

Echanges thermiques dans un capteur solaire hybride avec concentrateur holographique

Olena IUREVYCH^{1*}, Sergii GUBIN², Michel DUDECK³

^{1,3}Jean le Rond d'Alembert Institut, Pierre and Marie Curie University/ ^{1,2}National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"

4 place Jussieu 75005 Paris, France/ 17, Tchkalova st, Kharkiv, 61070, Ukraine

*(auteur correspondant : yurevi.elena@yandex.ru)

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 obtenu 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.

Nomenclature

A	surface de capteur hybride, m^2	T_a	température ambiante, °C
A'	surface des cellules photovoltaïques, m^2	T_e	température d'entrée du fluide, °C
c_p	capacité calorifique, $kJ/kg.K$	T_s	température de sortie du fluide, °C
e	épaisseur, m	U	tension – cellules photovoltaïques, V
E_s	flux solaire incident, W/m^2	<i>Symboles grecs</i>	
h_j	coefficient d'échange avec l'air ambiant, $W/m^2.K$	\dot{m}	débit massique du fluide caloporteur, kg/s
I_{ph}	photocurrent, A	η	facteur de la réflexion UV à la surface du capteur
L	largeur du capteur, m	λ_j	conductivité thermique, $W/m.K$
P	puissance dissipée dans les cellules photovoltaïques, W	ρ	masse volumique, kg/m^3
q_j	densité de flux de chaleur, W/m^2	<i>Indices</i>	
q_L	densité de flux de chaleur latéral, W/m^2	$j = 1$: contact air-polycarbonate
T_j	températures de contact, °C	$j = 2$: contact polycarbonate-polycarbonate
		$j = 3$: contact polycarbonate-aluminium
		$j = 4$: contact photovoltaïque-aluminium

1. Introduction

Les échanges thermiques dans un capteur solaire hybride (photovoltaïque, thermique) avec un concentrateur holographique sont modélisés. 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, on a calculé les caractéristiques du fonctionnement du capteur 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. Cette modélisation a permis précédemment de déterminer les rendements électrique et thermique [1,2].

Une modélisation thermique détaillée donne la température en régime stationnaire des différents éléments du capteur afin d'optimiser le fonctionnement de l'installation. Les pertes thermiques latérales sont prises en compte.

2. Le capteur hybride

Le capteur solaire hybride utilise une répartition du flux solaire suivant la gamme de longueur d'onde réalisée par un concentrateur holographique [3]. Un guide d'onde permet réflexion multiple, de transmettre le flux réémis (gamme du visible) par le concentrateur placé entre deux feuilles de polycarbonate, vers les cellules photovoltaïques [4]. 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 et donc d'augmenter leur rendement.

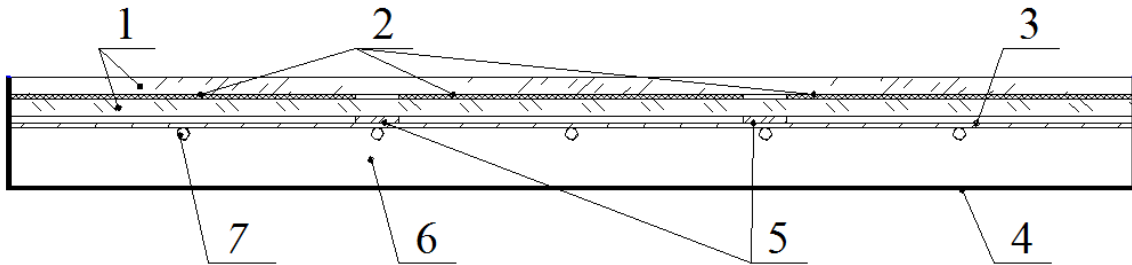


Figure 1 : Capteur solaire hybride

1. Polycarbonate monolithe, 2. Concentrateur d'énergie solaire : pellicule holographique, 3. Absorbeur, 4. Boîte, 5. Cellules photovoltaïques, 6. Calorifugeage, 7. Tube de cuivre pour le fluide caloporteur

3. Modélisation thermique du capteur hybride

Les propriétés thermiques du capteur hybride ont été étudiées en considérant une description stationnaire quasi-1D (à une dimension). L'étude du régime transitoire pourra faire 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.

