

Etude Numérique de l'Influence des Conditions Opératoires sur l'Efficacité Globale d'un Système Photovoltaïque Thermique (PVT)

Numerical Study of the Influence of Operating Conditions on the Overall Efficiency of a Photovoltaic Thermal System

Badiaa RTIMI¹, Hiba AKROUT¹, Hanen AJARI¹, Khaoula HIDOURI¹, Ali BENHMIDENE^{1*}

¹ Laboratoire de recherche: Energie, Eau, Environnement et Procédés, Ecole Nationale d'ingénieurs de Gabes, ali.benhmidene@gmail.com, rtimi.badiaa94@gmail.com, akrouthiba@gmail.com, haneneajari@gmail.com, khaoula2013@yahoo.fr, * auteur correspondant

RÉSUMÉ. Les panneaux photovoltaïques (PV) sont largement utilisés dans les systèmes d'énergie solaire, convertissant directement la lumière du soleil en électricité. Avec la demande croissante de sources d'énergie renouvelable, les panneaux PV ont suscité une attention considérable en raison de leur capacité à générer une énergie propre et durable. Cependant, la performance des panneaux PV est influencée par divers facteurs tels que la conception, les matériaux utilisés ainsi que les facteurs environnementaux. Le refroidissement est un aspect crucial dans le fonctionnement des panneaux PV car les températures élevées peuvent avoir un impact significatif sur leur efficacité et leur performance globale. Le refroidissement à l'eau chargée en nanofluides s'est révélé être une stratégie prometteuse pour atténuer les problèmes liés à la température et améliorer la production d'énergie des panneaux PV. Ce résumé se concentre sur l'application des techniques de refroidissement à l'eau chargée en nanofluides dans les panneaux PV et leur impact sur les performances. Cet article explore l'influence de paramètres tels que le débit massique, la concentration en nanofluides et le type de nanofluide sur la réduction de la température des cellules et les efficacités thermique et électrique résultantes d'un panneau PV situé dans la région de Gabès. L'étude examine trois cas : un panneau PV autonome, un système PV/T avec refroidissement à l'eau et un système PV/T avec refroidissement aux nanofluides. Afin de maximiser l'interaction entre le fluide de refroidissement et la face arrière du panneau solaire, les fluides testés circulent à travers un échangeur de chaleur rectangulaire.

ABSTRACT. Photovoltaic (PV) panels are an integral part of solar energy systems, converting sunlight directly into electricity. With the increasing demand for renewable energy sources, PV panels have gained significant attention due to their ability to generate clean and sustainable power. However, the performance of PV panels is influenced by various factors, including their design, materials, operating conditions, and environmental factors. Cooling is a crucial aspect in the operation of PV panels, as high temperatures can significantly affect their efficiency and overall performance. Water and nanofluid cooling have emerged as promising strategies to mitigate temperature-related issues and enhance the energy output of PV panels. This abstract focuses on the application of water and nanofluid cooling techniques in PV panels and their impact on performance. This work explores the influence of parameters such as mass flow rate, nanofluid concentration, and nanofluid type on cell temperature reduction and resulting thermal and electrical efficiencies of a PV panel situated in the Gabes region. The study considers three cases: a standalone PV panel, a PV/T system with water cooling, and a PV/T system with nanofluid cooling. To maximize the interaction between the cooling fluid and the back surface of the solar panel, the tested fluids are circulated through a rectangular heat exchanger.

MOTS-CLÉS. Panneau PV, eau, nanofluide, refroidissement, efficacité.

KEYWORDS. PV panel, water, nanofluid, cooling, efficiency.

1. Introduction

La consommation mondiale d'eau augmente à un rythme deux fois supérieur à celui de la croissance démographique en raison de l'élévation des niveaux de vie [MEC 16]. Ainsi, selon les estimations, la consommation mondiale d'eau devrait augmenter de 50 % au cours des cinq prochaines années [AER 16]. L'utilisation d'unités de dessalement par osmose inverse (RO) a considérablement augmenté en raison de la pénurie d'eau. Bien que des améliorations constantes de l'efficacité aient été réalisées, le dessalement par RO reste un processus énergivore. L'exploitation de l'énergie solaire thermique pour le dessalement de l'eau est une solution prometteuse pour répondre aux besoins croissants en eau potable

dans les régions arides. Ce procédé utilise la chaleur solaire pour évaporer l'eau salée ou saumâtre, la vapeur d'eau est ensuite condensée pour obtenir de l'eau douce. Les technologies de distillation pour le dessalement de l'eau font l'objet de nombreuses recherches afin d'améliorer leur efficacité, leur rentabilité et leur durabilité. Les chercheurs explorent différentes approches telles que la conception de nouveaux types de distillateurs, l'utilisation de matériaux innovants et le développement de systèmes hybrides intégrant d'autres sources d'énergie [HID17]. Les résultats d'une étude énergétique, exergétique et entropique d'un distillateur solaire simple et hybride ont montré que le distillateur solaire hybride présentait des performances améliorées par rapport au distillateur solaire simple, en termes de production d'eau douce et d'utilisation de l'énergie [AKR 22].

