

Refroidissement d'un Panneau Solaire Photovoltaïque par Ruissellement d'Eau

S. AIT SAADA, I. KECILI, R. NEBBALI

Laboratoire d'Energétique, Mécanique et Matériaux, Université Mouloud Mammeri de
Tizi-Ouzou
atsonia@outlook.com

Résumé :

L'exploitation des panneaux solaires photovoltaïques (PV) sous des conditions climatiques extrêmes réduit considérablement leurs efficacités. En effet, sous des rayonnements solaires intenses et des températures élevées de l'air ambiant, les panneaux solaires peuvent atteindre 100°C. Afin de pallier ce dysfonctionnement, on a recours au refroidissement. Ce travail consiste justement à refroidir un panneau solaire par ruissellement de l'eau sur la face avant du panneau PV. Pour déterminer la température d'équilibre de ce panneau refroidi, on résout le système couplé d'équations de mouvement et d'énergie. La complexité des équations mises en jeu impose quelques hypothèses simplificatrices. On considère d'abord un écoulement plan pour lequel on détermine analytiquement l'épaisseur du film mince avec le champ des vitesses. Ce qui définit le domaine d'écoulement du film d'eau. Ce domaine est ensuite exploité dans un code de calcul CFD pour résoudre l'équation de l'énergie et déterminer le profil de température à travers ce film ainsi que la température d'équilibre de la surface sur laquelle ruisselle cette eau. Les résultats obtenus mettent en évidence l'efficacité de ce système de refroidissement.

Abstract:

The efficiency of photovoltaic panels can be greatly reduced under extreme climatic conditions. Indeed, under intense solar radiation and high ambient air temperature, solar panels can reach 100 °C. To overcome this, cooling system is used. This work consists of cooling a photovoltaic (PV) panel by flowing water onto its top face. To determine the equilibrium temperature of this cooled PV panel, the coupled system of equations of motion and energy is solved. The complexity of the equations involved imposes some simplifying hypotheses. In a first step, we consider a 2D problem for which the thickness of the thin film and the velocity field are determined analytically. Thus, we determine the flow area of the water film. Then, we exploit a CFD code to solve the energy equation. This determines the temperature profile through the water film and the PV panel. The results obtained highlight the effectiveness of this cooling system.

Mots clefs : CFD, efficacité, photovoltaïque, refroidissement, ruissellement d'eau.

1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus prometteuses; elle présente l'avantage d'être propre et inépuisable. Cependant, les cellules solaires photovoltaïques (PV) ne convertissent qu'une partie du rayonnement solaire incident, tandis que, le reste favorise son réchauffement et donc l'élévation de sa température. Ce qui a pour effet d'affecter l'efficacité de ces cellules et celle des panneaux PV qu'elles composent. Pour atténuer cet effet négatif de l'élévation de température, on a recours au refroidissement. De nombreuses techniques de refroidissement sont proposées dans la littérature, notamment celles utilisant de l'eau comme fluide caloporteur. [1] ont fait circuler cette eau dans un échangeur de chaleur à serpentin selon différentes configurations de ses tubes. Ce qui a permis d'améliorer l'efficacité du panneau PV de 10.5 à 17.2%. Pour une meilleure homogénéisation du champ de température dans le panneau PV, [2] proposent un échangeur à micro-canaux. Une autre technique de refroidissement [4], qui améliore l'efficacité de 14.1%, consiste à pulvériser de l'eau, simultanément sur les deux faces du panneau PV. [5] ont utilisé une éponge fixée sur la face arrière du panneau PV. Cette éponge qui est continuellement imbibée d'eau a permis d'améliorer l'efficacité de ce panneau de 29.4%.

