

Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire hybride avec concentrateur holographique

Olena IUREVYCH^{1,2*}, Sergii GUBIN², Philippe GUIBERT¹, Michel DUDECK¹

¹ Institut Jean le Rond d'Alembert, Université Pierre et Marie Curie, CNRS

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

*(auteur correspondant : olena.iurevych@etu.upmc.fr)

Résumé - Les échanges thermiques d'un capteur solaire hybride plan avec un concentrateur holographique sont présentés. La modélisation thermique est monodimensionnelle et décrit un régime de fonctionnement stationnaire. Le système d'équations obtenu permettra de calculer la température des éléments du capteur pour différentes valeurs du flux solaire incident, de la température de l'air ambiant et des coefficients d'échange. L'objectif est de proposer les premiers éléments de modélisation d'un capteur solaire hybride à concentration et d'estimer les efficacités d'un tel système à plus long terme pour des conditions climatiques réelles.

Nomenclature

c_p	Capacité calorifique, kJ/kg.K	ε_i	Coefficient d'émissivité
D	Diamètre du tube, m	η	Rendement de cellule photovoltaïque
e_i	Épaisseur, m	τ_{ij}	Coefficient de transmission
E_s	Flux solaire incident, W/m ²	ρ_{ij}	Coefficient de réflexion
h_{a1}	Coefficient d'échange avec l'air ambiant, W/m ² .K	ρ	Masse volumique, kg/m ³
L_{eau}	Longueur du tube, m	α_{ij}	Coefficient d'absorption
h_e	Coefficient d'échange du fluide caloporteur, W/m ² .K	ρ_{ij}	Coefficient de réflexion
P_1^{abs}	Absorption, W/m ³	λ_i	Conductivité thermique, W/m.K
P_{elec}	Puissance électrique, W	<i>Indices</i>	
S	Surface du capteur hybride, m ²	h	Hologramme
S_{PV}	Surface des cellules photovoltaïques, m ²	a	Conditions ambiantes
S_h	Surface de l'hologramme, m ²	s	Irradiance du soleil
T_k	Températures de contact, K	al	Aluminium
T_a	Température ambiante, K	PV_1	Surface supérieure capteur PV
T_e	Température d'entrée du fluide caloporteur, K	PV_2	Surface inférieure capteur PV
T_s	Température de sortie du fluide caloporteur, K	$k = 1$	contact air-polycarbonate
\dot{m}	Débit massique du fluide caloporteur, kg/s	$k = 2$	contact polycarbonate-polycarbonate
R_h	Rapport des surfaces S_h/S	$k = 3$	contact polycarbonate-aluminium
		$k = 4$	contact photovoltaïque-aluminium
		e	Eau

Symboles grecs

1. Introduction

Les capteurs solaires intégrés photovoltaïques-thermiques présentent un très fort potentiel dans de très nombreuses applications. La recherche sur ce thème constitue une branche importante des efforts consentis sur l'optimisation des capteurs à la base de convertisseur photovoltaïque. La combinaison des deux technologies offre la possibilité d'une efficacité accrue par l'utilisation plus importante de l'énergie solaire incidente. De nombreuses configurations d'implantation des éléments (PV et réseau du fluide caloporteur) sont proposées dans la littérature [1]. Toutes ces propositions offrent des avantages évidents mais leurs optimisations restent encore un challenge tant sur les aspects énergétiques que sur leur intégration et leur utilisation à long terme dans des applications domestiques ou industrielles (applications dans les bâtiments, les transports, en système de production d'énergie autonome, dans l'agriculture, dans la réfrigération, dans les infrastructures ...). Les performances de ces

systèmes sont aussi largement fonction de la dynamique des conditions climatiques (irradiation solaire).

Lorsque l'on cherche encore à optimiser les capteurs solaires hybrides, on peut envisager de gérer le spectre solaire par bande spectrale. Il s'agit de combiner des cellules de « band gap » différentes dans une disposition en tandem ou multicouche [2,3,4]. La cellule multi jonction peut fournir en théorie des rendements très élevés.