Part ailleurs, plusieurs recherches sont focalisées sur l'exploitation de l'énergie solaire via des panneaux solaires photovoltaïques (PV), pour alimenter des installations de RO à petite échelle [RTI 23]. Les performances des panneaux solaires dépendent fortement des conditions météorologiques. Toutefois, étant donné la variabilité climatique mondiale et l'installation de panneaux solaires dans des climats divers à travers le monde, la plupart d'entre eux ne parviennent pas à fonctionner de manière optimale dans toutes les conditions [SHE 21]. Pour surmonter ce problème, il est essentiel de comprendre comment les panneaux solaires réagissent à ces différentes conditions [MIA 19]. En réalité, l'efficacité électrique du module PV est affectée par l'augmentation de sa température de surface [IDO 18]. Par exemple, l'efficacité des cellules solaires en silicium cristallin diminue de 0,5 % pour chaque augmentation de 1 °C de la température de la cellule solaire, et cette diminution d'efficacité varie selon le type de cellule [AME 16]. L'augmentation de la température des cellules photovoltaïques et les pertes thermiques peuvent être réduites en utilisant un fluide ininflammable qui circule sous le panneau solaire, agissant ainsi comme un échangeur de chaleur et améliorant ainsi l'efficacité thermique du système. Un tel système peut fournir simultanément de l'énergie thermique et électrique, ce qui est appelé système photovoltaïque thermique (PVT). L'un des avantages du système PVT est la génération combinée d'énergie thermique et électrique, ce qui le rend plus efficace que les collecteurs PV autonomes. Plusieurs études ont utilisé cette technologie et comparé ses performances à celles d'un panneau PV autonome. Par exemple, Yu et al. ont utilisé le panneau PVT et ont montré expérimentalement que le système peut gagner 3,5 % de performance électrique et 324,3 % d'énergie globale en sortie par rapport à un système PV autonome [YU 19]. Dans le même environnement, Singh et al. ont étudié l'effet de l'utilisation d'un écoulement d'eau oscillatoire sur les performances des cellules PV, les résultats montrent un gain d'efficacité électrique de 0,27 % à 1,12 % par rapport à un module PV autonome [SIN 18]. Plusieurs études se sont penchées sur les effets du type et de la concentration de nanofluides sur les performances des panneaux solaires photovoltaïques (PV). Une recherche menée par Jia et al. a examiné l'influence du type de nanofluide et de la concentration volumique sur l'efficacité de conversion PV, la température des cellules PV, ainsi que la puissance thermique et électrique [JIA 20]. Dans cette étude, différents nanofluides tels que $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$, TiO_2/eau et le fluide de base ont été utilisés en tant que fluides de travail. Les résultats ont révélé que les performances du collecteur PVT utilisant le nanofluide $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$ étaient supérieures à celles du collecteur PVT utilisant le nanofluide TiO_2/eau . Lorsque le débit massique du nanofluide était de 0,03 kg/s, la puissance électrique du collecteur PVT était plus élevée que celle du collecteur PVT avec des débits massiques de nanofluide de 0,0005 kg/s, 0,001 kg/s et 0,01 kg/s. Il a été également observé une augmentation de l'écart d'efficacité du panneau avec l'augmentation de la concentration volumique, atteignant 0,28 % lorsque la concentration était de 3 % par rapport à l'eau pur, et de 0,07 % lorsque la concentration varie entre 3 % et 6 %. L'objectif principal de ce travail est d'améliorer l'efficacité des panneaux PVT en utilisant différents nanofluides à l'intérieur du système de refroidissement. Ces fluides circulent à travers un échangeur de chaleur rectangulaire monté à l'arrière du panneau. Les effets de la fraction massique de nanoparticules ($1\% \leq \phi \leq 9\%$) et du débit de nanofluide (0,001 kg/s - 0,02 kg/s) sont étudiés numériquement à l'aide du logiciel Matlab. L'influence de la fraction massique et du débit de fluide pour différentes nanoparticules est simulée.

2. Modèle théorique

Le modèle est obtenu en utilisant des bilans énergétiques sur les différents composants du panneau photovoltaïque (PV).

2.1. Equations de bilans énergétiques du panneau photovoltaïque (PV)

La figure 1 représente les composants d'un panneau photovoltaïque [RTI 22].

2.1.1. Bilan énergétique du verre

La température du verre T_g est donnée par le bilan énergétique suivant [AME 16]:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{m_g c_g} (\alpha_g I_G - P_{conv} - P_{ray} - P_c) \quad (1)$$

La puissance absorbée est $P_{in} = \alpha_g I_G$, où α_g est le facteur d'absorption du verre et I_G est l'irradiance solaire. La puissance convective échangée avec l'extérieur est donnée par [AME 16] :

$$P_{conv} = h_{vv} \times A_g \times (T_g - T_a) \quad (2)$$

Où h_{vv} est le coefficient de transfert de chaleur par convection dû au vent.

