

Echanges thermiques dans un capteur solaire hybride avec concentrateur holographique

Olena IUREVYCH^{#1}, Sergii GUBIN^{*2}, Philippe GUIBERT^{#3}, Michel DUDECK^{#4}

[#]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

¹olena.iurevych@etu.upmc.fr

³philippe.guibert@upmc.fr

⁴dudeck@dalembert.upmc.fr

^{*}National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

17, Tchkalova st, Kharkiv, 61070, Ukraine

²gubinsv@d4.khai.edu

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.

Keywords— énergie solaire, panneau photovoltaïque, panneau thermique, concentrateur holographique

I. NOMENCLATURE

A	surface du capteur hybride, (m ²)
c_{eau}	capacité calorifique du fluide caloporteur, (kJ/kg.K)
e_j	épaisseur, (m)
E_s	flux solaire incident, (W/m ²)
D	diamètre de tube (m)
h	coefficient d'échange avec l'air ambiant, (W/m ² .K)
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	températures 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)

Symboles grecs

\dot{m}	débit massique du fluide caloporteur, (kg/s)
λ_j	conductivité thermique, (W/m.K)
ρ	masse volumique, (kg/m ³)
η	facteur d'absorption dans le polycarbonate

Indices

- j = 1 : contact air-polycarbonate
- j = 2 : contact polycarbonate-polycarbonate
- j = 3 : contact polycarbonate-aluminium
- j = 4 : contact photovoltaïque-aluminium

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

III. 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 (gamme 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.

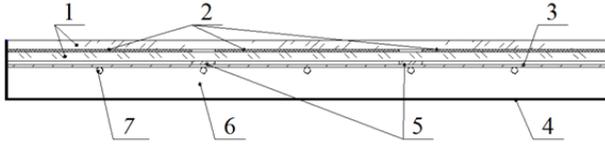


Fig. 1 Capteur solaire hybride 1. Polycarbonate monolithe 2. Concentrateur d'énergie solaire : feuille holographique 3. Absorbeur 4. Boîtier 5. Cellules photovoltaïques 6. Calorifugeage 7. Tube de cuivre pour le fluide caloporteur

IV. 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

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

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 :

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

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

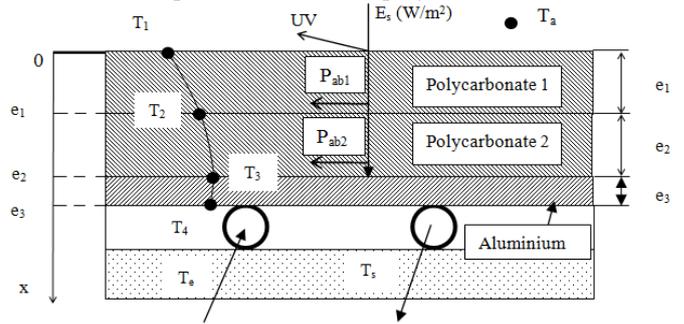


Fig. 2 Schéma du capteur hybride

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 :

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

où P_{ab2} est un paramètre défini par $P_{ab2} = \frac{E_s \cdot (1 - \eta_2)}{A}$ 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 .

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

Au-dessus de la plaque d'aluminium est placée 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/m^2 . On ne tient pas compte dans cette première description de la dissipation thermique dans les cellules photovoltaïques [7].

Sous la plaque d'aluminium est placée 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) :

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

$$\text{où } \alpha = \frac{\pi D h_e}{\dot{m} c_{eau}}$$

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 :

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

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

La face située en 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 $h, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, h_e$ et des caractéristiques de l'écoulement du fluide caloporteur $c_{eau}, \rho, \dot{m}, L_{eau}$.

TABLE I
PROPRIETES DU POLYCARBONATE, DE L'ALUMINIUM ET DU FLUIDE CALOPORTEUR

	c kJ/kg.K	ρ kg/m ³	λ W/m.K	Epaisseurs m
Polycarbonate	1,26	1200	0,2	0,03
Aluminium	0,93	2698	237	0,02
Fluide caloporteur (eau)	4185	1000	0,6	

TABLE III
ETUDE PARAMETRIQUE

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_1	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/m² et pour un coefficient d'échange convectif $h = 10$ W/m².K, une température ambiante T_a de 25°C et une température d'entrée du fluide caloporteur T_e 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.