Le flux solaire incident E_s est partiellement réfléchi par la surface externe du capteur qui est en regard du rayonnement solaire. On introduit un facteur noté η traduisant la réflexion à la surface du capteur qui a lieu principalement dans la gamme de l'UV. 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 $h(T_a - T_1)$ où h est un coefficient d'échange. Le capteur reçoit donc par unité de surface la quantité de chaleur :

$$q_1 = \eta E_s + h(T_a - T_1) \quad (1)$$

Le capteur est constitué ensuite par une plaque de polycarbonate d'épaisseur e_1 dont les paramètres thermiques sont constants et uniformes. Dans cette plaque, la température ne dépend que de la variable x et elle passe de T_1 à T_2 . Le flux thermique s'effectue dans la direction x . Dans ce cas, l'équation Fourier de la diffusion de chaleur dans le polycarbonate se réduit à : $d^2T/dx^2 = 0$ donnant une distribution de la température linéaire

$T(x) = \frac{x}{e_1} \cdot (T_2 - T_1) + T_1$. La température se raccorde avec celles en $x = 0$ et en $x = e_1$ (surfaces isothermes).

Le vecteur densité du flux de chaleur est $\vec{q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}$, soit :

$$q_x^{(1)} = -\frac{\lambda_1}{e_1} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{\lambda_1}{e_1} \cdot (T_1 - T_2) \quad (2)$$

Entre cette première plaque de polycarbonate et une seconde plaque de polycarbonate est placée la feuille holographique dont on suppose qu'elle s'équilibre avec 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 .

Vient ensuite une plaque d'aluminium d'épaisseur e_3 où la température passe de T_3 à T_4 . Sous la plaque d'aluminium est placé le capteur photovoltaïque dont on admet que la température est la température T_4 de jonction entre les plaques de polycarbonate et d'aluminium (on ne tient pas compte de la dissipation thermique dans les cellules photovoltaïques).

Sous la plaque d'aluminium est placé l'échangeur thermique constitué par une conduite parcourue par un fluide caloporteur de capacité calorifique c_p , de masse volumique ρ avec un débit massique \dot{m} . Le fluide caloporteur entre dans l'échangeur thermique avec une température T_e et ressort avec une température T_s . La puissance transmise par la face inférieure de la plaque en aluminium est supposée entièrement transmise au fluide caloporteur et on admet que la température T_4 est une moyenne des températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur

Dans un premier calcul, aucune perte latérale de chaleur n'est prise en compte.

L'ensemble des équations de bilan d'énergie 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, $\eta, h, c_1, \rho_1, \lambda_1, c_3, \rho_3, \lambda_3$ et des caractéristiques de l'écoulement du fluide caloporteur, c_p, ρ, \dot{m} .

	c	ρ	λ	e
	kJ/kg.K	kg/m ³	W/m.K	m
Polycarbonate	1,26	1200	0,2	0,03
Aluminium	0,93	2698	237	0,02

Tableau 1 : Propriétés du polycarbonate et de l'aluminium

La figure 2 présente les températures T_1, T_2, T_3, T_4, T_s calculées en fonction de la densité de flux solaire comprise entre 200 et 1000 W/m² pour un coefficient d'échange convectif $h = 10 \text{ W/m}^2\text{.K}$, un coefficient $\eta=0,9$, une température ambiante T_a de 20°C et une température d'entrée du fluide caloporteur T_e de 10°C. Les températures calculées varient linéairement en fonction de la densité E_s de flux solaire. La température T_1 de surface est comprise entre 25°C et 66 °C et la température T_s de sortie entre 34°C et 95°C. La puissance évacuée par convection par la face supérieure du capteur est comprise entre 124 W et 444 W. La figure 3 présente les températures dans les mêmes conditions, mais 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 57°C et 68°C et la température T_s de sortie entre 82°C et 99°C. La puissance évacuée par la surface par convection par la face supérieure du capteur est comprise entre 377 W et 466 W.