Pour l'autonomie de fonctionnement de ces systèmes de refroidissement par eau, [6] proposent de refroidir l'eau chaude, en sortie du panneau PV refroidi, à travers un échangeur enfouis dans le sol. Par ailleurs, dans une étude expérimentale de refroidissement d'un panneau PV par ruissellement d'eau sur sa face avant [7], l'eau circule en circuit fermé entre ce panneau et un réservoir de stockage. Selon que le refroidissement soit continu durant la journée ou en intermittence d'une heure, l'efficacité du panneau est améliorée, respectivement, de 28.4 et 10.7%. Dans le présent travail on se propose d'exploiter cette technique de refroidissement par ruissellement d'eau pour effectuer une étude semi analytique de ce problème. Pour ce faire, on détermine d'abord analytiquement, par la résolution des équations de mouvement, le champ des vitesses d'écoulement ainsi que l'épaisseur du film d'eau. La distribution du champ de température dans ce film d'eau et dans le panneau PV est ensuite déterminées numériquement via le logiciel commercial Fluent.

2 Position du problème

Il s'agit de refroidir un panneau PV (Tableau I et II) par ruissellement d'eau sur sa face avant (figure 1) Le panneau est orienté vers le sud selon un angle d'inclinaison (γ) qui correspond à la latitude du lieu, soit environ 35° pour la région de Tizi-Ouzou (Algérie).

Avec une eau à 25, 35 et 45°C on refroidit le panneau avec des débits de 50, 75, 100, 125,150, 200 et 300g/s. Par ailleurs, sous un rayonnement de $1000\text{W}/\text{m}^2$ on étudie l'influence de la température de l'air ambiant sur l'amélioration de l'efficacité de ce panneau PV que permet ce système de refroidissement.

Tableau I
Propriétés du panneau PV [8]

Couches	e(mm)	λ (W/m ² k)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg °C)	ϵ
Silicium	0.3mm	140	2330	677	0.7
Verre	3.2 mm	1.8	3000	500	

Tableau II
Paramètres du panneau PV

Puissance nominal	190.16 W
Tension V_{mpp}	44.5 V
Courant I_{mpp}	5.52 A
Nombre de cellules par module	72 Cellules (6×12)
Dimensions de la cellule	125×125 mm
Dimensions du module	1580 × 808 × 45 mm
Coefficient de température de puissance	0.37 % / °C

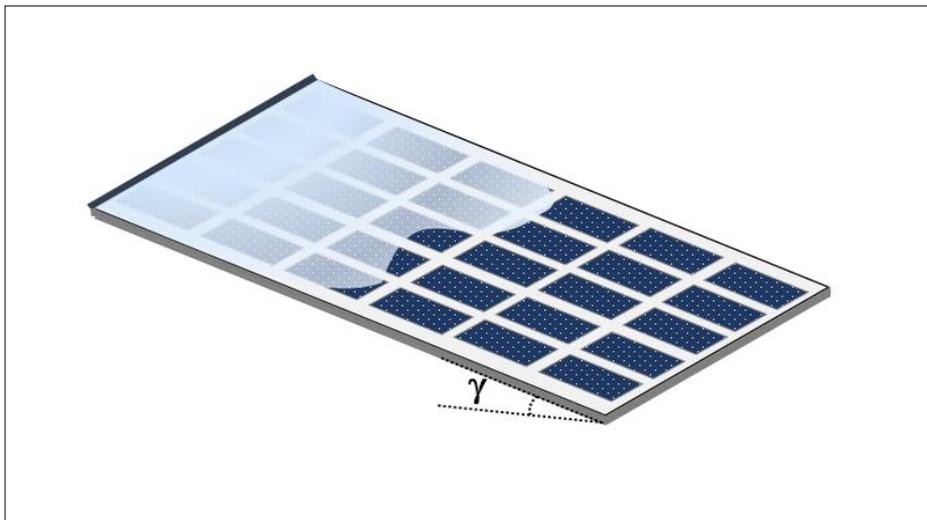


Figure.1. Illustration du panneau PV refroidi par ruissellement d'eau sur sa face avant.