La séparation spectrale peut être utilisée afin de mettre en adéquation les besoins des cellules PV et des capteurs thermiques. Enfin, lorsque la contrainte économique est forte, (coût des capteurs PV €/m²), la voie d'intégration de concentrateurs optiques apporte une touche finale à l'optimisation du système hybride [5,6,7]. Il convient toutefois de prendre en considération les problèmes de chute de rendement lorsque la température atteint des niveaux trop élevés.

Ainsi, une nouvelle famille de capteur hybride ou à « split spectral » a vu le jour. Il s'agit de capteur utilisant un film holographique. Le développement et la mise en œuvre de capteurs photovoltaïques à concentration (CPV) permet la réduction de la surface exposée des cellules PV (utilisation thermique possible de l'espace laissé libre) mais du même temps, la concentration apporte une meilleure efficacité du processus de conversion photovoltaïque. La concentration par « tracking » (lentilles, miroirs) peut être avantageusement remplacée par des films holographiques optiques (HCPV proposées pour la première fois dans les années 80) car ils offrent plusieurs avantages, un poids plus faible, leur coût et la polyvalence d'utilisation. Ils présentent deux principales caractéristiques qui affectent leur performance en tant que concentrateurs solaires: l'angle des rayons lumineux incidents et la sélectivité chromatique. En raison de la sélectivité chromatique, l'efficacité de diffraction des hologrammes dépend de la longueur d'onde, cela pourrait être un inconvénient car une gamme limitée du spectre est concentrée sur la cellule PV. Cette gamme spectrale peut être améliorée par multiplexage de plusieurs hologrammes (dans l'épaisseur du film holographique), chacun agissant sur une gamme spectrale spécifique. L'adaptation de la réponse des cellules photovoltaïques est alors optimale [8,9,10,11,12].

L'article présente le concept d'un capteur solaire thermique intégrant une feuille holographique ayant pour finalité la séparation du rayonnement solaire en fonction de sa longueur d'onde. Le rayonnement allant du visible au proche infra-rouge est dévié afin d'être introduit dans un guide d'onde qui le concentre vers des cellules photovoltaïques. Le rayonnement infra-rouge solaire traverse la feuille holographique et apporte son énergie à un fluide caloporteur. On dispose donc d'une source à la fois d'énergie électrique et d'énergie thermique permettant de limiter la température des cellules photovoltaïques et donc d'augmenter leur rendement [13,14,15,16].

Dans les paragraphes suivants, nous nous concentrerons principalement sur la modélisation des échanges thermiques en régime stationnaire. Le modèle proposé doit être appliqué pour différentes configurations et doit permettre d'extraire les profils de température des différents éléments du capteur. Enfin, il permettra de déterminer les rendements électrique et thermique en fonction des conditions d'utilisation. Un premier calcul a été effectué précédemment sans les effets radiatifs [13]. La modélisation présentée introduit les effets de réflexion, d'absorption et de transmission des différents éléments en polycarbonate.

2. Installation et technologie du capteur hybride avec concentrateur

Le capteur solaire hybride associe dans un même ensemble, un concentrateur holographique du rayonnement solaire, un panneau photovoltaïque et un échangeur thermique.

Le rayonnement solaire est reçu sur la surface d'une plaque plane en polycarbonate réfléchissant la partie UV du spectre solaire. 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. Le rayonnement traverse la première plaque en polycarbonate (figure 1) et arrive sur un film holographique (h). La partie visible et proche infra rouge du rayonnement solaire est réfléchiée et déviée par les éléments holographiques puis canalisée dans la première plaque en polycarbonate faisant office de guide d'onde avant d'arriver par réflexions multiples sur les cellules photovoltaïques (PV). Le concentrateur holographique est placé entre deux feuilles de polycarbonate. Les feuilles holographiques et les cellules photovoltaïques sont réparties de manière à former un damier. La partie infra rouge du spectre solaire traverse les éléments holographiques et son énergie est utilisée dans un échangeur thermique (3, absorbeur) permettant le chauffage d'un fluide caloporteur (4). La séparation en longueur d'onde réalisée par l'hologramme permet de diminuer la température des cellules photovoltaïques en dirigeant la partie infra-rouge vers l'absorbeur et donc d'augmenter leur rendement.