La figure 4 présente les températures pour une densité de flux solaire fixée à 1000 W/m² 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.

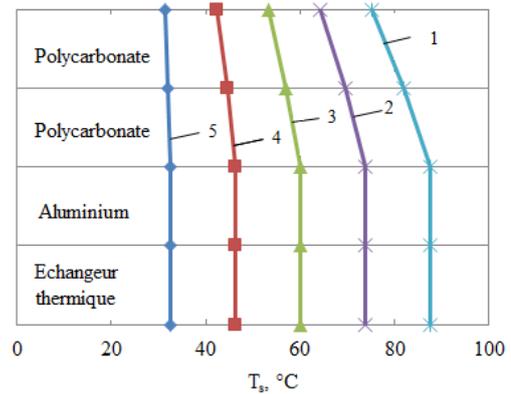


Fig. 3 Températures dans le capteur en fonction de la densité de flux solaire 1 : $E_s = 1000$ W/m² ; 2 : $E_s = 800$ W/m² ; 3 : $E_s = 600$ W/m² ; 4 : $E_s = 400$ W/m² ; 5 : $E_s = 200$ W/m²

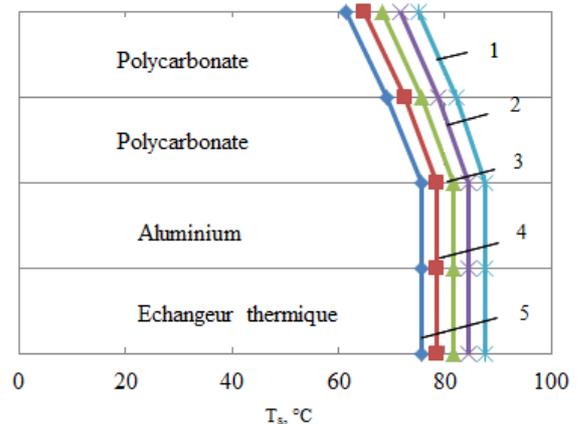


Fig. 4 Températures dans le capteur en fonction de la température ambiante 1 : $T_a = 25^\circ\text{C}$, 2 : $T_a = 20^\circ\text{C}$, 3 : $T_a = 15^\circ\text{C}$, 4 : $T_a = 10^\circ\text{C}$, 5 : $T_a = 5^\circ\text{C}$

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 .

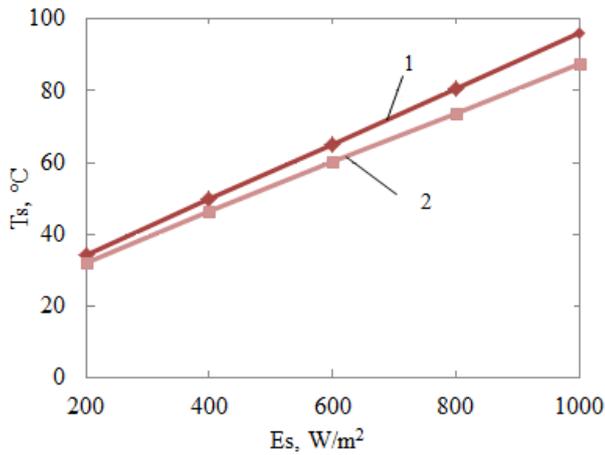


Fig. 5 Températures de sortie du fluide caloporteur en fonction de la densité de flux solaire E_s pour $T_a = 25^{\circ}C$, 1 – sans absorption, 2 – avec absorption

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).