Le verre échange de l'énergie par rayonnement avec le ciel selon l'équation [AME 16] :

$$P_{ray} = \sigma \times \varepsilon_g \times A_g \times (T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (3)$$

La puissance thermique échangée par conduction dans les cellules du panneau P_c est donnée par [AME 16] :

$$P_c = \frac{k_g}{\delta_g} \times A_g \times (T_g - T_c) \quad (4)$$

k_g , A_g et δ_g sont respectivement la conductivité thermique, la surface et l'épaisseur de la couche de verre.

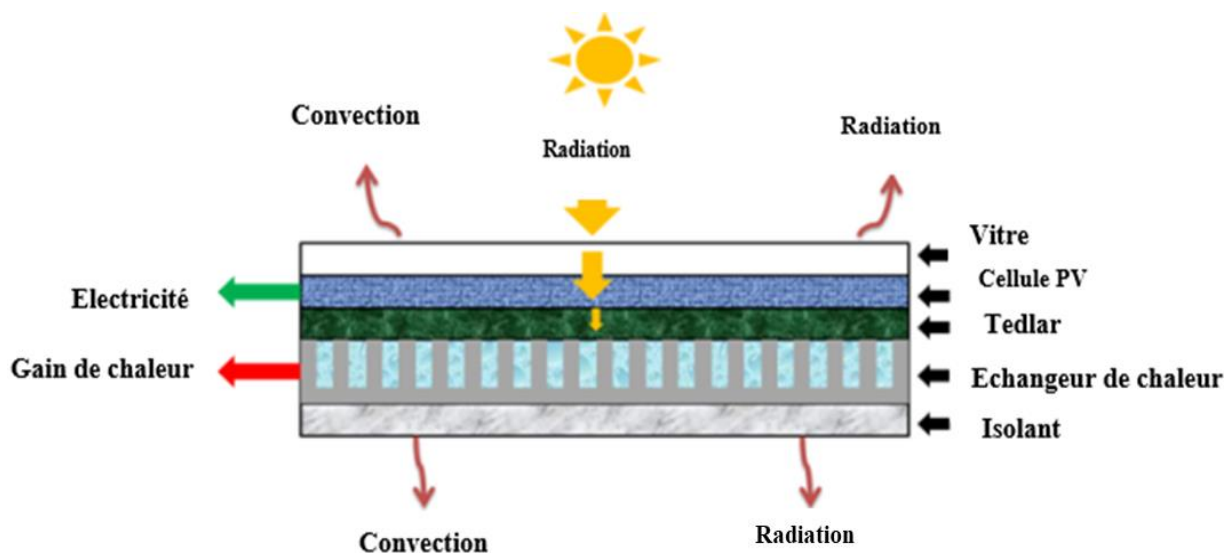


Figure 1. Composants du panneau PV

2.1.2. Bilan thermique sur la cellule PV

La variation de la température de la cellule (T_c) par rapport au temps est donnée par l'équation différentielle suivante [AME 16]:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{m_{cc}} (\tau_g A_g \alpha_c \beta_c I_G + P_c - P_{ct} - E_c A_c) \quad (5)$$

La puissance échangée par conduction entre la cellule et la couche de Tedlar est exprimée par:

$$P_{ct} = h_{cc} A_c (T_c - T_t) \quad (6)$$

Où h_{cc} est le coefficient de transfert de chaleur conductid entre la cellule et la couche de Tedlar. La puissance thermique absorbée par les cellules peut être obtenue à partir de l'équation:

$$P_c = \alpha_c \tau_g \beta_c I_G A_g \eta_c \quad (7)$$

α_c, β_c et η_c sont respectivement le facteur d'absorption, le facteur de remplissage et l'efficacité de la cellule solaire. τ_g est la transmittance du verre.

L'énergie électrique générée par un panneau solaire est calculée comme suit:

$$E_c = \alpha_c \tau_g \beta_c I_G A_g \eta_{ref} (1 - \theta(T_c - T_{c,ref})) \quad (8)$$

$T_{c,ref}$ est la température de référence de la cellule.

2.1.3. Bilan énergétique sur le Tedlar

La puissance thermique stockée par la couche de Tedlar est déterminée à partir de l'équation [AME 16]:

$$\frac{dT_t}{dt} = \frac{1}{m_{tc}} (P_{ct} - P_{tf} - P_{rt} + A_t P_t) \quad (9)$$

La puissance P_{tf} échangée par convection entre le Tedlar et le fluide est donnée par:

$$P_{tf} = h_{vt} A_t (T_t - T_f) \quad (10)$$

La puissance échangée par rayonnement entre le Tedlar et les parois du tuyau est:

$$P_{rt} = h_{rt} A_t (T_t - T_{co}) \quad (11)$$

Où h_{rt} est le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement, T_t est la température du Tedlar et T_{co} est la température des parois du tuyau. La puissance thermique absorbée par le Tedlar est donnée par:

$$P_t = \tau_g (1 - \beta_c) \alpha_t I_G \quad (12)$$

2.1.4. Bilan énergétique sur le fluide de refroidissement

Le bilan énergétique appliqué au fluide de refroidissement donne l'équation suivante [AME 16] :

$$\frac{dT_f}{dt} = \frac{1}{m_f c_f} ((C_f \dot{m}_f T_{i,f} - C_f \dot{m}_f T_{o,f}) A_f + P_{tf} - P_{fco} - P_{ext}) \quad (13)$$

