

Analyse des Performances Thermoélectriques d'un Capteur Solaire Hybride PV/T à Air : Influence du Nombre d'Ailettes et de la Vitesse d'Écoulement

Thermoelectric Performance Analysis of an Air-Based Hybrid PV/T Solar Collector : Effect of Fins Number and Airflow Velocity

Ranim Beji^{1,2*}, Jian Lin³, Hatem Oueslati², Monica Siroux³

¹École Supérieure des Sciences et de la Technologie de Hammam Sousse (ESSTHS), Université de Sousse, Tunisie

²Laboratoire des Procédés Thermiques (LPT), Centre de Recherches et des Technologies de l'Énergie (CRTEn), B.P. 95, 2050 Hammam-Lif, Tunisie

³Laboratoire ICUBE, INSA Strasbourg, Université de Strasbourg, 67000 Strasbourg, France

*(auteur correspondant : ranyambeji8@gmail.com)

Résumé - Cette étude analyse l'optimisation des performances thermoélectriques d'un capteur solaire hybride photovoltaïque/thermique (PV/T) à air. Un modèle dynamique basé sur des équations différentielles ordinaires est développé pour étudier l'effet du nombre d'ailettes et de la vitesse d'écoulement sur le refroidissement des cellules et la récupération de chaleur. Les simulations Matlab sont validées expérimentalement sur un capteur PV/T instrumenté au CRTEn, avec un écart inférieur à 5 %. Les résultats montrent qu'augmenter les ailettes et la vitesse de l'air améliore significativement la puissance thermique, tandis que le rendement électrique reste stable (11,5–16 %). Ces performances ouvrent la voie à des approches d'optimisation avancées.

Nomenclature

Grandeurs principales

A_{pv} surface du module PV, m²
 A_{eff} surface d'échange ailetée, m²
 A_f surface d'une ailette, m²
 m_{pv} masse des cellules PV, kg
 $\dot{m}$ débit massique de l'air, kg.s⁻¹
 c_{pv} capacité calorifique des cellules PV, J.kg⁻¹.K⁻¹
 C_f capacité calorifique de l'air, J.kg⁻¹.K⁻¹

Températures

T_{PV} température des cellules PV, K
 T_{air} température de l'air, K
 T_{amb} température ambiante, K
 T_{ciel} température du ciel, K

Énergies et performances

G irradiance solaire, W.m⁻²
 P_{el} puissance électrique, W
 Q_u puissance thermique utile, W
 η_{el} rendement électrique
 η_{th} rendement thermique
 P_{STC} puissance nominale, W
 γ_{pv} coefficient de température, K⁻¹

Écoulement

V_w vitesse de l'air, m.s⁻¹

Transferts thermiques

h_{pv-air} convection PV/air, W.m⁻².K⁻¹
 $h_{c,v-a}$ convection verre-air, W.m⁻².K⁻¹
 $h_{c,ab-f}$ convection absorbeur-fluide, W.m⁻².K⁻¹
 $h_{c,is-f}$ convection isolant-fluide, W.m⁻².K⁻¹
 $h_{c,is-a}$ convection isolant-air, W.m⁻².K⁻¹
 $h_{r,v-c}$ rayonnement verre-ciel, W.m⁻².K⁻¹
 $h_{r,ab-is}$ rayonnement absorbeur-isolant, W.m⁻².K⁻¹
 $h_{r,is-s}$ rayonnement isolant-sol, W.m⁻².K⁻¹
 $h_{cd,v-c}$ conduction verre-PV, W.m⁻².K⁻¹
 $h_{cd,c-t}$ conduction PV-Tedlar, W.m⁻².K⁻¹
 $h_{cd,t-ab}$ conduction Tedlar-absorbeur, W.m⁻².K⁻¹

Ailettes

η_f efficacité des ailettes
 U_f coefficient global des ailettes, W.m⁻².K⁻¹
 N nombre d'ailettes

Divers

α absorbance optique
 U_{loss} pertes thermiques globales, W.m⁻².K⁻¹
 in, out, amb entrée/sortie ambient

1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques/thermiques (PV/T) permettent de produire simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir d'un même module, améliorant ainsi l'efficacité énergétique globale, le rendement des modules photovoltaïques diminuant avec la température des cellules [1]. Les capteurs PV/T à air constituent une solution simple et économique, mais leurs performances restent limitées par le faible coefficient de convection de l'air.