3. Equations associées au panneau PV refroidi

3.1. Film d'eau

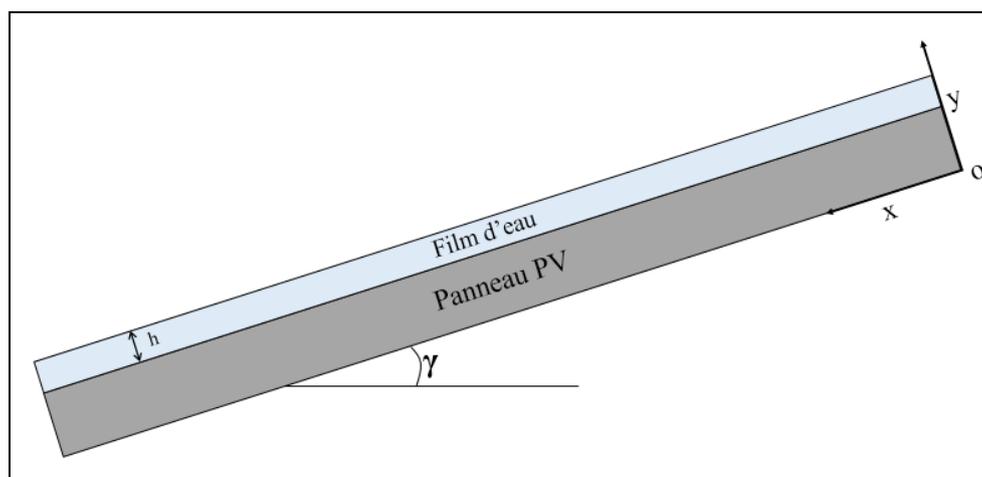


Figure.2. Illustration en 2D du film d'eau sur un panneau PV incliné.

Le film d'eau qui ruisselle sur la surface inclinée du panneau solaire est assimilé à un écoulement plan d'épaisseur h constante (figure 2). L'équation de mouvement associée à ce film d'eau en régime établi se présente comme suit :

$$0 = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \rho g \sin(\gamma) \quad (1)$$

Où P définit la pression et ν la viscosité cinématique.

Avec comme conditions aux limites :

$$\text{Pour } y=0 : u(y=0) = 0$$

$$\text{Pour } y=h : \frac{du}{dy} = 0$$

Laquelle admet comme solution :

$$u(y) = \rho \cdot g \frac{\sin \alpha}{\mu} \cdot \left(h \cdot y - \frac{y^2}{2} \right) \quad (2)$$

L'épaisseur du film d'eau est déterminée à partir de l'expression du débit qui s'exprime par :

$$Q = \int_0^h u \, dy \quad (3)$$

Ce qui donne :

$$h = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \nu \cdot Q}{g \cdot \sin \alpha}} \quad (4)$$

L'équation de l'énergie associée au film d'eau s'exprime par :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (5)$$

Où $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$: Diffusivité thermique.

3.2. Résolution numérique

Pour le cas du panneau PV refroidi, la résolution numérique de l'équation de l'énergie (5) est effectuée par le code de calcul CFD-Fluent [9]. Pour un débit d'eau donné, on détermine l'épaisseur du film d'eau exprimé par la relation (4). Ensuite on réalise la géométrie en 2D du panneau PV avec ses deux couches de verre et de silicium ainsi que le film d'eau avec l'épaisseur h .

On introduit par des programmes externes (Udfs) le profil des vitesses exprimé par la relation (2). Les bilans radiatifs effectués sur les couches de verre et de silicium constituent les termes sources de chaleur de ces deux milieux solides. Ils s'expriment par :

$$Q_g = \frac{\alpha_g R_g - \varepsilon \sigma (T_p^4 - T_v^4)}{e_g} \text{ source de chaleur interne du verre (W/m}^3\text{)}$$

$$Q_{si} = \frac{\alpha_{si} \tau_g R_g}{e_{si}} \text{ source de chaleur interne du silicium (W/m}^3\text{)}$$

Où :

$\varepsilon_g, \varepsilon_{si}$: émissivités du verre et du silicium.

e_g, e_{si} : épaisseurs du verre et du silicium.

