

Echanges thermiques dans un capteur solaire hybride avec concentrateur holographique

O. Iurevych^{1,2*}, S. Gubin², P. Guibert^{1†} et M. Dudeck¹

¹ Institut Jean le Rond d'Alembert, Université Pierre et Marie Curie
4 Place Jussieu, 75005 Paris / 2 Place de la Gare de Ceinture, 78210 Saint Cyr l'Ecole, France

² National Aerospace University 'Kharkiv Aviation Institute'
17, Tchkalova st, Kharkiv, 61070, Ukraine

(reçu le 07 Décembre 2013 – accepté le 30 Mars 2014)

Résumé - Les propriétés d'un capteur solaire hybride plan (thermique et électrique) avec concentrateur holographique du rayonnement solaire sont modélisées. L'état thermique stationnaire du capteur solaire a été calculé en utilisant une approche à une dimension 1D ou quasi-1D. Les propriétés des éléments constituant le capteur sont introduites, et des échanges convectifs avec l'air ambiant sont pris en compte. La température des différents éléments du capteur a été calculée pour différentes intensités du rayonnement solaire et pour différentes températures ambiantes.

Abstract - The properties of a hybrid solar collector plane (thermal and electrical) with holographic concentrator solar radiation are modeled. The stationary thermal state of the solar collector has been calculated using an approach to a dimension 1D or quasi-1D. The properties of the components of the collector are fed, and a convective exchange with the ambient air is taken into account. The temperature of the various elements of the collector was calculated for different intensities of solar radiation and for different ambient temperatures.

Mots-clés: Energie solaire - Panneau photovoltaïque - Panneau thermique - Concentrateur holographique.

1. INTRODUCTION

Le papier propose de modéliser les échanges thermiques dans un capteur solaire hybride (photovoltaïque, thermique) avec un concentrateur holographique. Ce capteur permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire en disposant à la fois d'une source d'énergie électrique et d'une circulation d'un fluide caloporteur. A partir d'une modélisation par sous-systèmes de l'état thermique stationnaire, les caractéristiques du fonctionnement du capteur ont été calculées en fonction de facteurs extérieurs variables, tels que la température de l'environnement et la quantité de rayonnement solaire reçue par la surface du capteur [1, 2].

Il existe actuellement d'autres solutions techniques de panneaux solaires hybrides. Les capteurs hybrides à double-peau photovoltaïque, qui sont des systèmes photovoltaïques (PV) intégrés à un bâtiment, réalisent une production locale d'électricité et produisent un refroidissement ou un chauffage par convection naturelle ou forcée [3]. Les panneaux solaires hybrides dans lesquels les cellules photovoltaïques sont disposées sur la même face à côté des capteurs thermiques [4].

Dans cet article est présentée une modélisation thermique détaillée du capteur solaire hybride avec concentrateur holographique afin de déterminer en régime stationnaire la

* olena.iurevych@etu.upmc.fr , gubinsv@d4.khai.edu

† philippe.guibert@upmc.fr , dudeck@dalembert.upmc.fr

température de ses différents éléments et de permettre une optimisation du fonctionnement de l'installation.

2. LE CAPTEUR HYBRIDE

Le capteur solaire hybride utilise une séparation spectrale du flux solaire suivant la gamme de longueur d'onde utilisée par la partie photovoltaïque grâce à un concentrateur holographique. Des filtres holographiques sont déjà utilisés pour des applications solaires en utilisant trois gammes spectrales du rayonnement (gammes du vert, du bleu et du rouge). Des adaptations sont introduites en fonction du spectre de fonctionnement de la cellule photovoltaïque utilisée [5].

Dans le capteur solaire hybride étudié, un guide d'onde permet une réflexion multiple transmettant le flux réémis (dans la gamme du visible) par un concentrateur placé entre deux feuilles de polycarbonate. Le flux réémis est dirigé vers les cellules photovoltaïques [6]. Les feuilles holographiques et les cellules photovoltaïques sont réparties de manière à former un damier (Fig. 1). La partie infra-rouge du spectre solaire est transmise directement sur l'absorbeur, après avoir traversé la feuille holographique. Ce système permet de diminuer la température des cellules photovoltaïques afin d'augmenter leur rendement.