L'ajout d'ailettes permet d'augmenter la surface d'échange et d'améliorer l'extraction de la chaleur [2], tandis que la vitesse d'écoulement de l'air influence fortement les performances thermoélectriques [3]. D'autres travaux ont étudié l'effet de la conception géométrique [4], l'utilisation de la thermographie infrarouge [5], l'intégration de matériaux à changement de phase [6], les analyses exergetiques [7] et le couplage avec des réservoirs d'eau chaude [8]. Cependant, peu d'études analysent conjointement l'effet du nombre d'ailettes et de la vitesse de l'air dans une configuration PV/T à air instrumentée.

Dans ce contexte, ce travail propose une analyse numérique et expérimentale d'un capteur PV/T à air muni d'un absorbeur aileté. Un modèle dynamique est développé et validé sur un prototype instrumenté au CRTEn (Tunisie) afin d'évaluer l'influence du nombre d'ailettes et de la vitesse de l'air sur les performances thermoélectriques.

1.1. Description du système étudié

Le système étudié est un capteur hybride PV/T à air développé au LPT du CRTEn (Borj Cédria). Il repose sur un module photovoltaïque polycristallin IF-P280-60 (280 W, 60 cellules), encapsulé entre un verre trempé et une feuille Tedlar. Un canal d'air rectangulaire, isolé par mousse de polyuréthane, assure la circulation du fluide et l'extraction de la chaleur.

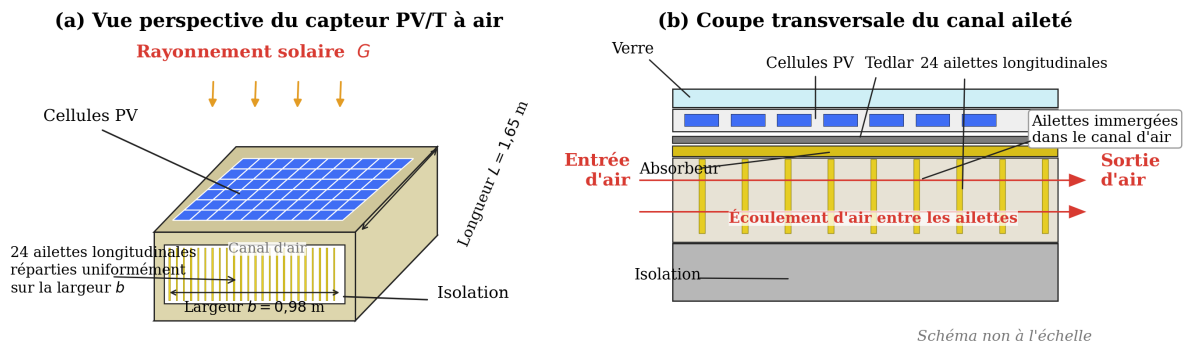


Figure 1 : (a) Vue du capteur PV/T à air avec cellules, canal d'air et 24 ailettes longitudinales. (b) Coupe transversale montrant les couches et l'écoulement d'air entre les ailettes immergées. Schéma non à l'échelle.