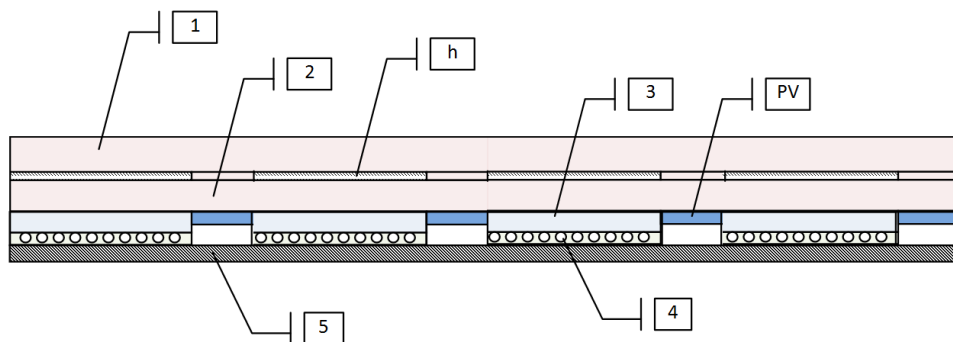


Figure 1: *Capteur solaire hybride, 1. Polycarbonate monolithe guide d'onde, 2. Polycarbonate monolithe, h. feuille holographique, 3. Absorbeur 4. Tube de cuivre pour le fluide caloporteur, PV. Cellules photovoltaïques 5. Calorifugeage.*

3. Modélisation thermique du capteur hybride

Les propriétés thermiques du capteur hybride ont été modélisées en considérant une description stationnaire (régime établi) monodimensionnelle 1D suivant la normale à la surface du capteur. Le régime transitoire fera l'objet d'une étude ultérieure. Son étude doit fournir les performances vraies par une adaptation optimale entre les conditions climatiques et l'utilisation du capteur. La modélisation présentée repose sur des hypothèses simplificatrices en particulier sur les échanges d'énergie entre les éléments constitutifs du capteur (hypothèse sur la prise en compte de l'ordre 1 des termes d'absorption et de réflexion). Les paragraphes suivants fournissent l'ensemble des équations pour chaque partie du capteur hybride qui seront utilisées dans le modèle global. Le système est décrit suivant un élément unitaire du capteur global (figure 2). Une description du système suivant l'épaisseur de chaque élément (coordonnées x) donne un profil de température dont les valeurs de parois sont rappelées sur la figure 2 ($T_1, T_2, T_3, T_4, T_{PV}$). Les termes d'absorption sont indiqués par un octogone. Les deux plaques du polycarbonate ont un profil de la température décrit par la formulation suivante :

$$T_i(x) = -\frac{P_i^{abs}}{2\lambda_i} x^2 + m_i x + n_i \quad (1)$$

L'absorbeur (aluminium), a quant à lui une écriture plus simple puisqu'il s'agit d'un corps gris, son profil thermique sera décrit par l'évolution :

$$T_{al}(x) = m_{al} x + n_{al} \quad (2)$$

Les expressions (1) et (2) sont obtenues par résolution de l'équation de la chaleur prenant en compte un terme d'absorption. Les m_i et n_i sont des constantes d'intégration qui sont déterminées par résolution des conditions aux limites d'interface. Enfin, on fait l'hypothèse que le capteur photovoltaïque possède une température constante et que l'hologramme ne possède aucune capacité calorifique.