T_{if} et T_{of} représentent respectivement la température du fluide à l'entrée et à la sortie. La puissance thermique échangée entre le fluide et l'extérieur est donnée par :

$$P_{ext} = Nu \times kf \times S \times \frac{(T_f - T_{amb})}{D_h} \quad (14)$$

S représente la section d'écoulement et D_h est le diamètre hydraulique.

La puissance échangée par convection entre le fluide et le conduit est calculée par :

$$P_{fco} = A_f h_f (T_f - T_{co}) \quad (15)$$

L'efficacité thermique du fluide est calculée en utilisant l'expression suivante [AME 16]:

$$\eta_{th} = \frac{C_f \dot{m}_f T_{o,f} - C_f \dot{m}_f T_{i,f}}{S \times I_G} \quad (16)$$

où C_f représente la capacité thermique spécifique du fluide.

3. Résultats de simulation

L'objectif de cette étude numérique est de sélectionner des nanoparticules appropriées pour l'échangeur de chaleur. Dans le but d'atteindre cet objectif, les nanomatériaux suivants ont été considérés : Al_2O_3 , Cu, SWCNT, MgO, SiO_2 . La simulation numérique est réalisée à l'aide du logiciel Matlab. Les considérations suivantes ont été prises en compte :

- Les calculs sont effectués à partir d'un instant initial "t0" pour chaque composant, à une température initiale égale à la température ambiante ;
- Les données météorologiques de la région de Gabes, située dans le sud de la Tunisie, sont prises en compte, avec une latitude de $33^\circ 53' 17.077''N$ et une longitude de $10^\circ 5' 51.079''E$. Le choix du nanofluide le plus adapté est basé sur son effet sur les caractéristiques du panneau PVT, à savoir:
 - La température de la cellule ;
 - L'efficacité électrique et thermique du panneau.

3.1. Effet du débit massique

Afin d'améliorer l'efficacité électrique, le panneau PV devrait être refroidi à l'aide d'un mécanisme d'échange de chaleur utilisant des flux de fluides tels que des nanofluides. Le refroidissement peut améliorer l'efficacité électrique et réduire le taux de dégradation des cellules avec le temps, ce qui permet de maximiser la durée de vie des modules photovoltaïques. La figure 2 montre la variation de la température de la cellule pour différentes valeurs de débit. En augmentant le débit, la température de la cellule diminue progressivement. En effet, pour un débit égal à 0,001 kg/s, cette température passe de $53^\circ C$ pour SWCNT à $46,7^\circ C$ pour MgO. En augmentant le débit à 0,01 kg/s, la valeur de température la plus élevée de $42,39^\circ C$ est enregistrée pour SWCNT, tandis que la valeur la plus basse de $41,63^\circ C$ est enregistrée pour MgO. Pour un débit égal à 0,02 kg/s, la valeur la plus basse de la température de la cellule est de $40,51^\circ C$ lors de l'utilisation de MgO. Cette réduction de la température de la cellule est due au fait que le nombre de Reynolds augmente lorsque le débit massique augmente, ce qui augmente finalement le coefficient de transfert de chaleur des tubes. Par conséquent, plus de chaleur est dissipée de la cellule pour des débits plus élevés dans la plage considérée.

En augmentant le débit de nanofluide, la température de la cellule diminue et par conséquent, l'efficacité électrique augmente (figure 3). Pour un débit égal à 0,001 kg/s, la valeur minimale d'efficacité enregistrée est de 12,42 % pour SWCNT et la valeur maximale est de 12,86 % dans le cas de MgO. En augmentant le débit d'eau, l'efficacité augmente progressivement pour tous les types de nanofluides et l'écart entre eux devient très faible, en particulier pour des débits supérieurs à 0,01 kg/s. En effet, pour un débit égal à 0,02 kg/s, la valeur minimale d'efficacité enregistrée est de 13,92 % pour SWCNT et la valeur maximale est de 13,95 % dans le cas de MgO et Al_2O_3 .