σ : Constante de Stefan Boltzmann

Par ailleurs, les deux faces du panneau PV échangent de la chaleur par convection naturelle avec le milieu ambiant. Le coefficient d'échange convectif est évalué par les corrélations suivantes [10]:

$$N_u = 0.54 \times (R_a)^{0.25} \text{ pour } 10^4 < Ra < 10^6 \quad (6)$$

$$N_u = 0.15 \times (R_a)^{0.33} \text{ pour } 10^6 < Ra < 10^{11} \quad (7)$$

4. Température du panneau PV non refroidi

Pour cette situation de panneau PV non refroidi, seule l'équation d'énergie est résolue pour la détermination de la température d'équilibre du silicium composant le panneau PV. En effet, en supposant une distribution de température homogène sur les différents milieux solides qui composent le panneau PV, le bilan thermique du panneau PV de surface (S) s'exprime, dans le cas d'un circuit ouvert, comme suit :

$$\alpha(R_G S) - \Phi_C - \Phi_r = 0 \quad (8)$$

Où :

$$\Phi_C = hS(T_P - T_{air}) \quad (9)$$

Φ_C est le flux convectif

Le flux radiatif est déterminé en assimilant la température des milieux environnants le panneau PV égale à celle de l'air [11]

$$\Phi_r = \varepsilon \sigma S (T_P^4 - T_{air}^4) \quad (10)$$

α : coefficient d'absorption moyen du panneau PV

Ce qui conduit à :

$$T_{PV} = \frac{(\alpha R_G S - \Phi_r)}{(hS)} + T_{air} \quad (11)$$

La température d'équilibre de ce panneau PV non refroidi est alors déterminée par itérations successives [11].

5. Puissance et efficacité du panneau PV refroidi

L'efficacité électrique du panneau PV admet l'écriture suivante [12] :

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} [1 - \beta (T_{PV} - T_{PV}^{ref})] \quad (12)$$

Où :

T_{PV} : température du panneau PV.

β : le coefficient de température de puissance dont la valeur est donnée par le fabricant du panneau PV (Table. II).

$\eta_{ref} = 14.9\%$: Efficacité électrique du panneau PV dans les conditions de référence : $T_{PVref} = 25^\circ\text{C}$ et $R_G = 1000 \text{ W/m}^2$

L'amélioration du rendement du panneau PV refroidi est évaluée par l'écart relatif du rendement de ce panneau par rapport à une situation de panneau non refroidi. Il s'exprime par :

$$\eta_r = \frac{|\eta_{PV} - \eta_o|}{\eta_o} \times 100 \quad (13)$$

Avec :

$$\eta_o = \eta_{ref} [1 - \beta (T_{PV}^o - T_{PV,ref})] \quad (14)$$

η_o : rendement du panneau PV non refroidi, placé sous les mêmes conditions climatiques que le panneau PV refroidi, dont la température d'équilibre est T_{PV}^o .

3 Résultats et discussions

La figure (3) représente l'évolution de la température et de l'efficacité du panneau PV non refroidi exposé à différentes températures de l'air ambiant, sous un rayonnement fixe de 1000W/m^2 . Il apparaît que l'élévation de la température de l'air de 25 à 50°C provoque le réchauffement du panneau PV de 67 à 95°C . Ce qui a pour effet d'affecter l'efficacité de ce panneau qui diminue de 12.45 à 11.1% .

Le refroidissement du panneau PV permet de pallier cet échauffement. En effet, à travers la figure (4), il apparaît que pour des températures d'air variant entre 25 et 50°C , le refroidissement par eau permet de maintenir la température du panneau PV entre 30 et 32°C avec une eau à 25°C et un débit de seulement 50g/s (figure 4-a). Toujours avec le même débit d'eau, pour une eau à 35°C (figure 4-b), la température du panneau se stabilise entre 39.5 et 41.5°C , alors qu'avec une eau à 45°C (figure 4-c), la température du panneau varie entre 48.5 et 50.5°C . L'augmentation de ce débit jusqu'à 300g/s permet certes d'abaisser d'environ 3°C cette température du panneau, mais ne permet pas une amélioration significative de son efficacité. En effet, comme le montre la figure (5), Pour différentes températures d'eau, l'efficacité du panneau PV ne varie pas de façon significative avec le débit d'eau. On remarque que l'augmentation du débit d'eau de 50 à 300g/s s'accompagne d'efficacités du panneau de 14.5 , 14 et 13.5% , respectivement, avec une eau à 25 , 35 et 45°C . Le débit de 50g/s suffit donc pour le refroidissement du panneau PV.