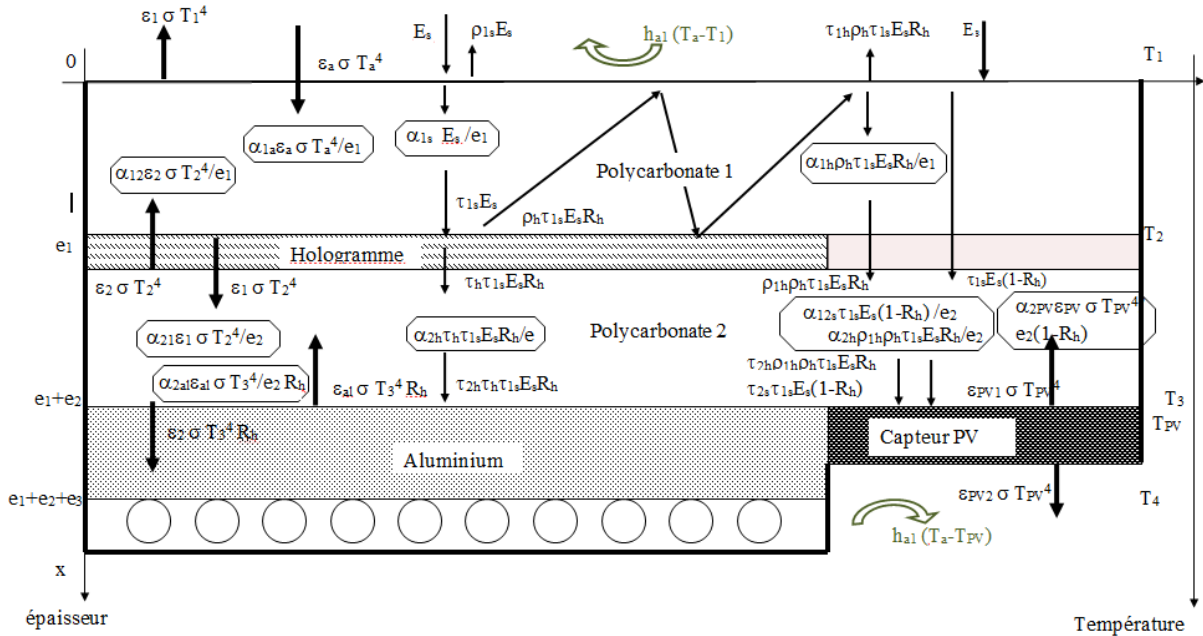


Figure 2 : Echanges radiatifs dans le capteur solaire hybride

3.1. Bilan thermique du polycarbonate 1

La plupart de l'énergie solaire incidente est absorbée par l'absorbeur 3 et le capteur photovoltaïque PV. Des coefficients d'absorption sont introduits à chaque niveau. Radiation et convection vont modifier le régime thermique des différentes couches. Le bilan d'énergie est écrit par sous système ainsi que les conditions aux limites de chaque contact.

L'air ambiant est à une température T_a constante, uniforme et différente de la température T_1 de la surface externe (en $x = 0$) du capteur. Le rayonnement émis par l'air ambiant s'exprime par $\varepsilon_a \sigma T_a^4$ où ε_a est le coefficient d'émissivité de l'atmosphère. Le flux convectif surfacique à la surface est donné par la relation $h_{a1} \cdot (T_a - T_1)$ où h_{a1} est un coefficient d'échange supposé constant.

La surface externe de la première feuille du polycarbonate (figure 2) rayonne vers l'atmosphère ambiante avec une puissance $\varepsilon_1 \sigma T_1^4$ où ε_1 est le coefficient d'émissivité du polycarbonate.

Une partie $\rho_{1s} E_s$ du flux solaire incident E_s est réfléchiée par la surface du polycarbonate. Le flux $E_s - \rho_{1s} E_s$ traverse la feuille du polycarbonate en étant partiellement absorbé. La puissance absorbée par unité de volume dans le polycarbonate 1 est $\alpha_{1s} E_s / e_1$ et la puissance transmise vers la face inférieure ($x = e_1$) et donc vers l'hologramme est $\tau_{1s} E_s$.

La partie visible de ce rayonnement est ensuite diffractée par l'hologramme et canalisée par le polycarbonate 1 qui joue le rôle de guide d'onde. A la traversée du polycarbonate, ce

rayonnement est partiellement absorbé en volume. La puissance absorbée est $\alpha_{1s}\rho_h\tau_{1s}E_sS_h/Se_1$ par unité de surface du capteur solaire (l'hologramme est de surface S_h et le capteur de surface S). Le coefficient ρ_h intègre les réflexions multiples du guide d'onde

La surface en $x = e_1$ du polycarbonate 1 rayonne la puissance $\varepsilon_1\sigma T_2^4$ vers le polycarbonate 2 et la surface en $x = e_1$ du polycarbonate 2 rayonne vers le polycarbonate 1 la puissance $\varepsilon_2\sigma T_2^4$ qui est absorbée en volume dans le polycarbonate 1.