Les 24 ailettes sont disposées longitudinalement sous l'absorbeur, à l'intérieur du canal d'air, où l'écoulement se fait entre elles, favorisant l'échange thermique par augmentation de surface et perturbation de l'écoulement. L'instrumentation comprend un pyranomètre, un capteur de vitesse d'air et des thermocouples répartis sur le module et dans le canal. En conditions STC (1000 W.m^{-2} , 25 °C) : $P_{\text{max}} = 280 \text{ W}$, $V_{\text{mp}} = 32,82 \text{ V}$, $I_{\text{mp}} = 8,54 \text{ A}$, $V_{\text{oc}} = 38,7 \text{ V}$ et $I_{\text{sc}} = 8,99 \text{ A}$.

2. Modélisation du système

La modélisation du capteur hybride PV/T repose sur des bilans énergétiques appliqués aux différentes couches du module (verre, cellules photovoltaïques, Tedlar, absorbeur aileté, fluide caloporteur et isolant). Chaque couche est représentée par une équation différentielle ordinaire

intégrant les transferts par conduction, convection et rayonnement, ainsi que la conversion photovoltaïque.

2.1. Modélisation thermique

Les bilans énergétiques sont écrits pour chacune des couches du capteur. Les coefficients d'échange thermique sont évalués à partir des propriétés des matériaux et des conditions climatiques mesurées.

Température radiative du ciel

La température effective du ciel, nécessaire au calcul des échanges radiatifs entre le verre et la voûte céleste, est estimée par la corrélation de Swinbank [9] :

$$T_{ciel} = 0.0552 T_a^{1.5}, \quad (1)$$

où T_a désigne la température ambiante (en Kelvin).

Bilan énergétique du verre

$$M_v C_v \frac{dT_v}{dt} = G \alpha_v + h_{r,v-c}(T_{ciel} - T_v) + h_{c,v-a}(T_a - T_v) - h_{cd,v-c}(T_v - T_c). \quad (2)$$

Bilan énergétique des cellules photovoltaïques

$$M_c C_c \frac{dT_c}{dt} = \tau_v \alpha_c F G + h_{cd,v-c}(T_v - T_c) - h_{cd,c-t}(T_c - T_t) - F \tau_p G \eta_{el}. \quad (3)$$

Le dernier terme correspond à l'énergie extraite sous forme d'électricité.

Bilan énergétique du Tedlar

$$M_t C_t \frac{dT_t}{dt} = h_{cd,c-t}(T_c - T_t) - h_{cd,t-ab}(T_t - T_{ab}). \quad (4)$$

Bilan énergétique de l'absorbeur aileté

$$M_{ab} C_{ab} \frac{dT_{ab}}{dt} = h_{cd,t-ab}(T_t - T_{ab}) - h_{c,ab-f}(T_{ab} - T_f) - h_{r,ab-is}(T_{ab} - T_{is}). \quad (5)$$

Le coefficient global d'échange entre les ailettes et l'air dépend du nombre d'ailettes N et s'écrit :

$$U_f = \frac{N h_{c,ab-f} A_f}{1 + \eta_f N A_f}. \quad (6)$$

Bilan énergétique de l'air dans le canal

$$M_f C_f \frac{dT_f}{dt} = h_{c,ab-f}(T_{ab} - T_f) - h_{c,is-f}(T_f - T_{is}) - \dot{m} C_f (T_{f,out} - T_{f,in}). \quad (7)$$

Bilan énergétique de l'isolant

$$M_{is} C_{is} \frac{dT_{is}}{dt} = h_{r,ab-is}(T_{ab} - T_{is}) + h_{c,is-f}(T_f - T_{is}) - h_{c,is-a}(T_{is} - T_a) - h_{r,is-s}(T_{is} - T_s). \quad (8)$$

2.2. Modèle électrique

La puissance électrique instantanée produite par le module est donnée par :

$$P_{el} = P_{STC} [1 + \gamma_{pv} (T_c - 25^\circ\text{C})], \quad (9)$$

où P_{STC} est la puissance nominale en conditions STC et γ_{pv} le coefficient de température.