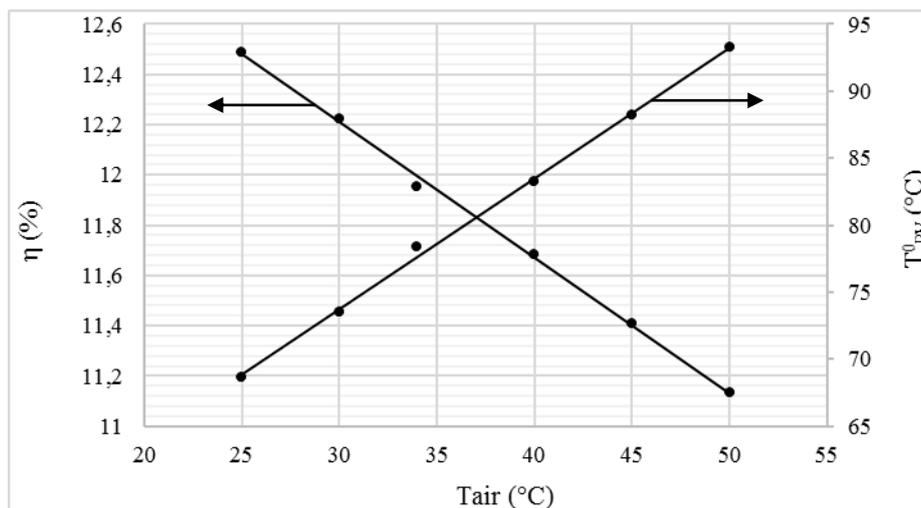


Figure .3. Evolution de la température et de l'efficacité du panneau PV non refroidi avec la température de l'air pour $R_G=1000\text{W/m}^2$.

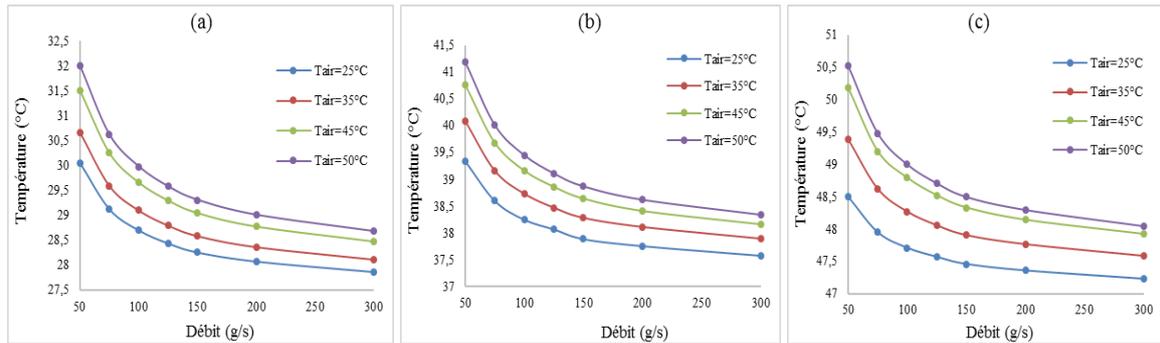


Figure 4. Température moyenne du panneau PV refroidi à différents débits avec des températures d'entrée d'eau de 25 (a), 35 (b) et 45°C (c) sous différentes températures d'air et $R_G=1000 \text{ W/m}^2$

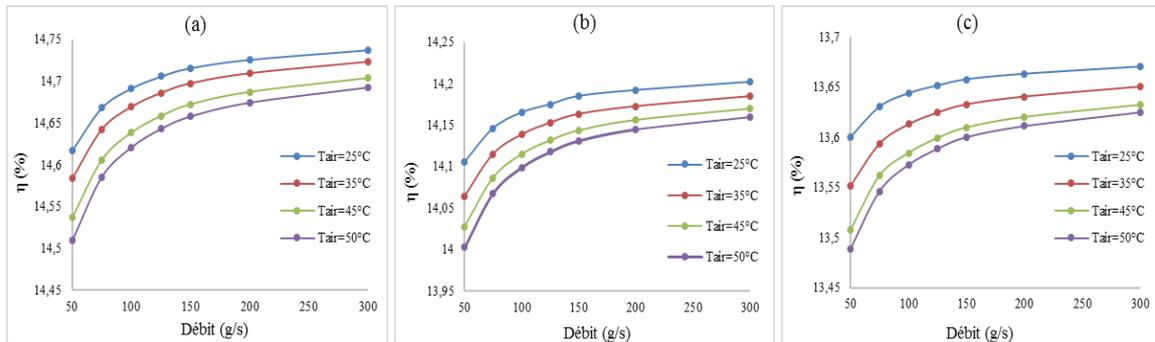


Figure 5. Rendement du panneau PV refroidi à différents débits avec des températures d'entrée d'eau de 25 (a), 35 (b) et 45°C (c) sous différentes températures d'air et $R_G=1000 \text{ W/m}^2$