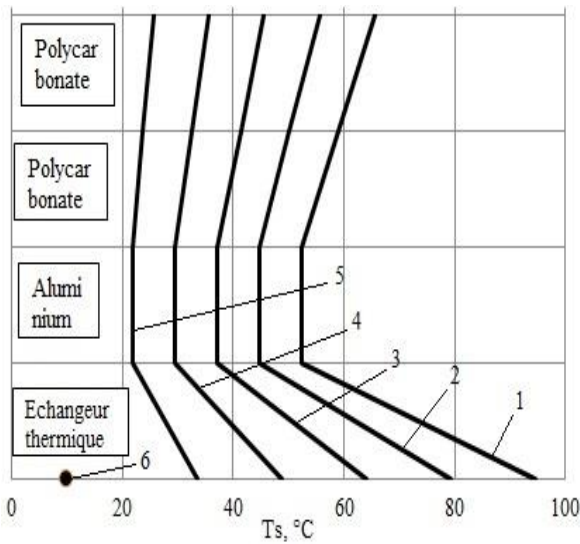


Figure 2 : Températures dans le capteur en fonction de la densité de flux solaire

1 : $E_s=1000 \text{ W/m}^2$; 2 : $E_s=800 \text{ W/m}^2$
 3 : $E_s=600 \text{ W/m}^2$; 4 : $E_s=400 \text{ W/m}^2$
 5 : $E_s=200 \text{ W/m}^2$; 6 : $T_a=10^\circ\text{C}$

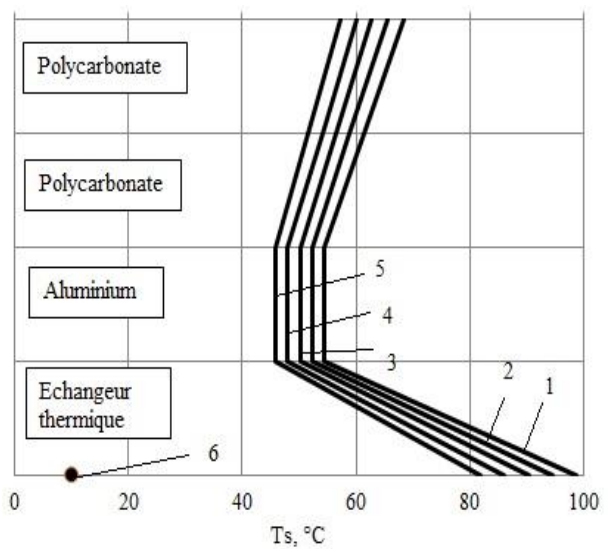


Figure 3 : Températures dans le capteur en fonction de la température ambiante

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 : $T_a=5^\circ\text{C}$; 6 : $T_e=10^\circ\text{C}$

Les figures 4 et 5 présentent la température de sortie du fluide en fonction de la densité de flux solaire et de la température ambiante. L'augmentation du flux solaire et de la température ambiante accroît la température de sortie du fluide, ce qui augmente le rendement thermique du capteur solaire hybride.

