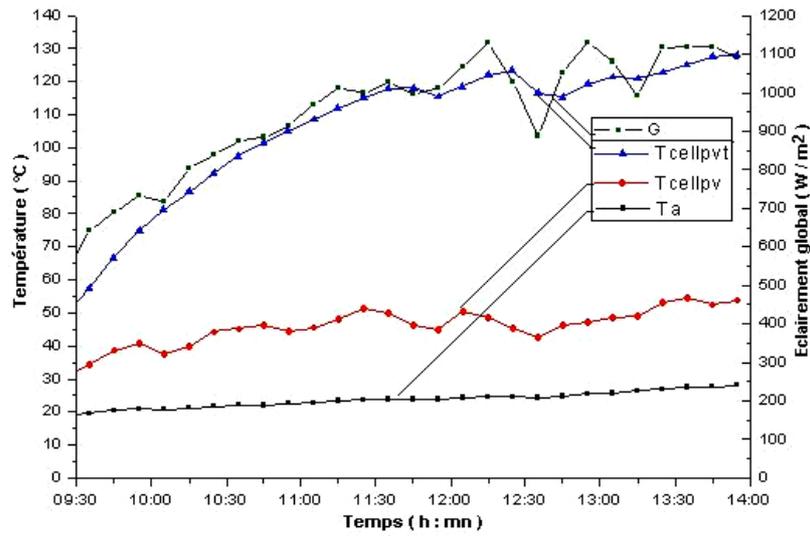


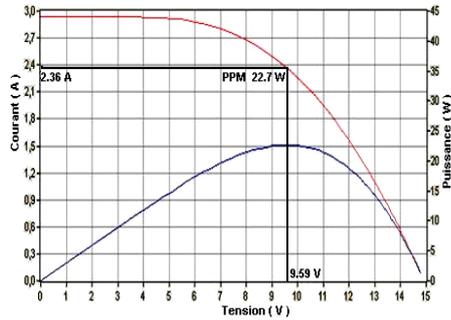
Fig. 6: Comparaison des températures de cellules des deux capteurs

3.4 Performances électriques du capteur isolé thermiquement et recouvert d’une vitre

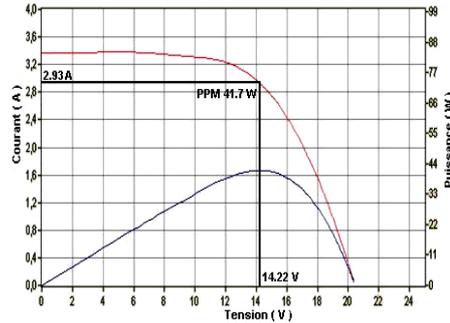
Pour voir l’influence de la vitre supplémentaire sur les performances électriques du capteur isolé thermiquement, nous avons relevé la caractéristique $I(V)$ respectivement du capteur isolé et du module photovoltaïque témoin (Fig. 7).

La puissance maximum du capteur isolé thermiquement a chuté de 41.7 W à 22.7 W pour un éclaircissement de 1200 W/m², ce qui est très important.

Le rendement électrique de la cellule dépend directement de la température de fonctionnement, ce qui a été démontré théoriquement.



Capteur isolé thermiquement et recouvert d’une vitre



Module photovoltaïque témoin

Fig. 7: Caractéristique $I(V)$ des deux capteurs

L’ajout de la vitre supplémentaire a provoqué une chute du rendement électrique de 45 % par rapport au module photovoltaïque non isolé. Donc l’inconvénient de la vitre supplémentaire est la chute des performances électriques.

3.5 Résultats de l'expérimentation sur le capteur avec échangeur de chaleur

Nous avons intégré dans le capteur isolé thermiquement et non recouvert, un échangeur de chaleur constitué d'une plaque et d'un serpentin en cuivre pour y faire circuler de l'eau. Nous appelons ce capteur ainsi réalisé, de capteur hybride puisqu'il produit simultanément de l'énergie électrique et de l'énergie calorifique.

