

Étude des performances thermiques d'un capteur solaire photovoltaïque / thermique hybride à air intégrable au système de ventilation des bâtiments

Ya Brigitte ASSOA^{1*}, Benjamin BOILLOT¹

¹LEB / DTS / CEA - INES RDI : Bâtiment LYNX 1 - 50, avenue du Lac Léman 73377 Le Bourget Du Lac

* (auteur correspondant : ya-brigitte.assoa@cea.fr)

Résumé - Cette étude concerne un capteur solaire PV/T hybride à air intégrable à la toiture des bâtiments. Ce système est composé de modules photovoltaïques comportant une lame d'air isolée pouvant être ventilée ou non en sous-face. Une modélisation en 2D et en régime permanent du composant suivant une approche nodale est tout d'abord présentée. Elle est validée à partir d'une étude expérimentale menée sur une maquette soumise à un simulateur solaire, en conditions d'ensoleillement contrôlées. En perspective, le prototype sera analysé en phase d'intégration au bâti.

Nomenclature

S	surface d'un élément, m^2	G	rayonnement solaire global, $W.m^{-2}$
T	température, K	<i>Symboles grecs</i>	
$K_{i,j}$	conductance entre les nœuds i et j , $W.K^{-1}$	α_{cell}	absorptivité des cellules PV
$h_{i,j}$	coefficient de transfert thermique entre i et j , $W.K^{-1}.m^{-2}$	τ_{verre}	transmittivité du verre
$S_{i,j}$	surface d'échange entre i et j , m^2	η	rendement électrique
T_i	température au nœud i , $^{\circ}C$	<i>Indices et exposants:</i>	
M_i	masse de la couche i , kg	i, j	nœud de température ou volume fini
C_i	chaleur massique au nœud i , $J.kg^{-1}.K^{-1}$	pv	module PV
qm	débit massique d'air, kg/s	f	isolant
T_e	température d'air ambiant extérieur, $^{\circ}C$	sin	surface intérieure de l'isolant
T_c	température du ciel, $^{\circ}C$	$arad$	air (radiante) dans la lame
C_p	chaleur massique de l'air, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$aconv$	air (convective) dans la lame
Q	énergie solaire absorbée, $W.m^{-2}$	in	entrée de la lame d'air
r_c	fraction de surface d'absorbeur couverte par les cellules PV	moy	moyenne

1. Introduction

Cette étude a pour objectif d'analyser un capteur solaire photovoltaïque / thermique hybride à air pouvant être intégré à la toiture des bâtiments. Ces systèmes dits hybrides permettent d'obtenir des productions simultanées d'énergies électrique et thermique adaptées à diverses applications dans le bâtiment (électricité, chauffage, eau chaude sanitaire,...).

Leur principe est de permettre l'optimisation du rendement électrique des modules PV en les refroidissant par récupération d'une partie de la chaleur qu'ils dissipent à l'aide d'un fluide caloporteur (air ou eau).

Diverses études ont été menées sur les capteurs solaires PV/T à air.

En 1998, J.C. Hollick [1] présente l'étude expérimentale d'un capteur solaire PV à air composé d'un bardage métallique nervuré et perforé sur lequel sont collés des modules PV.

Hegazy [2] compare en 2000, les performances thermiques et électriques de quatre capteurs solaires PV/T hybrides à air différenciés par le mode de refroidissement mécanique des modules PV : au-dessus, en dessous, de part et d'autre de l'absorbeur, et par double circulation d'air.

En 2006, Tiwari et al [3] présentent l'étude théorique et expérimentale d'un capteur solaire PV/T à air. Ce composant est constitué de deux modules PV connectés en série et montés sur une couche isolante non-corrosive de Tedlar. Une lame d'air isolée à l'aide d'une couche de bois permet la ventilation naturelle ou forcée des modules PV en sous-face.

Dans cet article, le capteur solaire PV/T hybride à air étudié est tout d'abord décrit. Puis, la modélisation mathématique en 2D et en régime permanent réalisée pour ce composant est proposée. Les résultats du modèle numérique développé sont validés à partir d'une étude expérimentale menée en laboratoire en conditions d'ensoleillement contrôlés.

2. Analyse thermique

Le capteur solaire PV/T hybride à air schématisé en Figure 1 est composé de quatre modules PV comportant en sous-face une lame d'air isolée par 60 mm de polystyrène extrudé pris entre deux plaques de 2 cm de polycarbonate.