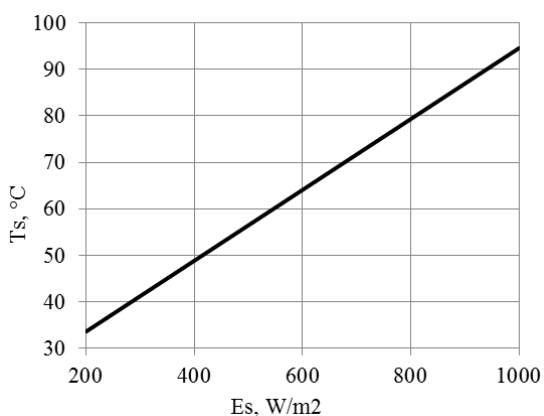


Figure 4 : Températures dans le capteur en fonction de la densité de flux solaire

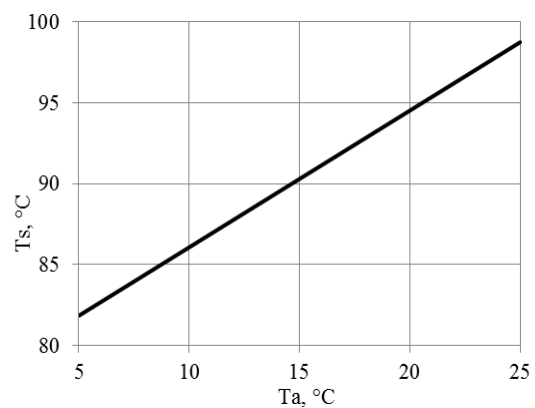


Figure 5 : Températures dans le capteur en fonction de la température ambiante

Les faces latérales du capteur n'étant pas parfaitement adiabatiques, on introduit maintenant une perte de chaleur latérale dépendant de l'écart de température entre la température ambiante et la température $T(x)$ dans les deux plaques de polycarbonate et dans la plaque d'aluminium.

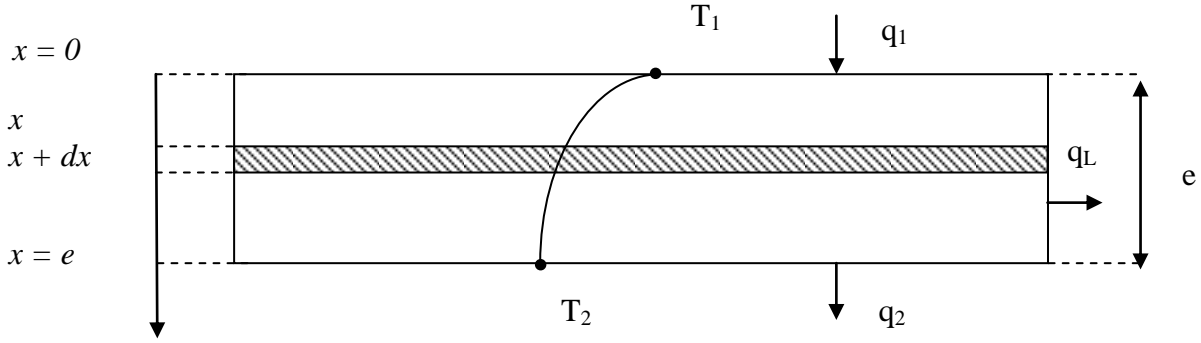


Figure 6 : Schéma de la première feuille de polycarbonate avec perte thermique latérale

Par unité de surface, la quantité de chaleur échangée latéralement par unité de temps est introduite à partir de coefficients d'échange : h_1 pour le polycarbonate et h_3 pour l'aluminium, soit $h_1(T_a - T(x))$ pour le polycarbonate et $h_3(T_a - T(x))$ pour l'aluminium. Le modèle utilisé pour caractériser l'état stationnaire dans le polycarbonate et l'aluminium est quasi-1D dans lequel la température ne dépend que de la variable x de même que la densité de flux $q_x(x)$ et la densité de flux latéral $q_L(x)$. On obtient :