3.5.1 Distribution de la température dans le capteur hybride non recouvert

La figure 8 montre la distribution de la température dans le capteur hybride non recouvert de vitre supplémentaire, la température au niveau de la cellule du capteur hybride maximum atteinte est de 47 °C (rappelons qu'elle était de 66 °C sans échangeur de chaleur) et elle est de 43 °C pour le module photovoltaïque témoin. On voit donc que l'intégration d'un échangeur de chaleur au niveau du capteur a fait diminuer la température du capteur hybride en prélevant de la chaleur pour chauffer le fluide.

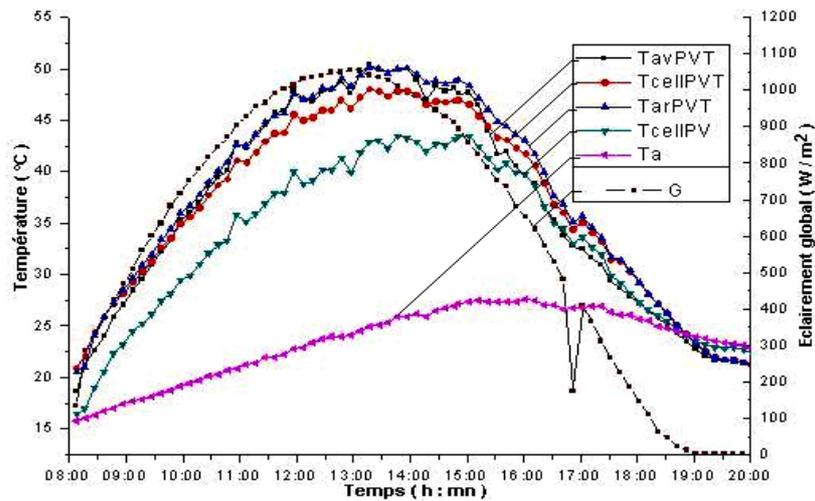


Fig. 8: Distribution de la température dans le capteur hybride non recouvert

3.5.2 Rendement thermique du capteur hybride non recouvert

Afin de calculer les performances thermiques du capteur hybride PV/T, nous l'avons comparé aux performances des capteurs thermiques classiques, à travers la détermination de son rendement thermique.

La figure 9 montre le rendement thermique du capteur hybride sans vitre supplémentaire. Il est égal à 62 % lorsque la température d'entrée du fluide est égale à la température ambiante.

Le rendement thermique du capteur hybride varie linéairement avec la température réduite $(T_{in} - T_a)/G$ et sa valeur est satisfaisante en le comparant aux rendements moyens des capteurs thermiques classiques.

3.5.3 Performances électrique du capteur hybride non recouvert

Les performances électriques du capteur hybride sont présentées sur la figure 10. Nous constatons que le courant maximum pour le capteur hybride (2.25 A) est supérieur à celui du module photovoltaïque témoin (2.23 A) et que le rendement électrique est sensiblement égal pour les deux capteurs.