Le rendement électrique s'écrit :

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{G A_{pv}}. \quad (10)$$

La puissance thermique utile récupérée par l'air est :

$$\dot{Q}_{th} = \dot{m} C_f (T_{f,out} - T_{f,in}), \quad (11)$$

d'où le rendement thermique :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{th}}{G A_{pv}}. \quad (12)$$

Le rendement global PV/T est défini par :

$$\eta_{PVT} = \eta_{th} + \eta_{el}. \quad (13)$$

2.3. Méthode numérique

Le système d'équations différentielles (2)–(8) constitue un modèle dynamique non linéaire couplé résolu sous MATLAB avec le solveur ODE45 (Runge–Kutta d'ordre 4–5). Les conditions initiales correspondent à un état quasi-isotherme fixé à la température ambiante, et les données climatiques sont issues des mesures expérimentales réalisées au CRTEn. La procédure de résolution numérique est résumée à la Figure 2.

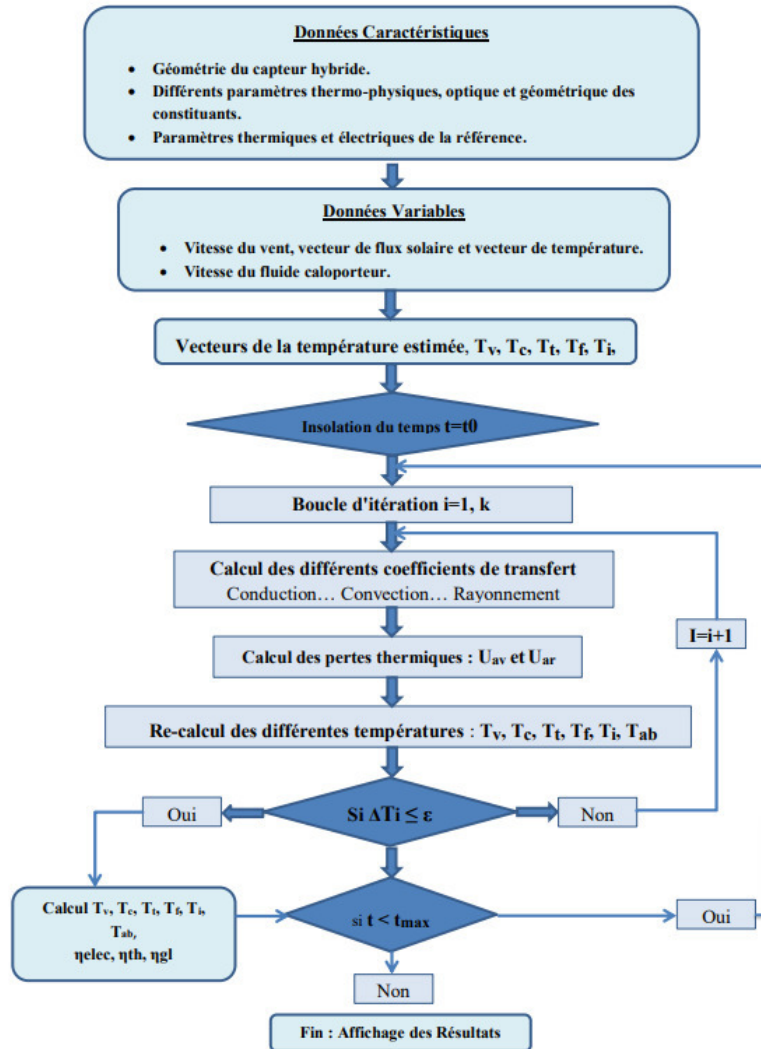


Figure 2 : Diagramme de résolution numérique du système PV/T

2.4. Paramètres géométriques et thermo-physiques

Les principaux paramètres utilisés dans le modèle numérique sont rassemblés dans le Tableau (1).