La modélisation est effectuée en régime permanent par analogie électrique en imposant certaines hypothèses. L'ensoleillement est supposé uniforme sur toute la surface du prototype. La température d'air ambiant et la température du ciel sont prises en compte. La température étant considérée uniforme suivant l'axe oy , le problème est supposé bi-dimensionnel. Pour chaque volume fini, un nœud de température unique est mis pour les modules PV car les gradients de température suivant l'axe oz sont négligeables par rapport aux gradients de température suivant l'axe ox . Ainsi, la discrétisation en volumes finis i du système est réalisée uniquement suivant l'axe ox (le long de la lame d'air). La lame d'air est représentée par un nœud de température d'air convective T_{aconv} et un nœud de température d'air radiative T_{arad} . Seule la ventilation forcée est prise en compte dans cette étude.

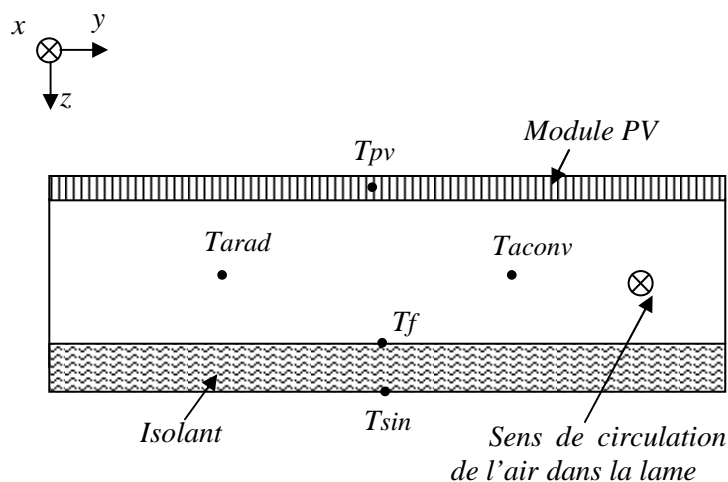


Figure 1: Section transversale du composant et position des nœuds de température

3. Modélisation thermique

Pour chaque volume fini de longueur dx du système, un bilan thermique est effectué au niveau des modules PV (T_{pv}), de l'isolant (T_i , T_{sin}), et de la lame d'air (T_{arad} , T_{aconv}).

3.1. Bilan thermique

Le bilan thermique réalisé prend en compte les phénomènes de conduction, convection et rayonnement en interaction au niveau du système.

Les équations sont de la forme [4] [5]:

Pour les nœuds centraux, d'interface ou de surface (couche solide):

$$\sum_j K_{i,j} \cdot (T_j - T_i) = 0 \quad (1)$$

Les conductances sont déterminées de la manière suivante :

$$K_{i,j} = h_{i,j} \cdot S_{i,j} \quad (2)$$

3.2. Bilan thermique au nœud fluide T_{aconv} et au niveau des modules PV

Le bilan thermique, en ce qui concerne le nœud de température d'air convective est donné par l'équation suivante:

$$K_{pv,aconv} \cdot (T_{pv} - T_{aconv}) + K_{f,aconv} (T_f - T_{aconv}) + q_m \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{aconv}) = 0 \quad (3)$$

Le coefficient de transfert thermique par convection h_{cepv} entre la surface des modules PV et la température d'air ambiant s'exprime en fonction de la vitesse du vent [6] :

$$h_{cepv} = \sqrt[3]{0.216 \cdot (T_{pv} - T_{amb}) + 275 \cdot V_{vent}^{1.74}} \quad (4)$$

Les équations de Nusselt liées aux transferts convectifs en ventilation forcée dans la lame d'air en sous - face des modules PV ont été définies de manière détaillée dans un précédent article [5].

Le bilan thermique, en ce qui concerne les modules PV est donné par l'équation suivante:

$$K_{conv,pv} \cdot (T_{conv} - T_{pv}) + K_{rad,pv} (T_{rad} - T_{pv}) + K_{c,pv} \cdot (T_c - T_{pv}) + K_{e,pv} \cdot (T_e - T_{pv}) + Q \cdot S_{pv} = 0 \quad (5)$$

$$Q = G \cdot \tau_{verre} \cdot \alpha_{cell} - G \cdot r_c \cdot \eta_{pv} \quad (6)$$

Le modèle développé a permis la réalisation d'un sous-programme sous le logiciel TRNSYS décrivant le comportement thermique du système étudié sous diverses conditions aux limites.

4. Confrontation expérimentale

Le modèle mathématique obtenu a été validé à partir des résultats obtenus à partir d'une étude expérimentale menée sur une maquette montée en laboratoire sous un simulateur solaire et en conditions d'ensoleillement contrôlées.

4.1. Description du dispositif expérimental

La maquette réalisée est composée de quatre modules PV reliés par des rails transversaux et posés sur un caisson horizontal de dimensions 1,7 m x 2,2 m. L'épaisseur de la lame d'air (Ep. lame) est réglable de 5,5 cm, 8 cm puis 12 cm. La vitesse du ventilateur est réglable de 0 à 6 m.s⁻¹. L'irradiation G, assurée par 8 lampes de 4000 W fixées sur un support amovible, est réglable entre 0 à 1200 W.m⁻². Deux modules de mesure situés l'un à l'entrée et l'autre à la sortie de la lame d'air, permettent la mise en place des instruments de mesure de température et de vitesse d'air au niveau de la lame d'air (voir Figure 2).