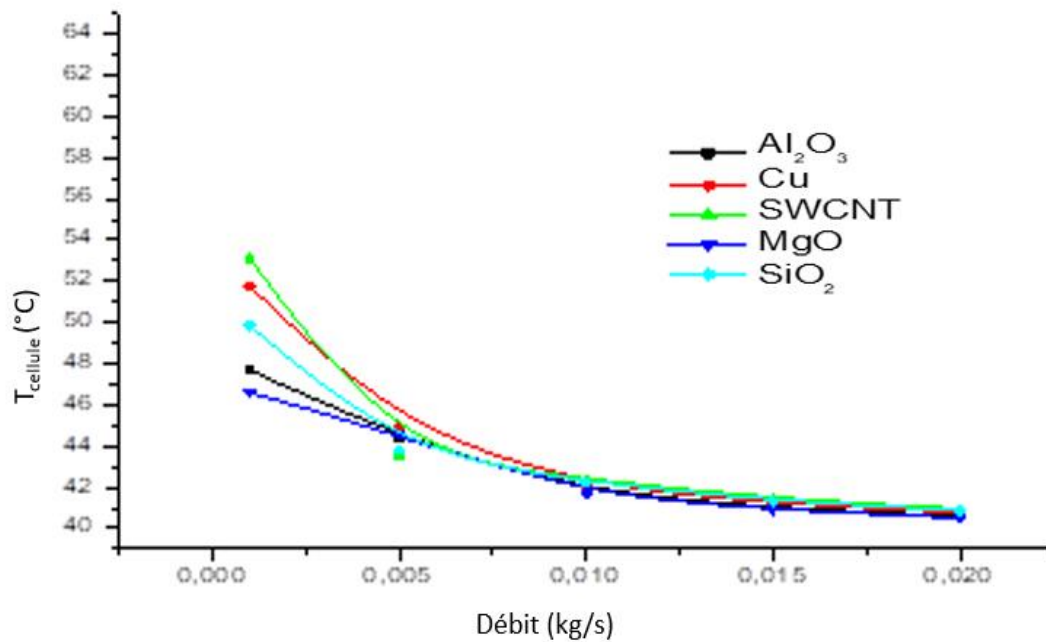


Figure 2. Effet du débit massique sur la température de cellule

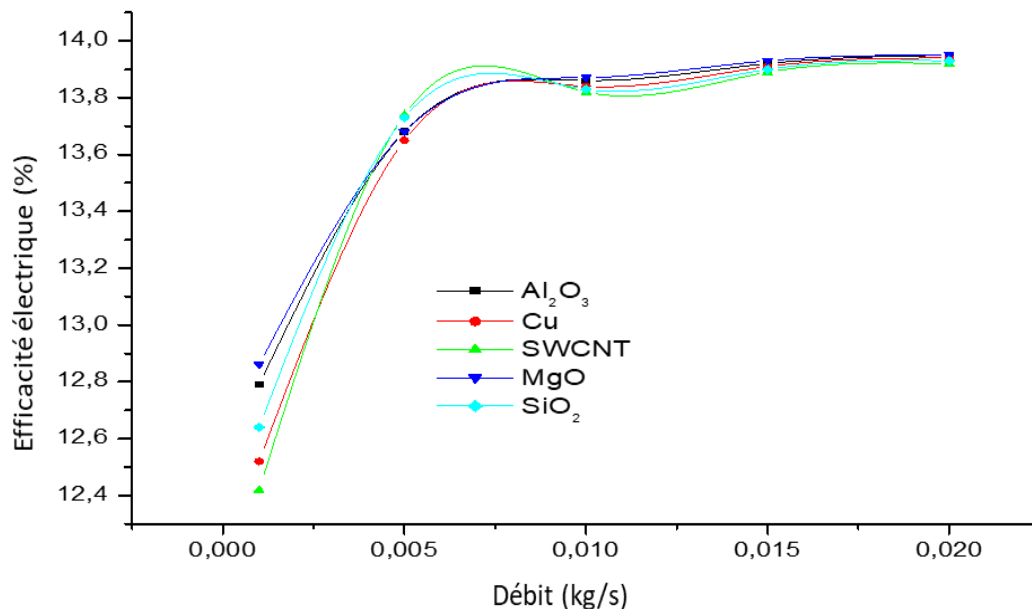


Figure 3. Effet du débit sur l'efficacité électrique

L'efficacité thermique présente un comportement différent en fonction du débit de nanofluide. En effet, la figure 4 montre que pour des débits allant de 0,001 kg/s à 0,005 kg/s, l'efficacité thermique augmente lentement. Pour des débits allant de 0,005 kg/s à 0,02 kg/s, les rendements augmentent bien plus rapidement. La valeur maximale de rendement enregistrée est de 80,13 % pour MgO, pour un débit de 0,02 kg/s. En résumé, le débit du fluide de base a une influence significative sur la température de la cellule, ainsi que sur l'efficacité électrique et thermique. Selon les figures précédentes, si le débit dépasse 0,01 kg/s, les différences de performances entre les différents nanofluides deviennent faibles. Par conséquent, le débit optimal à choisir est de 0,01 kg/s.