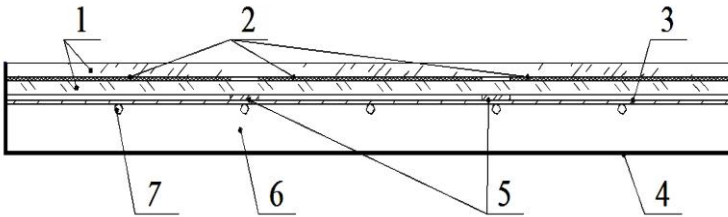


Fig. 1: Capteur solaire hybride 1, Polycarbonate monolithe 2, Concentrateur d'énergie solaire: feuille holographique 3, Absorbeur 4, Boîtier 5, Cellules photovoltaïques 6, Calorifugeage 7, Tube de cuivre pour fluide caloporteur

3. MODELISATION THERMIQUE DU CAPTEUR HYBRIDE

Les propriétés thermiques du capteur hybride ont été étudiées en considérant une description stationnaire monodimensionnelle 1D suivant la normale à la surface du capteur. L'étude du régime transitoire fera l'objet d'une étude ultérieure. Cette modélisation repose sur des hypothèses simplificatrices en particulier sur les échanges d'énergie entre les éléments constitutifs du capteur, cependant les résultats donnent des indications sur les voies d'amélioration possible et sur les caractéristiques attendues. Une validation expérimentale est engagée, elle est indispensable pour valider les hypothèses et les résultats de la modélisation.

L'air ambiant étant à une température T_a différente de la température T_1 de la surface du capteur, le flux d'énergie échangé par convection par unité de surface est:

$$q_0 = h \times (T_a - T_1) \quad (1)$$

où h est un coefficient d'échange.

Le flux solaire incident E_s traverse une première feuille de polycarbonate d'épaisseur e_1 et avec un facteur d'absorption η_1 constant. Le polycarbonate présente des avantages par rapport au verre, il a une excellente résistance aux chocs et il est deux

fois moins lourd que le verre. Dans la première feuille de polycarbonate, le bilan thermique au contact air-polycarbonate s'écrit en admettant que le coefficient de conduction thermique est constant et que les pertes thermiques latérales sont négligeables en raison de la faible épaisseur.

$$h \times (T_a - T_1) = -\lambda_1 \times \left(\frac{T_2 - T_1}{e_1} + \frac{P_{ab1}}{2 \times \lambda_1} \times e_1 \right) \quad (2)$$

où P_{ab1} est un paramètre défini par $P_{ab1} = \frac{E_s \times (1 - \eta_1)}{A}$ et η_1 est le facteur d'absorption du rayonnement solaire en volume dans la première feuille de polycarbonate.

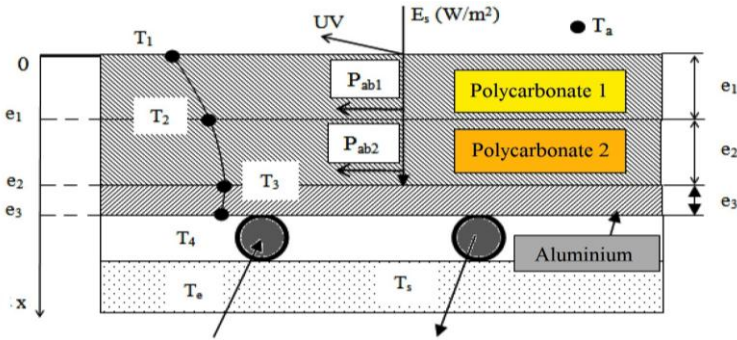


Fig. 2: Schéma du capteur hybride

Entre cette première plaque de polycarbonate et une seconde plaque de polycarbonate est placée une feuille holographique dont on suppose qu'elle s'équilibre thermiquement à la température T_2 . Dans cette seconde plaque de polycarbonate d'épaisseur e_2 dont les paramètres thermiques sont les mêmes que pour la première plaque, la température passe de T_2 à T_3 . Il y a conservation du flux de chaleur à la jonction entre les deux plaques de polycarbonate, d'où :