L'amélioration de l'efficacité du panneau PV, évaluée par la relation (13), permet de tracer les courbes de la figure (6). Il apparaît que le système de refroidissement proposé augmente en efficacité quand la température de l'air augmente. L'amélioration de l'efficacité avec une eau à 25°C (figure 6-a) augmente de 17 à 31% quand la température de l'air augmente de 25 à 50°C. Elle passe de 13 à 26% avec une eau à 35°C (figure 6-b) et de 9 à 21% avec une eau à 45°C (figure 6-c).

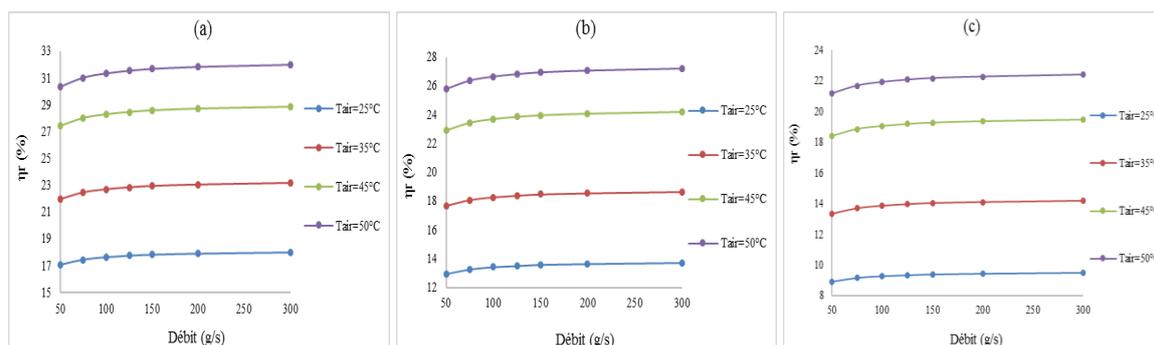


Figure 6. Ecart relatif entre le panneau PV non refroidi et le panneau refroidi à différents débits avec des températures d'entrée d'eau de 25 (a), 35 (b) et 45°C (c) sous différentes températures d'air et $R_G=1000 \text{ W/m}^2$

La figure (7) représente les températures du film d'eau, du silicium et du verre sur le panneau PV refroidi avec une eau à 25, 35 et 45°C qui ruisselle avec un débit de 50g/s. Pour le cas du panneau PV en contact de l'air ambiant à 50°C, on remarque que la température du silicium est plus importante que celle du verre et du film d'eau. En effet, à cause de son absorptivité radiative importante par rapport au verre qui est semi transparent et à l'eau considérée transparente, le silicium absorbe la quasi-totalité du

rayonnement solaire incident qui favorise son échauffement. La température du silicium est de 2 à 3°C plus importante, respectivement, que celle du verre et du film d'eau.