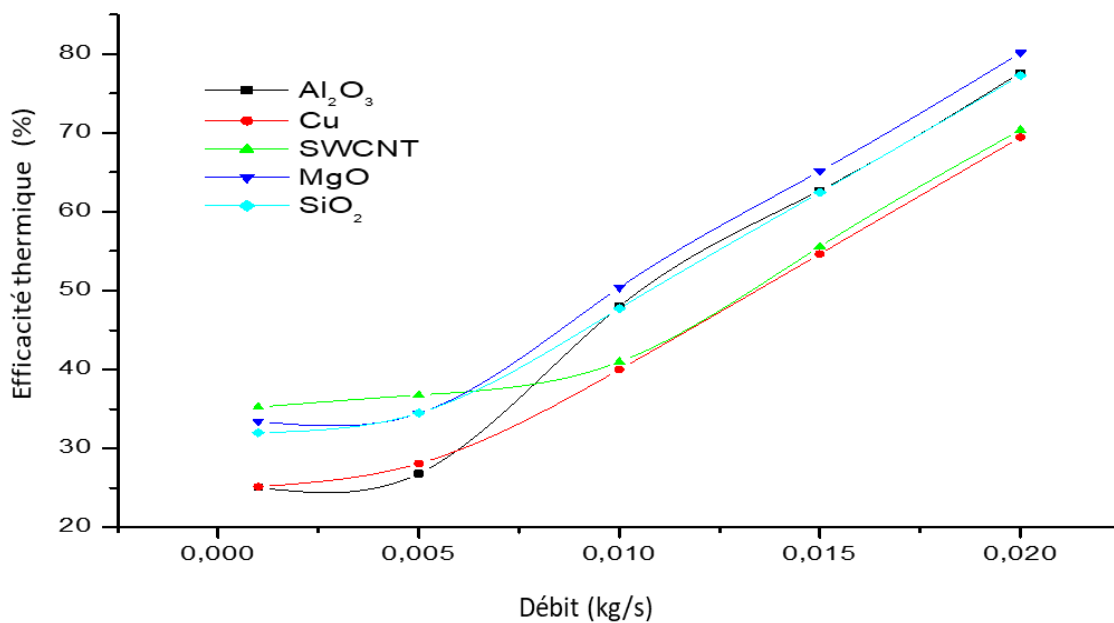


Figure 4. Effet du débit sur l'efficacité thermique

3.2. Effet de la fraction massique

La figure 5 montre la variation de la température de la cellule pour différentes fractions de nanofluides allant de 1 à 9 %, pour un débit égal à 0,01 kg/s. Les valeurs maximales de température sont enregistrées pour SWCNT, allant de 44,43 °C ($\phi = 1\%$) à 40,23 °C ($\phi = 9\%$). Le nanofluide qui présente les meilleures performances est MgO, garantissant une température minimale de la cellule, la température passant de 43,53 °C ($\phi = 1\%$) à 39,88 °C ($\phi = 9\%$).

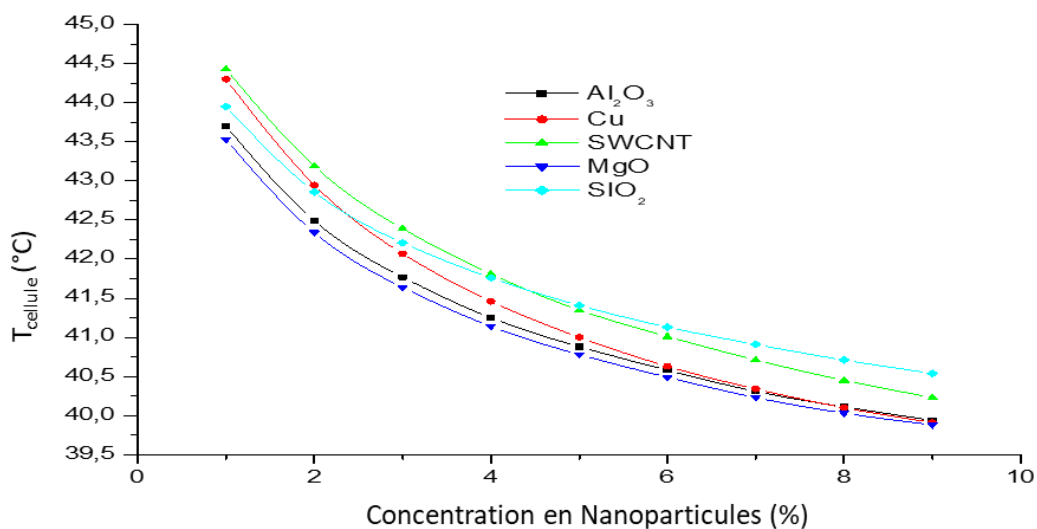


Figure 5. Effet de la fraction massique des nanofluides sur la température de la cellule

En augmentant la fraction de nanofluide, l'efficacité électrique augmente progressivement. En se référant à la figure 6, les nanofluides les plus performants sont respectivement le MgO et l'Al₂O₃. Pour une fraction de $\phi = 1\%$, l'efficacité maximale enregistrée est de 13,75 % pour le MgO et l'efficacité minimale est de 13,69 % pour le SWCNT. Pour une fraction de $\phi = 9\%$, le rendement maximal enregistré est de 13,99 % pour le MgO et le rendement minimal est de 13,95 % pour le SiO₂. La figure 7 illustre la variation de l'efficacité thermique pour différentes valeurs de la fraction de nanoparticules. En examinant cette figure, nous constatons les observations suivantes: l'efficacité thermique augmente avec la fraction massique de particules. Le nanofluide le moins performant est le Cu, qui garantit une efficacité minimale : pour $\phi = 1\%$, l'efficacité est de 37,20 % et pour $\phi = 9\%$, l'efficacité est de

54,1 %. Le nanofluide le plus performant est le MgO, les rendements enregistrés sont de 39,51 % ($\phi = 1$ %) et 86,76 % ($\phi = 9$ %).