$$-\lambda_1 \times \left(\frac{T_2 - T_1}{e_1} + \frac{P_{ab1}}{2 \times \lambda_1} \times e_1 \right) = -\lambda_2 \times \left(\frac{T_3 - T_2}{e_2} + \frac{P_{ab2}}{2 \times \lambda_2} \times e_2 \right) \quad (3)$$

où P_{ab2} est un paramètre défini par $P_{ab2} = \frac{E_s \times (1 - \eta_2)}{A}$ et η_2 est le facteur d'absorption du rayonnement solaire en volume dans la deuxième feuille de polycarbonate.

Après la seconde feuille en polycarbonate se trouve une plaque d'aluminium d'épaisseur e_3 dont la température passe de T_3 à T_4 .

$$-\lambda_2 \times \left(\frac{T_3 - T_2}{e_2} + \frac{P_{ab2}}{2 \times \lambda_2} \times e_2 \right) + E_s = \frac{\lambda_3}{e_3} \times (T_3 - T_4) \quad (4)$$

Au-dessus de la plaque d'aluminium est placé le capteur photovoltaïque dont on admet que la température est la température T_3 de jonction entre la deuxième feuille de polycarbonate et celle d'aluminium. La puissance rayonnée par le soleil arrive sur la

plaque d'aluminium avec une puissance de 728 W/m². On ne tient pas compte dans cette première description, de la dissipation thermique dans les cellules solaires [7].

Sous la plaque d'aluminium est placé l'échangeur thermique qui est constitué par une conduite cylindrique parcourue par un fluide caloporteur de capacité calorifique massique constante C_{eau} , de masse volumique ρ et avec un débit massique \dot{m} . Le fluide caloporteur pénètre dans l'échangeur thermique avec une température T_e et en ressort avec une température T_s . Un bilan d'énergie pour le fluide caloporteur est écrit en considérant une circulation dans un tube de diamètre D et de longueur L_{eau} . Le coefficient d'échange surfacique constant est noté h_e . Ce bilan permet d'exprimer la température de sortie sous la forme suivante en admettant que la température ne dépend que de la distance parcourue par le fluide (coordonnée z).

$$T_s = T_4 \times (1 - e^{-\alpha L_{\text{eau}}}) + T_e \times e^{-\alpha L_{\text{eau}}} \quad (5)$$

$$\text{Où, } \alpha = \frac{\pi \times D \times h_e}{\dot{m} \times c_{\text{eau}}}$$

La puissance transmise par la face inférieure de la plaque en aluminium est supposée entièrement transmise au fluide caloporteur ce qui se traduit par la relation:

$$q_3 \times A = \int_0^{L_{\text{eau}}} h_e \times (T_4 - T) \times \pi \times D \times dz \quad (6)$$

$$T_3 - T_4 = \left(\frac{h_e \times \pi \times D \times e_e}{\lambda_3 \times A} \times \frac{1}{\alpha} \right) \times (1 - e^{-\alpha \times L_{\text{eau}}}) \times (T_4 - T)$$

La face située au-dessous du capteur solaire est supposée parfaitement adiabatique. L'ensemble des équations précédentes permet d'exprimer les températures T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_s en fonction de l'énergie solaire incidente E_s , des températures T_a , T_e , des épaisseurs e_1 , e_2 , e_3 , des paramètres thermiques h , λ_1 , λ_2 , λ_3 , h_e et des caractéristiques de l'écoulement du fluide caloporteur c_{eau} , ρ , \dot{m} , L_{eau} .