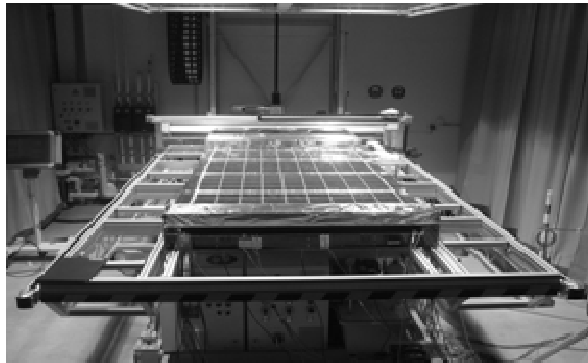


Figure 2 : Maquette sous le banc d'ensoleillement artificiel

Des thermocouples de type K et des sondes PT100 sont utilisés pour la mesure des températures de surface. La température et la vitesse d'air à l'entrée et à la sortie de la lame sont mesurées à l'aide de thermocouples de type K reliés à des anémomètres à fil chaud. La température d'air ambiant T_e est obtenue à partir de deux sondes PT100 ajourées disposées de part et d'autre du banc et abritées de l'éclairement. Enfin, des mesures de tension, d'intensité et de puissance électriques sont effectuées à partir d'un traceur IV.

4.2. Validation du modèle numérique

Les résultats du modèle numérique développé ont été validés à partir des données expérimentales obtenues. Le tableau 1 présente quelques valeurs de température obtenues au niveau de l'air dans la lame et des modules PV, avec un éclairement de 600 W.m⁻².

	$T_{pv\text{moy}}$ (moyenne)	$T_{aconv\text{moy}}$ (moyenne)	T_{fmoy} (moyenne)	T_{aconv} (en sortie de lame)	T_{pv} (en sortie de lame)
	°C	°C	°C	°C	°C
Calculé	43,6	23,9	27,0	25,2	44,5
mesuré	43,2	24,5	26,2	26,4	45,8
Ecart absolu	0,4	0,6	0,8	1,2	1,3

Tableau 1 : Comparaison des résultats mesurés et calculés (Ep. lame.=5,5 cm, $T_e=22$ °C)

La comparaison entre les résultats de la simulation et les valeurs expérimentales montre qu'elles sont très proches. Les écarts absolus sont compris entre 0,4 °C et 1,3 °C. Les différences peuvent s'expliquer par le fait que le champ d'irradiation du banc d'ensoleillement artificiel n'est pas parfaitement uniforme, ce qui n'a pas été pris en compte dans les calculs.

5. Conclusion

La modélisation mathématique du capteur solaire PV/T hybride à air étudié a été présentée. Une étude expérimentale réalisée en laboratoire en régime permanent et en conditions d'ensoleillement contrôlées sous un banc d'ensoleillement artificiel a permis de valider le modèle numérique. Les écarts absolus obtenus entre les valeurs mesurées et les valeurs mesurées sont compris entre 0,4 °C et 1,3 °C dans les conditions d'étude imposées, et sont donc acceptables. Ces écarts sont dus principalement à la non- uniformité du champ d'irradiation à la surface du module PV.

En perspective de ce travail, des simulations seront réalisées à partir du modèle numérique obtenu afin d'observer le comportement thermique du composant en phase d'intégration à la toiture d'un bâtiment tertiaire.

Références

- [1] J. C. Hollick, Solar cogeneration panels, *Renewable Energy*, (1998), 195-200.
- [2] A. A. Hegazy, Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors, *Energy Conversion and management*, (2000), 861-881.
- [3] A. Tiwari, M. S. Sodha, A. Chandra, et al., Performance evaluation of photovoltaic / thermal solar air collector for composite climate of India, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, (2006), 175-189.
- [4] T. T. Chow, Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model, *Solar Energy*, (2003), 143-152.
- [5] Y.B. Assoa, C. Menezo, G. Fraisse, et al., Study of a new concept of photovoltaic-thermal hybrid collector, *Solar Energy*, (2007), 1132-1143.
- [6] E. Amy De La Breteque, Etude du comportement thermique de modules photovoltaïques en vue de la prédiction de leur production électrique sur site, *Thèse de doctorat*, (Université de Provence, Institut des systèmes thermiques industriels, France, 2006).

Remerciements

Ce travail est basé sur un projet de recherche soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et mené en collaboration avec PHOTOWATT, CIAT, ALDES, le COSTIC et l'AFPA.