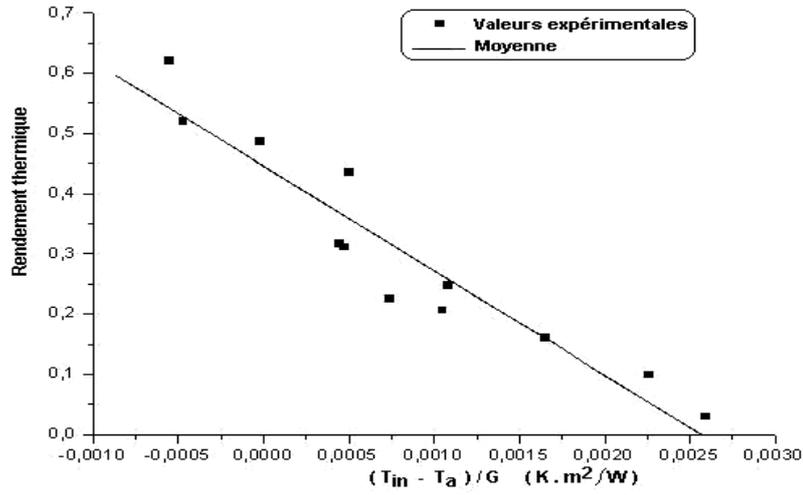
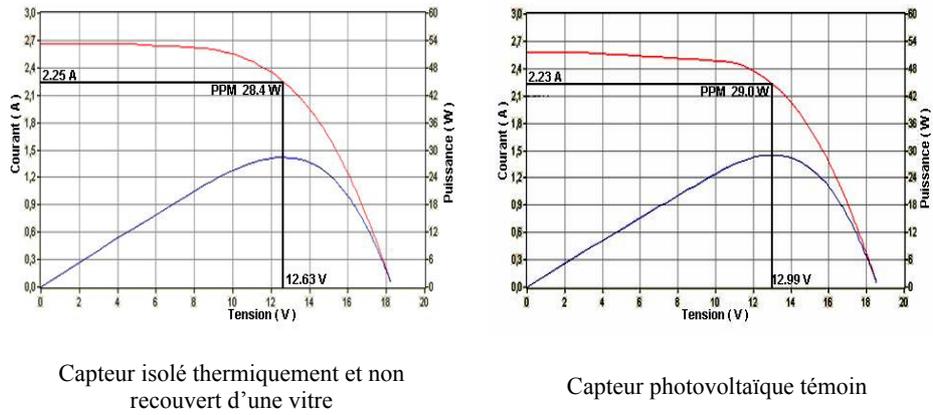


Fig. 9: Rendement thermique du capteur hybride non recouvert



Capteur isolé thermiquement et non recouvert d'une vitre

Capteur photovoltaïque témoin

Fig. 10: Caractéristique I (V) du capteur hybride non recouvert et du module témoin

L'intégration de l'échangeur de chaleur a provoqué la diminution de la température du capteur, ce qui va augmenter son rendement électrique.

3.6 Effet de l'ajout d'une vitre supplémentaire au capteur hybride

Pour augmenter davantage les performances thermiques du capteur hybride, nous avons étudié l'effet de l'ajout de la vitre supplémentaire.

3.6.1 Distribution de la température dans le capteur hybride recouvert

La température maximum de la cellule du capteur hybride obtenu avec l'ajout de la vitre est de 59 °C. Elle était de 93 °C sans échangeur de chaleur.

La figure 11 montre la distribution de la température dans le capteur hybride recouvert d'une vitre supplémentaire.

Les résultats que nous avons obtenus expérimentalement concordent avec les résultats théoriques. En effet, l'ajout de la vitre augmente le niveau des températures, mais à cause de la présence de l'échangeur de chaleur, ces températures n'atteignent pas les valeurs obtenues pour la deuxième configuration.

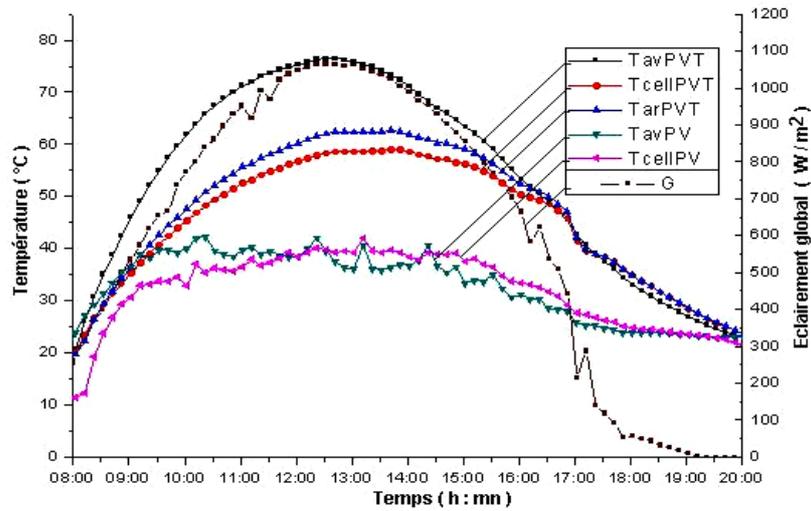


Fig. 11: Distribution de températures dans le capteur hybride recouvert

3.6.2 Rendement thermique du capteur hybride recouvert

L'allure du rendement thermique du capteur hybride couvert est représentée sur la figure 12. On remarque que les valeurs de la température réduite ($T_{in} - T_a$) sont toutes négatives, et cela s'explique par le fait que la température d'entrée du fluide durant les tests était inférieure à la température ambiante.