$$\begin{aligned}
 q_x^n &= \sqrt{\frac{4\lambda_{n-1}h_1}{L}} \cdot \frac{(T_n - T_a)(e^{\bar{e}_{n-1}} + e^{-\bar{e}_{n-1}}) - 2(T_{n-1} - T_a)}{e^{-\bar{e}_n} - e^{\bar{e}_n}} \\
 q_x^{n+1} &= \sqrt{\frac{4\lambda_n h_1}{L}} \cdot \frac{2(T_{n+1} - T_a) - (T_n - T_a)(e^{\bar{e}_n} + e^{-\bar{e}_n})}{e^{-\bar{e}_n} - e^{\bar{e}_n}} \\
 q_L &= \frac{h}{e^{-\bar{e}} - e^{\bar{e}}} [(\theta_2 - \theta_1 e^{\bar{e}})e^{-\bar{x}} + (-\theta_2 + \theta_1 e^{-\bar{e}})e^{\bar{x}}] \\
 T_{n+1} &= (T_n - T_a) \cdot \frac{(e^{\bar{e}_n} + e^{-\bar{e}_n})}{2} + \frac{(e^{-\bar{e}_n} - e^{\bar{e}_n})}{2\sqrt{\frac{4\lambda_n h_1}{L}}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

avec l'épaisseur adimensionnée $\bar{e}_n = \sqrt{\frac{4h_n}{\lambda L}} e_n$ et où q_x^n, q_x^{n+1} sont les densités de flux de chaleur en projection sur l'axe des x de part et d'autre d'un milieu avec échange thermique latéral.

Les équations de bilan énergétique et de continuité du flux de chaleur sont à nouveau résolues mais en tenant compte des pertes de chaleurs latérales, le fond du capteur est isolé thermiquement. Pour un flux d'énergie solaire incident de 1000 W/m^2 et un coefficient d'échange thermique latéral $h_1 = h_3 = h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, on obtient $T_1 = 62^\circ\text{C}$ et $T_s = 69^\circ\text{C}$, valeurs plus faibles que obtenues précédemment en raison des pertes thermiques latérales.

Les figures 7 et 8 montrent l'influence de la température de sortie du fluide caloporteur en fonction de la densité de flux solaire et de la température ambiante ce qui est à comparer avec le cas précédent où les surfaces latérales sont adiabatiques (figures 4,5).

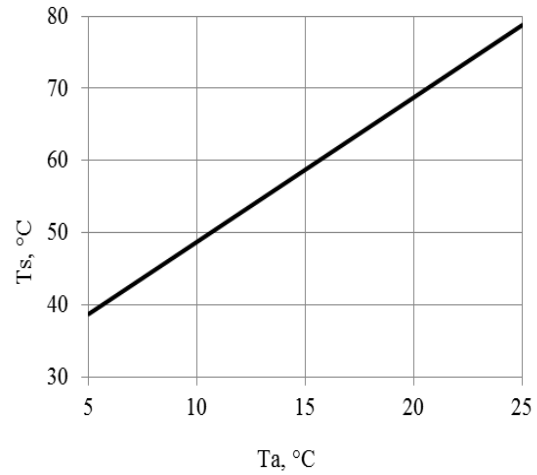
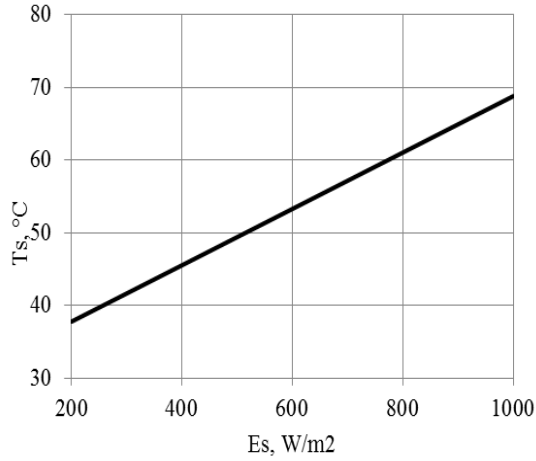


Figure 7 : Températures dans le capteur en fonction de la densité de flux solaire avec pertes thermiques latérales