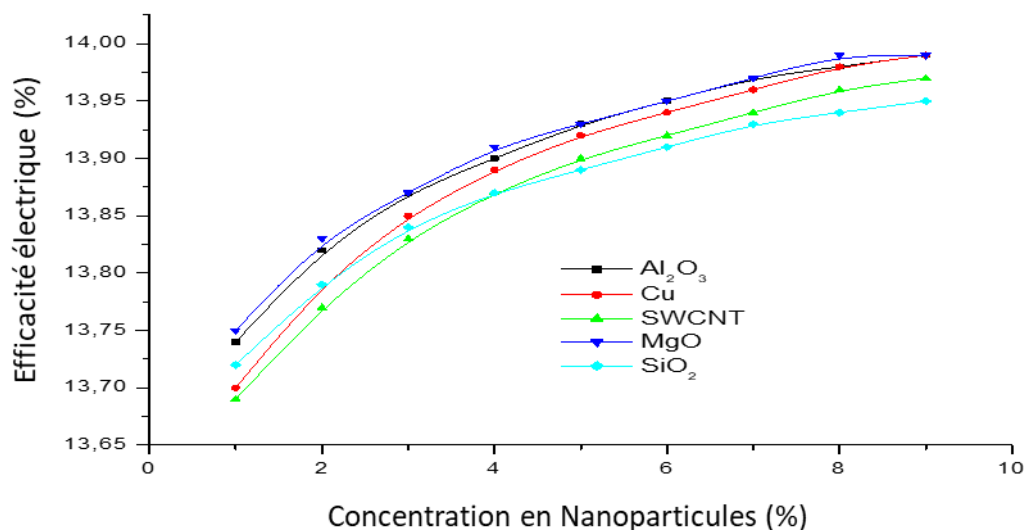


Figure 6. Effet de la fraction massique des nanofluides sur l'efficacité électrique

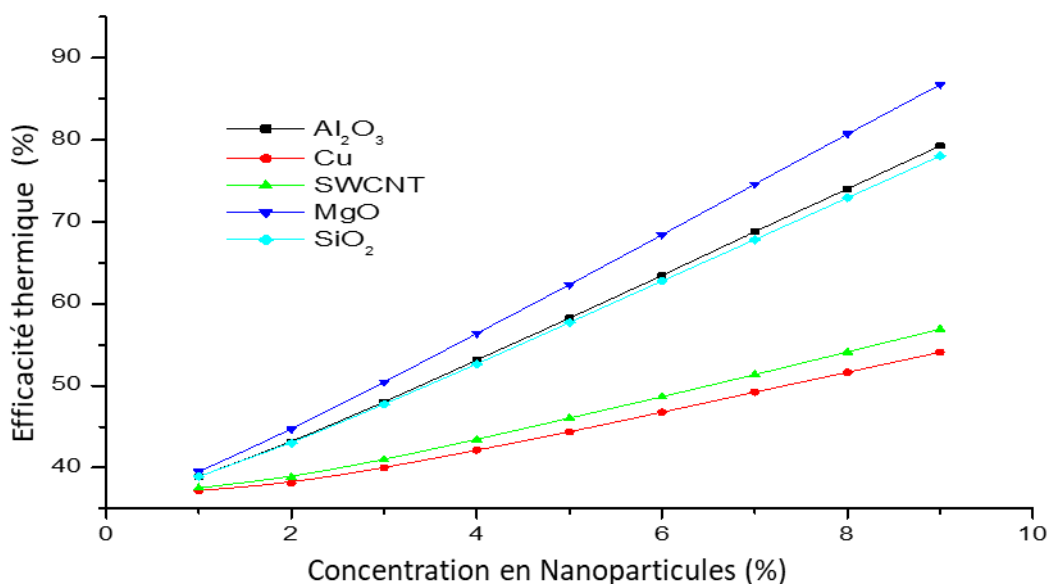


Figure 7. Effet de la fraction massique des nanofluides sur l'efficacité thermique

La fraction massique de nanofluide est un paramètre très important à étudier. En examinant les figures 5, 6 et 7, nous constatons que le comportement de chaque nanofluide diffère d'un intervalle de fraction de masse à un autre. Dans chaque intervalle, les performances des nanofluides sont différentes. Pour la température de la cellule et l'efficacité électrique, les performances de tous les nanofluides à n'importe quelle valeur de fraction massique sont similaires, mais pour l'efficacité thermique, l'écart se creuse. L'augmentation de la fraction massique du nanofluide améliore le coefficient de transfert de chaleur du fluide utilisé et donc les performances du système étudié. Cependant, avec une fraction massique élevée, de nombreux paramètres augmentent tels que le coût de mise en œuvre, l'instabilité du fluide (en raison de l'agglomération), le facteur de frottement et l'énergie requise pour le pompage du nanofluide ainsi que la corrosion globale du système. En tenant compte de tous ces facteurs, la fraction optimale choisie est de 3 % pour la suite de l'étude.