L'équation de la chaleur dans le polycarbonate 1 permet de déterminer le flux de chaleur par conduction arrivant en $x = 0$ et d'en déduire la relation suivante correspondant à une condition à la limite de flux :

$$-\lambda_1 m_1 = h_{al} \cdot (T_a - T_1) - \varepsilon_1 \sigma T_1^4 \quad (3)$$

où $-\lambda_1 m_1$ représente le flux de chaleur en $x = 0$.

L'absorption totale est donnée par :

$$P_1^{abs} = (\alpha_{1s} E_s + \alpha_{1a} \varepsilon_a \sigma T_a^4 + \alpha_{1h} \rho_h \tau_{1s} E_s S_h / S + \alpha_{12} \varepsilon_2 \sigma T_2^4) / e_1$$

La relation (1) relie les températures T_1 et T_2 . On note aussi que $\alpha_{1s} + \rho_{1s} + \tau_{1s} = 1$

3.2. Bilan thermique du polycarbonate 2

La plaque du polycarbonate 2 (figure 2) est placée sous l'hologramme en $x = e_1$ et en contact avec la plaque d'aluminium en $x = e_1 + e_2$ sur une surface S_{al} . Elle est aussi en contact avec les cellules photovoltaïques sur une surface $S_{PV} = S - S_{al}$. La modélisation simplifiée utilisée considère deux parties distinctes du polycarbonate 2, notées respectivement polycarbonate 2a en contact avec la plaque en aluminium et polycarbonate 2b en contact avec les cellules photovoltaïques.

3.2.1. Polycarbonate 2a

La température de la surface externe du polycarbonate 2a (en $x = e_1$) est T_2 . La puissance du rayonnement émis par la surface externe de la deuxième plaque du polycarbonate (figure 2) vers le polycarbonate 1 est $\varepsilon_2\sigma T_2^4$ où ε_2 est le coefficient d'émissivité du polycarbonate. La surface en $x = e_1$ du polycarbonate 1 rayonne la puissance $\varepsilon_1\sigma T_2^4$ vers le polycarbonate 2a et ce rayonnement est partiellement absorbé par unité de volume dans le polycarbonate 2a, la puissance absorbée est $\alpha_{21}\varepsilon_1\sigma T_2^4/e_2$. La puissance rayonnée par la surface externe d'aluminium en $x = e_1 + e_2$ vers le polycarbonate 2a est $\varepsilon_{al}\sigma T_3^4$. La température de la surface d'aluminium en $x = e_1 + e_2$ est notée T_3 . Cette puissance est absorbée partiellement dans le polycarbonate 2a, elle vaut par unité de volume $\alpha_2 \varepsilon_{al} \sigma T_3^4 S_h / e_2 S$. La puissance lumineuse de la partie infrarouge du rayonnement solaire ayant traversée l'hologramme est $\tau_h \tau_{1s} E_s S_h / S$. En traversant le polycarbonate 2a, ce rayonnement est partiellement absorbé $\alpha_2 \tau_h \tau_{1s} E_s S_h / e_2 S$ dans le volume. Le polycarbonate 2a rayonne vers l'aluminium la puissance $\varepsilon_2 \sigma T_3^4 S_h / S$ ramenée à l'unité de surface du capteur solaire. L'équation de la chaleur dans le polycarbonate 2a permet de déterminer le flux de chaleur par conduction arrivant en $x = e_1$ en utilisant le bilan d'énergie,

$$-\lambda_1 \left(-\frac{P_1^{abs}}{\lambda_1} e_1 + m_1 \right) - \lambda_2 \left(-\frac{P_{2a}^{abs}}{\lambda_2} e_1 + m_2 \right) - \varepsilon_2 \sigma T_2^4 + \varepsilon_1 \sigma T_2^4 - \varepsilon_2 \sigma T_3^4 \frac{S_h}{S} = 0 \quad (4)$$

avec $P_{2a}^{abs} = (\alpha_{21}\varepsilon_1\sigma T_2^4 + \alpha_{2al}\varepsilon_{al}\sigma T_3^4 S_h / S + \alpha_{2h}\tau_h\tau_{1s}E_s S_h / S) / e_2$.