Tableau 1: Propriétés du polycarbonate de l'aluminium et du fluide caloporteur

	c , kJ/kg.K	ρ , kg/m ³	λ , W/m.K	Epaisseur, m
Polycarbonate	1.26	1200	0.2	0.03
Aluminium	0.93	2698	237	0.02
Fluide Calo. (Eau)	4185	1000	0.6	

Tableau 2: Etude paramétrique

m_{eau} , (g/s)	0.5	1.26	10
h_e , (W/m ² .K)	300	300	300
E_s , (W/m ²)	1000	1000	1000
L_{eau} , (m)	0...5.5	0...5.5	0...5.5
c_{eau} , (kJ/kg.K)	4185	4185	4185
η_l	0.9	0.9	0.9
T_e , (°C)	100	10	10

La figure 3 présente les températures T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_s calculées pour une densité de flux solaire comprise entre 200 et 1000 W/m^2 et pour un coefficient d'échange convectif $h=10 W/m^2.K$, une température ambiante T_a de 25°C et une température d'entrée du fluide caloporteur T_c de 10°C. Le capteur solaire est de forme carrée avec $L_{eau} = 5,5 m$. Les températures calculées varient linéairement en fonction de la densité E_s de flux solaire. La température T_1 de surface est comprise entre 31°C et 75°C et la température T_s de sortie entre 33°C et 87°C.

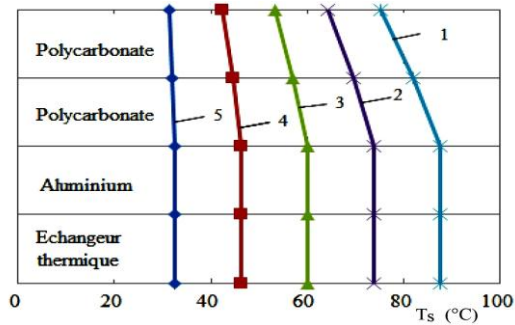


Fig. 3: Températures dans le capteur en fonction de la densité de flux solaire
 1: $E_s = 1000 W/m^2$; 2: $E_s = 800 W/m^2$; 3: $E_s = 600 W/m^2$; 4: $E_s = 400 W/m^2$; 5: $E_s = 200 W/m^2$

La figure 4 présente les températures pour une densité de flux solaire fixée à 1000 W/m^2 et pour une température ambiante T_a variant entre 5°C et 25°C. Les températures calculées varient linéairement en fonction de la température ambiante T_a . La température T_1 de surface est comprise entre 61°C et 75°C et la température T_s de sortie entre 75°C et 87°C.

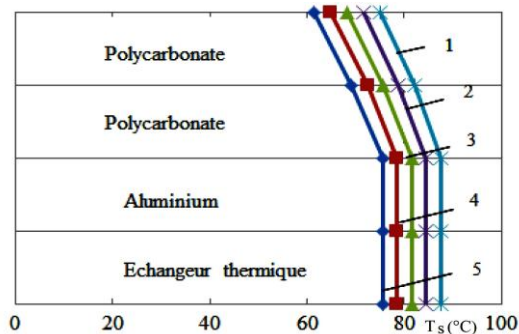


Fig. 4: Températures dans le capteur en fonction de la température ambiante
 1: $T_a = 25^\circ C$; 2: $T_a = 20^\circ C$; 3: $T_a = 15^\circ C$; 4: $T_a = 10^\circ C$; 5: $T_a = 5^\circ C$

Les figures 5 et 6 présentent la température de sortie du fluide caloporteur en fonction de la densité de flux solaire incident E_s et de la température ambiante T_a .

L'augmentation du flux solaire et de la température ambiante accroissent la température de sortie du fluide, ce qui augmente le rendement thermique du capteur solaire hybride (Fig. 5).