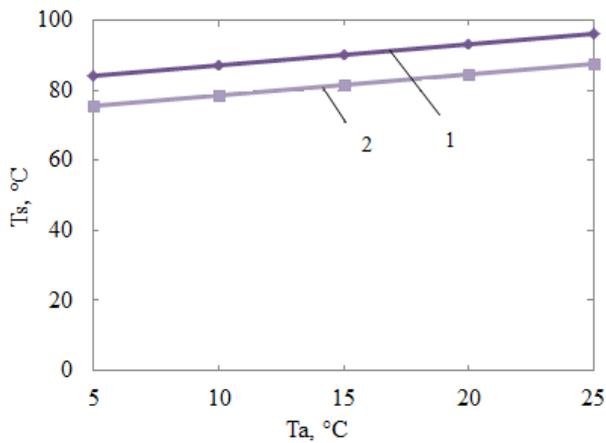


Fig. 6 Températures de sortie du fluide caloporteur en fonction de la température ambiante T_a pour $E_s = 1000 W/m^2$, 1 – sans absorption, 2 – avec absorption

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 que augmente le rendement de conversion électrique.

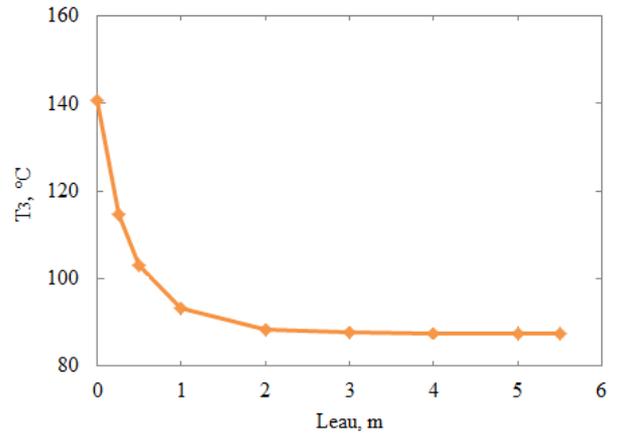


Fig. 7 Température de jonction T_3 entre les plaques de polycarbonate et d'aluminium en fonction de longueur L_{eau} du tube parcouru par le fluide caloporteur

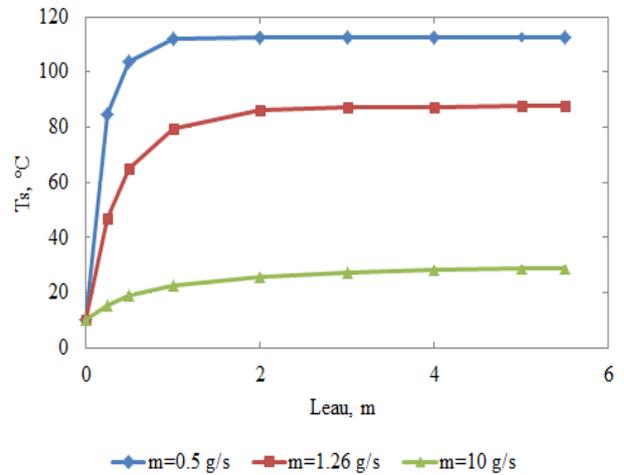


Fig. 8 Température de sortie du fluide caloporteur en fonction de longueur L_{eau} du tube parcouru par le fluide caloporteur pour différents débits massiques

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 $29^{\circ}C$ à $112^{\circ}C$ pour un débit variant entre $0,5$ g/s et 10 g/s.

V. CONCLUSIONS

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 $90^{\circ}C$ pour une

puissance rayonnée incidente de 1000 W/m^2 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.

REFERENCES

- [1] O. Iurevych, S. Gubin, "Installation solaire hybride," Brevet d'Ukraine 98680, 11 juin 2012.
- [2] O. Iurevych, S. Gubin, M. Dudeck, Combined receiver of solar radiation with holographic planar concentrator, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Physics 29 (2012) 012016.
- [3] S.Saadon, C. Menezo, S. Giroux, H. Pabiou, Modélisation d'une double-peau photovoltaïque ventilée, Congrès Français de Thermique, Gérardmer, France, 28-31 mai 2013, p.128
- [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, S. Gubin, "Application of holographic concentrator of solar radiation in hybrid solar receiver," ISSN 1727-7337, *Aerospace technic and technology*, № 2 (89), pp. 44 – 49, 2012.
- [7] O. Iurevych, S. Gubin, M. Dudeck, "Modeling of a Hybride Solar Panel with Solar Concentation," *EER Electrical Engineering Research*, vol. 1, No. 2, pp. 35 – 41, Apr. 2013.
- [8] O. Iurevych, S. Gubin, M. Dudeck, 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