La relation (2) relie les températures T_1 , T_2 et T_3 .

3.2.2. Polycarbonate 2b

La température de la surface externe du polycarbonate 2b (en $x = e_1$) est T_2 . Le rayonnement émis par la surface externe de la deuxième feuille du polycarbonate (figure 2) vers le polycarbonate 1 est de puissance $\varepsilon_2 \sigma T_2^4$ où ε_2 est le coefficient d'émissivité du polycarbonate. La surface en $x = e_1$ du polycarbonate 1 rayonne la puissance $\varepsilon_1 \sigma T_2^4$ vers le polycarbonate 2b et ce rayonnement est partiellement absorbé dans le volume dans le polycarbonate 2b avec la puissance $\alpha_{21} \sigma T_2^4 / e_2$. La surface externe de la cellule photovoltaïque en $x = e_1 + e_2$ émet un rayonnement vers polycarbonate 2b dont la puissance est $\varepsilon_{PV1} \sigma T_{PV}^4$. La température de la surface externe de la cellule photovoltaïque en $x = e_1 + e_2$ est T_{PV} . Cette puissance est absorbée partiellement dans le polycarbonate 2b par unité de volume, $\alpha_{2PV} \varepsilon_{PV1} \sigma T_{PV}^4 S_{PV} / S e_2$. La partie visible du rayonnement solaire re-émit par hologramme est $\rho_{1h} \rho_h \tau_{1s} E_s S_h / S$ et en traversant le polycarbonate 2b ce rayonnement est partiellement absorbé $\rho_{1h} \rho_h \alpha_{2h} E_s S_{PV} / S e_2$ dans le volume. Le polycarbonate 2b émet un rayonnement vers la cellule photovoltaïque dont la puissance est $\varepsilon_2 \sigma T_{PV}^4 S_{PV} / S$. Le rayonnement solaire qui arrive sur la surface du capteur, qui traverse le polycarbonate 1 et le polycarbonate 2b est partiellement absorbé dans le polycarbonate 2b avec la puissance $\alpha_{2s} \tau_{1s} E_s S_{PV} / S$.

L'équation de la chaleur dans le polycarbonate 2b permet de déterminer le flux de chaleur par conduction arrivant en $x = e_1$ et avec la relation du bilan d'énergie on obtient :

$$-\lambda_1 \left(-\frac{P_{abl}}{\lambda_1} e_1 + m_1 \right) - \lambda_2 \left(-\frac{P_{2b}^{abs}}{\lambda_2} e_1 + m_2 \right) - \varepsilon_2 \sigma T_2^4 + \varepsilon_1 \sigma T_2^4 - \varepsilon_2 \sigma T_{PV}^4 \frac{S_{PV}}{S} = 0 \quad (5)$$

avec $P_{2b}^{abs} = (\alpha_{21} \varepsilon_1 \sigma T_2^4 + \alpha_{2PV} \varepsilon_{PV1} \sigma T_{PV}^4 S_{PV} / S + \alpha_{2s} \tau_{1s} E_s S_{PV} / S + \alpha_{2h} \tau_{1s} \rho_{1h} \rho_h E_s S_{PV} / S) / e_2$

La relation (3) relie les températures T_1 , T_2 et T_{PV} .

3.3. Bilan thermique de l'absorbeur en aluminium

La température de la surface externe de la plaque en aluminium (en $x = e_1 + e_2$) est notée T_3 . La surface externe de la deuxième feuille du polycarbonate (figure 2) rayonne thermiquement vers l'aluminium la puissance $\varepsilon_2 \sigma T_3^4 S_h / S$ et la surface externe de l'aluminium rayonne vers polycarbonate 2a, la puissance $\varepsilon_{al} \sigma T_3^4 S_h / S$. La partie infra-rouge du rayonnement solaire, après avoir traversé les deux feuilles du polycarbonate et l'hologramme, arrive sur la surface d'aluminium avec la puissance $\tau_{2h} \tau_h \tau_{1s} E_s S_h / S$.