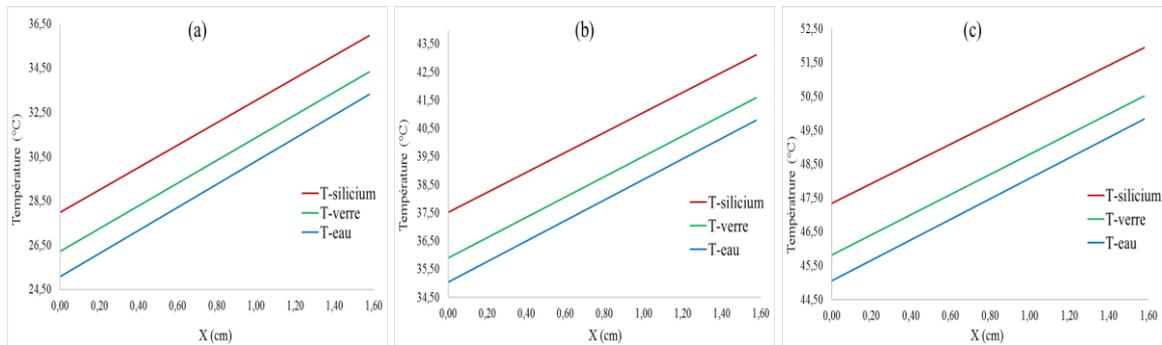


Figure .7. Température du film d'eau, du silicium et du verre du panneau PV refroidi avec un débit d'eau de 50g/s et des températures d'eau de 25 (a), 35 (b) et 45°C (c) sous une ambiance $T_{air}=50^{\circ}C$.

4. Conclusion

Afin d'améliorer l'efficacité d'un panneau PV on a proposé de le refroidir par ruissellement d'eau sur sa face avant. En supposant le film d'eau d'épaisseur constante tout le long du panneau PV, on a d'abord déterminé les expressions des champs des vitesses d'écoulement de l'eau ainsi que l'épaisseur du film. Les distributions des champs de températures dans le panneau PV et le film d'eau ont été déterminées numériquement en exploitant le code commercial Fluent.

Les résultats obtenus montrent qu'un débit d'eau de 50g/s suffit pour un refroidissement efficace du panneau PV. Par ailleurs, l'amélioration de l'efficacité du panneau PV refroidi est significative quand la température de l'air ambiant est élevée.

De plus, la température de l'eau de refroidissement influe sur la température d'équilibre et l'efficacité du panneau PV. Ce qui constitue le paramètre important de ce procédé de refroidissement

Références

- [1] Anas Al Tarabsheh, Spyros Voutetakis, Athanasios I. Papadopoulos, Panos Seferlis, Issa Etiera, Omar Saraereh, Investigation of Temperature Effects in Efficiency Improvement of Non-Uniformly Cooled Photovoltaic Cells, *Chemical Engineering Transactions* (2013) Vol. 35.
- [2] A. Muzaffar, Hafiz.M. Ali, W. Moazzam, and M. Babar Saeed, Performance enhancement of PV cells through micro-channel cooling, *AIMS Energy* (2015) 3(4), pp. 699-710.
- [3] Ahmed elnozahy, Ali K. Abdel Rahman, Ahmed Hamza H. Alib, Performance of a PV module integrated with standalone building in hot arid areas as enhanced by surface cooling and cleaning, *Energy and Buildings* (2015) 88, pp. 100–109.
- [4] S. Nizetic, D. Čoko, A. Yadav, F. Grubišić-Čabo, Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response, *Energy Conversion and Management* (2016) 108, pp. 287–296.
- [5] S. Iqbala, S. Afzal, A. U. Mazhar, H. Anjum, A. Diyyane, Effect of Water Cooling on the Energy Conversion Efficiency of PV Cell, *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences 'ASRJETS'* (2016).
- [6] S. Jakhar, Manoj S. Soni and N. Gakkhar, Parametric modeling and simulation of photovoltaic panels with earth water heat exchanger cooling, *Geothermal Energy* (2016).

- [7] K. Sukarno, A. H. Ag Sufiyan, H. Razali, J. Dayou, Evaluation on Cooling Effect on Solar PV Power Output Using Laminar H₂O Surface Method, *International Journal Of Renewable Energy Research* (2017).
- [8] S. Armstrong, W.G. Hurley, A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions, *Applied Thermal Engineering* (2010) 30, pp. 1488-1495.
- [9] Fluent Inc. 2001. *Fluent v.6.1 user's guide*
- [10] J. P. Holman, "Heat Transfer," 8th edition, McGraw-Hill, 1997.
- [11] D.Nebbali, R.Nebbali and A.Ouibrahim, Improving photovoltaic panel performance via an autonomous air cooling system – experimental and numerical simulations, *International Journal Of Ambient Energy* (2018)
- [12] E. Skoplaki, J.A. Palyvos, On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Solar Energy* 83 (2009) pp. 614–624.