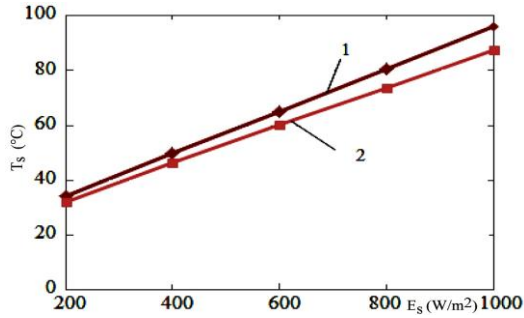


Fig. 5: Températures de sortie du fluide caloporteur en fonction de la densité de flux solaire E_s pour $T_a = 25^\circ\text{C}$, 1 – sans absorption, 2 – avec absorption

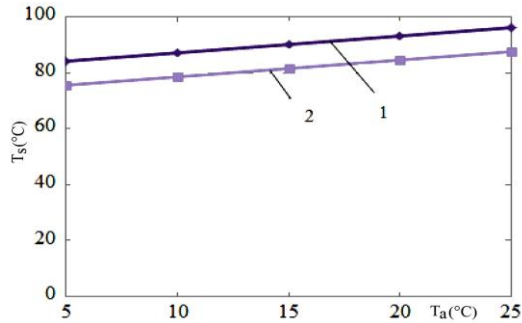


Fig. 6: Températures de sortie du fluide caloporteur en fonction de la température ambiante T_a pour $E_s = 1000 \text{ W/m}^2$, 1 – sans absorption, 2 – avec absorption

La figure 7 présente la température de jonction entre les plaques de polycarbonate et d'aluminium en fonction de longueur L_{eau} du tube de l'échangeur thermique. La diminution de la longueur L_{eau} du circuit d'échange thermique augmente la température T_3 de surface externe du capteur ce qui est imposé par le bilan thermique global du capteur en régime stationnaire. L'augmentation de cette longueur conduit à une diminution de la température T_1 et de la température T_3 de la jonction où se trouvent placées les cellules photovoltaïques, ce qui augmente le rendement de conversion électrique.

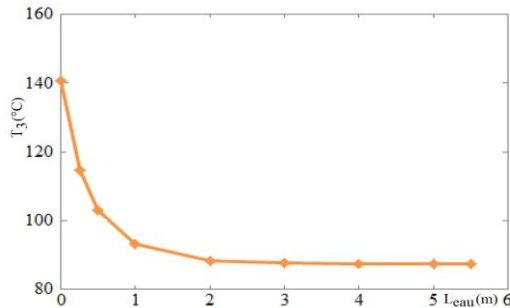


Fig. 7: Température de jonction T_3 entre les plaques de polycarbonate et d'aluminium en fonction de longueur L_{eau} du tube parcouru par le fluide caloporteur

La figure 8 présente la température de sortie du fluide caloporteur en fonction de longueur L_{eau} du tube de l'échangeur thermique pour différentes valeurs du débit massique. La température maximale de sortie passe de 29°C à 112°C pour un débit variant entre 0,5 g/s et 10 g/s.

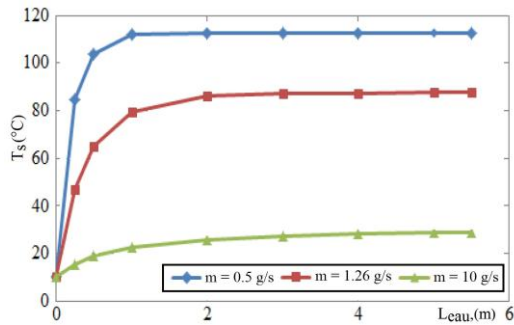


Fig. 8: Température de sortie du fluide caloporteur en fonction de longueur L_{eau} du tube parcouru par le fluide caloporteur pour différents débits massiques

4. CONCLUSION

Les températures des différents éléments d'un capteur solaire hybride avec concentrateur ont été calculées pour un régime thermique établi et pour différentes valeurs du flux solaire incident et de la température de l'air ambiant. Sans pertes latérales, avec absorption dans le polycarbonate et sans dissipation dans les cellules photovoltaïques, la température de sortie du fluide caloporteur est de l'ordre de 90°C pour une puissance rayonnée incidente de 1000 W/m² et une température ambiante de l'air de 25°C, ce qui donne la valeur maximale atteignable par ce type de configuration géométrique.