La relation du bilan d'énergie et l'équation de la chaleur dans l'aluminium permettent de déterminer le flux de chaleur par conduction arrivant sur la surface en $x = e_1 + e_2$ et d'en déduire la relation :

$$\varepsilon_2 \sigma T_3^4 \frac{S_h}{S} - \varepsilon_{al} \sigma T_3^4 \frac{S_h}{S} + \tau_{2h} \tau_h \tau_{1s} E_s \frac{S_h}{S} - \lambda_2 \left(-\frac{P_{2a}^{abs}}{\lambda_2} (e_1 + e_2) + m_2 \right) + \lambda_{al} m_{al} = 0 \quad (6)$$

La relation (4) relie les températures T_2 , T_3 , T_4 et T_{PV} .

3.4. Bilan thermique de la cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont en contact, d'un coté avec le polycarbonate 2b et d'autre avec l'aire ambient (figure 2). La surface extérieure de la cellule photovoltaïque rayonne la puissance $\varepsilon_{PV2} \sigma T_{PV}^4 S_{PV} / S$ rapportée à l'unité de surface S du capteur. La surface intérieure

(en $x = e_1 + e_2$) de la cellule photovoltaïque rayonne vers le polycarbonate 2b avec une puissance $\varepsilon_{PV1} \sigma T_{PV}^4 S_{PV} / S$. La température de la cellule photovoltaïque est notée T_{PV} . Le rayonnement émis par l'air ambiant est $\varepsilon_a \sigma T_a^4$ où ε_a est le coefficient d'émissivité de l'atmosphère et le flux convectif surfacique à la surface des cellules est donné par la relation $h_{al}(T_{PV} - T_a)$ où h_{al} est un coefficient d'échange supposé constant. Le polycarbonate 2b rayonne vers la cellule photovoltaïque la puissance $\varepsilon_2 \sigma T_{PV}^4 S_{PV} / S$. Le rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque se compose du rayonnement solaire ré-émis par l'hologramme (spectre dans le domaine du visible) de puissance $\tau_{2h} \rho_{1h} \rho_h \tau_{1s} E_s S_h / S$ et du rayonnement direct (spectre dans le visible et l'infra rouge), de puissance $\tau_{2s} \tau_{1s} E_s \left(\frac{S - S_h}{S} \right)$.

La puissance électrique produite par les cellules photovoltaïques est $P_{electr} = E_{PV} \cdot S \cdot \eta_{PV}$.

Le bilan énergétique des cellules photovoltaïques est :

$$\begin{aligned} & -\varepsilon_{PV} \sigma T_{PV}^4 \frac{S_{PV}}{S} + \varepsilon_2 \sigma T_{PV}^4 \frac{S_{PV}}{S} + \tau_{2h} \rho_{1h} \rho_h \tau_{1s} E_s \frac{S_h}{S} + \tau_{2s} \tau_{1s} E_s \left(\frac{S - S_h}{S} \right) - \\ & - \lambda_2 \left(-\frac{P_{2b}^{abs}}{\lambda_2} e_1 + m_2 \right) - P_{electr} - h \cdot (T_{PV} - T_a) + \varepsilon_a \sigma T_a^4 = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

La relation (5) relie les températures T_2 et T_{PV} .

3.5. Bilan de l'échangeur thermique

Un échangeur thermique est placé sous la plaque en aluminium, il est constitué par une conduite cylindrique parcourue par un fluide caloporteur de capacité calorifique massique constante c_{eau} , de masse volumique ρ et de 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} . La quantité de chaleur échangée par unité de surface du tube est $h_e (T_4 - T(z))$ avec un coefficient d'échange surfacique constant 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) dans le tube :

$$T_s = T_4 (1 - e^{-\alpha L_{eau}}) + T_e e^{-\alpha L_{eau}} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{\pi D h_e}{\dot{m} c_{eau}} \quad (8)$$

On dispose donc des cinq relations (1, 2, 3, 4, 5) pour calculer les cinq températures T_1 , T_2 , T_3 , T_4 et T_{PV} en fonction des conditions ambiantes, de la géométrie, des matériaux, des coefficients de Fourier du polycarbonate et de l'aluminium et des coefficients optiques de réflexion, absorption et transmission. Ayant déterminé la température T_4 , la température T_s , de sortie du fluide caloporteur est déduite de la relation (6) à partir du coefficient α et de la longueur du tube de l'échangeur thermique.