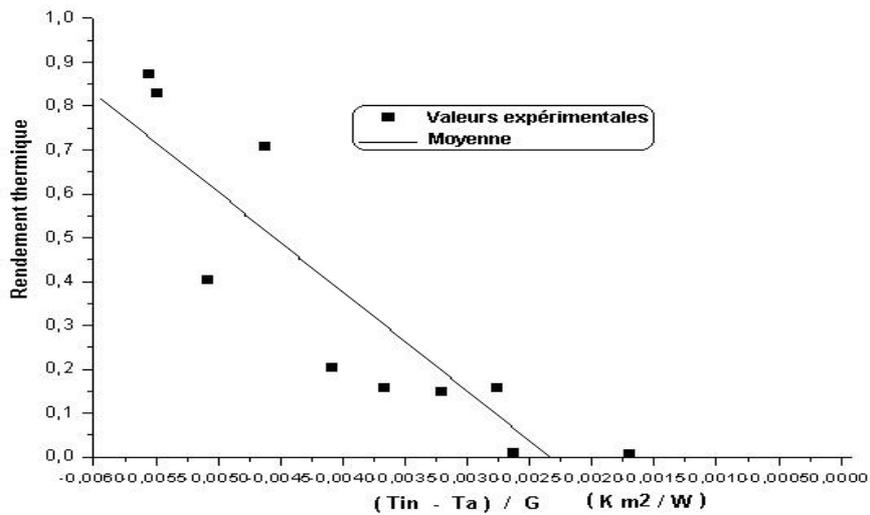


Fig. 12: Rendement thermique du capteur hybride recouvert

Le rendement thermique du capteur hybride recouvert est supérieur à celui du capteur non recouvert à cause de l'augmentation des températures.

3.6.3 Performances électriques du capteur hybride recouvert

Les performances électriques du capteur hybride recouvert et du module photovoltaïque sont représentées à la figure 13.

Nous remarquons que le rendement électrique du capteur hybride recouvert a chuté de 18 % par rapport au rendement du module photovoltaïque témoin.

Le courant maximum délivré par le capteur hybride vaut 2.00 A et dans les mêmes conditions de rayonnement incident et de vitesse de vent, le module photovoltaïque a délivré 2.33 A.

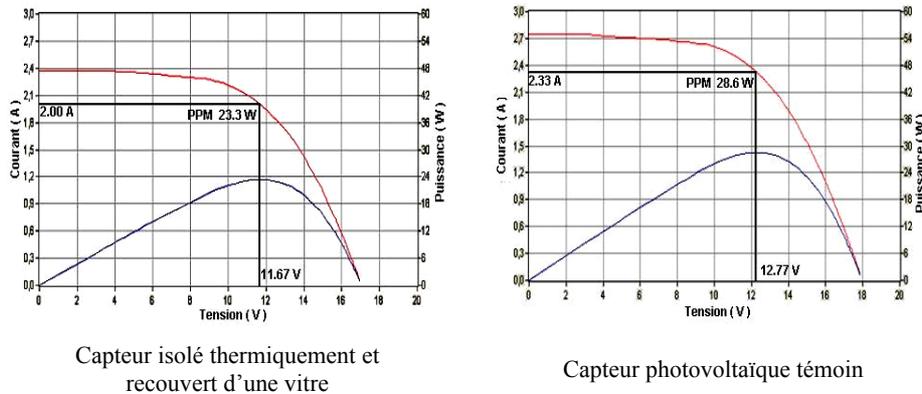


Fig. 13: Caractéristique $I(V)$ du capteur hybride non recouvert et du module témoin

Nous pouvons dire que la présence de la vitre augmente les performances thermiques du capteur hybride et influe négativement sur ses performances

4. CONCLUSION

Nous avons étudié le capteur hybride expérimentalement à travers le prototype réalisé. Pour les capteurs hybrides, on considère le rendement total qui est la somme du rendement électrique et du rendement thermique pour des conditions de rayonnement choisies.