4. Conclusion

Ce document présente la modélisation du comportement thermique d'un panneau hybride PVT avec un échangeur de chaleur rectangulaire. Les équations d'énergie pour les différents composants du panneau PVT sont résolues à l'aide de la méthode de Runge-Kutta dans le logiciel Matlab. Les résultats de la simulation montrent l'effet de certains paramètres tels que le débit de nanofluide, la fraction de masse de nanoparticules et le type de nanoparticules sur les performances d'un panneau solaire. En ce qui concerne la température de la cellule et l'efficacité électrique, les performances de tous les nanofluides à n'importe quelle valeur de fraction massique sont similaires, mais pour l'efficacité thermique, l'écart augmente. L'augmentation de la fraction massique du nanofluide améliore le coefficient de transfert de chaleur du fluide utilisé et donc les performances du système étudié. L'efficacité thermique présente un comportement différent en fonction du débit de nanofluide. Pour les débits allant de 0.001 kg/s à 0.005 kg/s, l'efficacité thermique augmente lentement. Pour les débits allant de 0.005 kg/s à 0.02 kg/s, les rendements augmentent plus rapidement. La valeur maximale de rendement enregistrée est de 80.13 % pour MgO et pour un débit égal à 0.02 kg/s.

Bibliographie

- [AER 16] Aerni P., «Coping with migration-induced urban growth: Addressing the blind spot of UN habitat», *Sustainability*, n°8, p. 800,2016.
- [AKR 22] Akrouf H., Hidouri K., Benhmidene A., Chaouachi B., « Energetic, exergetic and entropic study in a simple and hybrid solar distiller », *International Journal of Ambient Energy*, n°1,p- 2520-2527,2022.
- [AME 16] Amelia A. R., Irwan Y. M., Leow W. Z., Irwanto M., Safwati, I., Zhafarina M., « Investigation of the effect temperature on photovoltaic (PV) panel output performance. » *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol*, n° 5, p.682-688, 2016.
- [HID 17] Hidouri K., Benhmidene A., Chouachi B., “Comparative study of experimental and theoretical convective, evaporative for two model distiller”, *Int. J. of chem., mol., Nucl., Mat., and Metallurgical Engineering*, 4, 2017.
- [IDO 18] Idoko L., Anaya-Lara O., McDonald A., «Enhancing PV modules efficiency and power output using multi-concept cooling technique», *Energy Reports*, p. 357-369,2018.
- [JIA 20] Jia Y., Ran F., Zhu C., Fang G., “Numerical analysis of photovoltaic-thermal collector using nanofluid as a coolant”. *Solar Energy*, p. 625-636, 2020.
- [MEK 16] Mekonnen M. M., Hoekstra A. Y., « Four billion people facing severe water scarcity », *Science advances*, n°2, p. 1500323,2016.
- [MIA 19] Miadi R., Benhmidene A., Hidouri K., Chaouachi B., “Comparative study of phosphate solar drying processes”, *Int. J. Amb. Energy*, p. 570-577, 2019.
- [RTI 22] Rtimi B., Benhmidene A., Chaouachi B., “Effect of nanofluid flow in a rectangular heat exchanger on the performance of a photovoltaic panel” *J. Thermal Sci. Eng. Appl.*p. 1-32, 2022.
- [RTI 23] Rtimi B., Benhmidene A., Hidouri K., Chaouachi B., “Use of nanofluid to improve the efficiency of photovoltaic panel”, Chapter in *Proceedings of the 3rd International Congress of Applied Chemistry & Environment (ICACE-3)*. p. 35-45, 2023
- [SIN 18] Singh S., Singh R. K., & Tiwari G. N, « Effect of Oscillatory Water Flow on the Performance of Photovoltaic Thermal System in Summer Condition. » In *2018 International Conference on Computational and Characterization Techniques in Engineering & Sciences (CCTES)*, IEEE., Septembre 2018
- [SHE 21] Sheps R., Golovinsky P., Yaremenko S., Shchukina T, «New passive solar panels for Russian cold winter conditions», *Energy and Buildings*, p. 111187, 2021.
- [YU 19] Yu M., Chen F., Zheng S., Zhou J., Zhao. X., Wang Z., Hardy D., «Experimental investigation of a novel solar micro-channel loop-heat-pipe photovoltaic/thermal (MC-LHP-PV/T) system for heat and power generation. » *Applied Energy*, p. 113929, (2019).