Conclusion

Un capteur solaire hybride avec concentrateur holographique est proposé pour optimiser l'utilisation du rayonnement solaire en séparant la partie visible de la partie infrarouge du rayonnement. Une modélisation simple est présentée, elle introduit dans une description stationnaire et monodimensionnelle les échanges conductifs et radiatifs afin de pouvoir déterminer les profils thermiques. La résolution du système non linéaire d'équations sera

présentée ultérieurement et les résultats seront ensuite confrontés avec ceux obtenus à partir d'un démonstrateur en cours de construction.

Références

- [1] G.N. Tiwari, R.K. Mishra, S.C. Solanki, Photovoltaic Modules and their Applications: A Review on Thermal Modeling, *Applied Energy* 88, p.2287-2304, 2011
- [2] R. Birkmire, Compound Polycrystalline Solar Cells: Recent Progress And Y2K, Perspectives. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 65, p.17–28, 2001
- [3] S. Nishimura, K. Terashima, H. Nagayoshi, Materials for Multi Junction Solar Cell. In: Conference Record of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p.725–727, 2005
- [4] X.Wu, R. Dhere, D. Albin, T. Gessert, C. Dehart, J. Keane, Et Al. High-Efficiency CTO/ZTO/Cds/Cdte Polycrystalline Thin-Film Solar Cells. In: Proceedings of NCPV Program Review Meeting, p.1–4, 2001
- [5] A. Mojiri, R. Taylor, E. Thomsen, G. Rosengarten, Spectral Beam Splitting For Efficient Conversion of Solar Energy - A Review *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28, p.654–663, 2013
- [6] C. Bingham, A. Lewandowski, K. Stone, R. Sherif, O. U, Kusek S. Concentrating Photovoltaic Module Testing At NREL's Concentrating Solar Radiation Users Facility. In: Proceedings of the National Center for Photovoltaics and Solar Program Review Meeting. Denver, Colorado: NREL; 2003
- [7] G. Peharz, F. Dimroth, Energy, Payback Time of The High-Concentration PV System Flatcons. *Progress In Photovoltaics: Research And Applications*, 13, p.627–634, 2005
- [8] D. Chemisana, M. V. Collados, M. Quintanilla, J. Atencia, Holographic Lenses for Building Integrated Concentrating Photovoltaics, *Applied Energy* 110, p.227–235, 2013
- [9] P.A.B. James, A.S. Bahaj, Holographic Optical Elements: Various Principles for Solar Control of Conservatories and Sunrooms, *Solar Energy* 78, p.441–454, 2005
- [10] S.N. Singh, S. Preeti, R. Kumar, Holography: New Breakthrough in Solar Power Conversion Technology, *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 2000
- [11] C. Bainier, C. Fernandez, D. Courjon, Solar Concentrating Systems Using Holographic Lenses, *Solar And Wind Technology*, Vol5, N°4, p 395-404, 1988
- [12] J. Ludman, J. Riccobono, I.V. Semenova, N. O. Reinhand, W. Tai, X. Li, G. Syphers, E. Rallis, G. Sliker, J. Martin, The Optimization of a Holographic System for Solar Power Generation, *Solar Energy* Vol 60, N°1, p.1-9, 1997
- [13] O. Iurevych, S. Gubin, P. Guibert, M. Dudeck, Echanges thermiques dans un capteur solaire hybride avec concentrateur holographique, Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13), Sousse, Tunisie, 15-17 déc. 2013
- [14] O. Iurevych, S. Gubin, Installation solaire hybride, Brevet d'Ukraine 98680, 11 juin 2012
- [15] O. Iurevych, S. Gubin, M. Dudeck, Combined receiver of solar radiation with holographic planar concentrator, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Physics* 29, 012016, 2012
- [16] O. Iurevych, S. Gubin, M. Dudeck, Modeling of a Hybrid Solar Panel with Solar Concentration, *EER Electrical Engineering Research*, vol. 1, No. 2, p.35 – 41, April 2013