Figure 8 : Températures dans le capteur en fonction de la température ambiante avec pertes thermiques latérales

4. Conclusion

Après avoir modélisé le comportement des parties électrique et thermique (sans échanges) [6], les températures des éléments d'un capteur solaire hybride ont été calculées pour un régime thermique établi pour différentes valeurs du flux solaire incident et de la température de l'air ambiant. Sans pertes latérales, la température de sortie du fluide caloporteur a été trouvée égale à 94°C pour une puissance rayonnée de 1000 W/m² et une température ambiante de 20°C. Les pertes latérales ont été ensuite introduites dans la modélisation ce qui a abaissé la température de sortie du fluide caloporteur à 69°C. Cette étude sera complétée en introduisant une énergie dissipée dans les cellules photovoltaïques.

L'énergie calorifique dissipée dans le capteur photovoltaïque sera ultérieurement introduite dans la modélisation. Le capteur est représenté par un milieu sans épaisseur de surface A' répartie en n éléments identiques de surface A' compris entre la plaque en polycarbonate et celle en aluminium et ayant une température notée T_{ph} . Si P est la puissance calorifique dégagée par unité de surface, cette température vérifie la relation $P + q_3^+ - q_4^+ = 0$ si q_3^+, q_4^+ sont les quantités de chaleur échangées par le capteur photovoltaïque avec les milieux adjacents. Ces quantités de chaleur sont exprimées soit par une loi d'échange de la forme $q_3^+ = \hat{\lambda}_3^+(T_3^+ - T_{ph})$, $q_4^+ = \hat{\lambda}_4^+(T_4^+ - T_{ph})$ soit de la forme $q_3^+ = -\lambda_3(\partial T / \partial x)^+$, $q_4^+ = -\lambda_4(\partial T / \partial x)^-$. La deuxième forme est choisie car elle n'introduit pas de nouveaux coefficients d'échanges $\lambda_3^+, \hat{\lambda}_4^+$. Afin de conserver l'approche monodimensionnelle suivant l'axe des x, on utilisera le bilan d'énergie :

$$nP \frac{A'}{A} - \frac{\lambda_3}{e_3}(T_{ph} - T_3) + \frac{\lambda_4}{e_4}(T_4 - T_{ph}) = 0 \quad (4)$$

La puissance électrique P dissipée [5] est :

$$P = I_{ph} \cdot U \quad (5)$$

L'ensemble des équations de bilan d'énergie sera résolu pour une densité de flux solaire E_s variant entre 200 W/m^2 et 1000 W/m^2 et pour une température de l'atmosphère ambiante T_a variant entre 5°C et 25°C .

Le but de cette modélisation thermique est double, il s'agit d'une part de trouver les caractéristiques optimales de fonctionnement d'un capteur solaire hybride pour obtenir simultanément des rendements photovoltaïque et thermique maximum et d'autre part de préparer la construction d'un démonstateur.

Références

- [1] Brevet Ukrainien, O. Iurevych, S. Gubin, « Installation solaire hybride », N°98680 enregistré le 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] Patent number : US 5,877,874 Date of Patent : March 2nd, 1999, “Device for concentrating optical radiation”, Inventor : Glenn A. Rosenberg, Tucson, Arizona, USA
- [4] O. Iurevych, S. Gubin, Application of holographic concentrator of solar radiation in hybrid solar receiver / ISSN 1727-7337, Aerospace technic and technology, 2012, № 2 (89), p 44
- [5] V Krivcov, A. Oleinik, A. Iakovlev, Energie renouvelable. Manuel 3. Energie alternative, Kharkiv : Univ. Nat. Aersp. “KhAI”, Sevastopol: Univ. Nat. Techn. de Sevastopol, Ukraine, 2006, p 643
- [6] O. Iurevych, S. Gubin, M. Dudeck, Modelling of a hybrid solar panel with solar concentration, accepté pour publication dans le Journal of Electrical Engineering Research (EER)