Afin de se rapprocher des conditions réelles de fonctionnement d'un capteur hybride, la modélisation sera complétée en prenant en compte les pertes latérales du capteur hybride et une énergie dissipée dans les cellules photovoltaïques, ce qui supposera la division du rayonnement solaire en deux domaines spectraux (principe de fonctionnement des feuilles holographiques): domaine du visible pour les cellules photovoltaïques et domaine de l'infrarouge pour l'échangeur thermique.

La modélisation sera complétée en introduisant ces différents effets afin de se rapprocher des conditions réelles de fonctionnement du capteur hybride avec concentrateur, de manière à trouver les caractéristiques optimales de fonctionnement.

NOMENCLATURE

A : Surface du capteur hybride, (m ²)	E_s : Flux solaire incident, (W/m ²)
c_{eau} : Capacité calorifique du fluide caloporteur, (kJ/kg.K)	h : Coefficient d'échange avec l'air ambiant, (W/m ² .K)
e_j : Epaisseur, (m)	D : Diamètre de tube, (m)
L : Largeur du capteur, (m)	L_{eau} : Longueur de tube caloporteur, (m)
P_{ab} : Paramètre d'absorption	q_i : Densité de flux de chaleur, (W/m ²)

T_j : température de contact, (°C)	T_a : Température ambiante, (°C)
T_e : Température d'entrée du fluide caloporteur, (°C)	T_s : Température de sortie du fluide caloporteur, (°C)
\dot{m} : Débit massique du fluide caloporteur, (kg/s)	η : Facteur d'absorption dans le polycarbonate
λ_j : Conductivité thermique, (W/m.K)	ρ : Masse volumique, (kg/m ³)
j = 1: Contact air-polycarbonate	j = 3: Contact polycarbonate-aluminium
j = 2: Contact polycarbonate-polycarbonate	j = 4: Contact photovoltaïque-aluminium

REFERENCES

- [1] O. Iurevych et S. Gubin, 'Installation Solaire Hybride', Brevet d'Ukraine N° 98680, Juin 2012.
- [2] O. Iurevych, S. Gubin and M. Dudeck, 'Combined Receiver of Solar Radiation with Holographic Planar Concentrator', IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Physics, Vol. 29, 2012.
- [3] S. Saadon, L. Gaillard, S. Giroux, H. Pabiou et C. Menezo, 'Modélisation d'une Double-Peau Photovoltaïque Ventilée', Congrès Français de Thermique, Gérardmer, France, p.128, 28-31 Mai 2013
- [4] The Dualsun website. [Online]. Available: <http://www.dualsun.fr/>
- [5] Glenn A. Rosenberg, 'Device for Concentrating Optical Radiation', U.S. Patent 5 877 874, March 2, 1999.
- [6] O. Iurevych and S. Gubin, 'Application of Holographic Concentrator of Solar Radiation in Hybrid Solar Receiver', Aerospace technical and technology, Vol. 89, N°2, pp. 44 – 49, 2012.
- [7] O. Iurevych, S. Gubin and M. Dudeck, 'Modeling of a Hybride Solar Panel with Solar Concentration', Electrical Engineering Research, EER, Vol. 1, N°2, pp. 35 – 41, 2013.
- [8] O. Iurevych, S. Gubin, M. Dudeck et D. Vacher, 'Couverture de Protection d'un Panneau Solaire Hybride avec un Concentrateur Holographique', (en ukrainien), XV International Youth Scientific and Practical Conference Human and Space, 10-12 April 2013, Dnipropetrovsk, Ukraine