Nous avons obtenu un rendement thermique égal à 60 % du capteur hybride sans vitre et de 70 % pour le capteur hybride avec vitre.

Le rendement électrique a été amélioré pour le capteur non recouvert par rapport au capteur témoin. Par contre, pour le capteur recouvert, il a été diminué de 18 % par rapport au capteur témoin. Les résultats trouvés expérimentalement se concordent avec la théorie.

Enfin, il faudra sans doute comparer les coûts et performances des systèmes classiques avec les systèmes basés sur les capteurs hybrides comme les mini centrales de production d'énergie électriques et thermiques. Compte tenu de nos résultats, il n'est pas impossible que ces derniers soient plus avantageux.

REFERENCES

- [1] K. Touafek, 'Etude d'un Capteur Solaire Hybride Photovoltaïque Thermique', Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, (2005).
- [2] M.J.M. Jong, 'System Studied on Combined PV/Thermal Panels', Elfes Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Staffelstein, Germany, 9 - 11 May, 2001.
- [3] M.J.M. Jong and H.A. Zondag, 'System Studies on Combined PV Thermal Panels', 9th International Conference on Solar Energy in High latitudes, Northsun 2001, The Netherlands, May 6 - 8, 2001.

- [4] M. Bakker, K.J. Strootman and M.J.M. Jong, 'PV/T Panels: Fully Renewable and Competitive', ISES SWC Göteborg, Germany, 2003.
- [5] H.A. Zondag and W.G.J. Van Helden, 'PV-Thermal Domestic Systems', 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, May 11 - 18, 2003.
- [6] A.A. Ghoneim, A.Y. Al-Hasan and A.H. Abdullah, 'A Economic Analysis of Photovoltaic-Powered Solar Domestic Hot Water Systems in Kuwait', Renewable Energy, Vol. 25, pp. 81 - 100, 2002.
- [7] W.G.J. Van Helden, H.A. Zondag, M. Bakker, M.J. Elswijk, M.J.M. Jong and K.J. Strootman, 'PVT Panels and PVT Collectors: Pathways to Distributed Solar Cogeneration', European Solar Energy Conference (ESTEC), 26 - 27 June, 2003.
- [8] K. Adamoto, P. Supanich, T. Nualboonrueng and P. Sihanugrist, 'A-Si Hybrid Solar Collector', 3rd World Conference on photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, May 11 - 18, 2003.
- [9] M.J. Elswijk, M.J.M. Jong, K.J. Strootman, J.N.C. Braakman, E.T.N. de Lange and W.F. Smit, 'Photovoltaic/Thermal Collectors in Large Solar Thermal Systems', 19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 7 - 11 Juin, 2004.
- [10] M. Bakker, M.J. Elswijk, H.A. Zondag, M.T.N. Ottenbros and W.G.J. Van Helden, 'Outdoor Performance of Uncovered PV/Thermal Panels', 19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 7 - 11 Juin, 2004.
- [11] H.A. Zondag, M.J. Elswijk and M. Bakker, 'PV-Thermal Collector Development - An Overview of the Lessons Learnt', 19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, France, 7 - 11 Juin, 2004.
- [12] Y. Tripanagnostopoulos, 'Low Concentration Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) Solar Energy Systems, IP Programme- ICT Tools: PV Systems Teaching and Learning', Patra, 1st July - 10th July, 2004.

ANNEXE



Vue du capteur hybride PV/T



Vue du capteur hybride PV/T
et du module témoin



Vue du capteur hybride PV/T
et du module témoin



Vue du capteur hybride PV/T
en expérimentation



Vue du capteur hybride PV/T
et du module témoin



Vue du capteur hybride PV/T
en expérimentation



Vue de la plaque en cuivre et du serpent
(système thermique)



Autre vue du capteur hybride PV/T
en expérimentation