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Épaisseur du verre	δ_g	0,004	m
Épaisseur des cellules	δ_c	0,0003	m
Épaisseur du Tedlar	δ_{ted}	0,0005	m
Épaisseur absorbeur	δ_{ab}	0,001	m
Épaisseur isolant	δ_i	0,05	m
Chaleur massique verre	C_g	670	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Chaleur massique cellules	C_c	836	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Chaleur massique isolant	C_i	919	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Densité verre	ρ_g	2200	kg.m ⁻³
Densité cellules	ρ_c	2330	kg.m ⁻³
Densité isolant	ρ_i	24	kg.m ⁻³
Masse du verre	M_v	14,52	kg
Masse des cellules	M_c	1,15	kg
Masse de l'isolant	M_{is}	1,98	kg
Conductivité verre	k_g	0,93	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Conductivité cellules	k_c	148	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Conductivité absorbeur	k_{ab}	410	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Absorbance verre	α_g	0,066	—
Absorbance cellules	α_c	0,90	—
Absorbance absorbeur	α_{ab}	0,75	—
Facteur de remplissage	F	0,83	—
Coefficient temp. PV	β_{ref}	0,0045	K ⁻¹
Efficacité de référence	η_0	0,16	%
Vitesse de l'air	V_{air}	2	m.s ⁻¹

Tableau 1 : Paramètres géométriques et thermo-physiques du capteur PV/T

3. Résultats et discussions

3.1. Simulation numérique du modèle PV/T

L'influence du nombre d'ailettes et de la vitesse d'air sur les performances thermoélectriques du capteur PV/T est présentée aux Figures 3 à 5, en termes de rendements, températures et puissances au cours d'une journée claire.

3.1.1. Influence du nombre d'ailettes

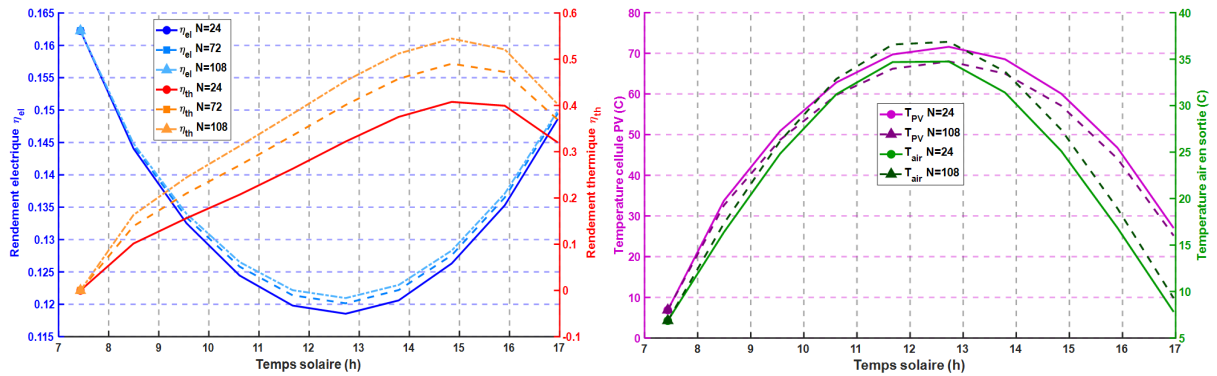


Figure 3 : (a) Influence du nombre d'ailettes sur les rendements électrique et thermique et (b) sur les températures des cellules PV et de l'air de sortie pour $V_w = 2 \text{ m.s}^{-1}$.

La Figure 3(a) montre que l'augmentation du nombre d'ailettes ($N = 24$ à 108) améliore principalement la performance thermique du capteur. Le rendement thermique η_{th} passe d'environ 0,40 pour $N = 24$ à 0,58–0,60 pour $N = 108$ aux heures de fort ensoleillement, en raison

de l'augmentation de la surface d'échange ailetée et des transferts convectifs entre l'absorbeur et l'air. La Figure 3(b) montre également une légère diminution de la température maximale des cellules photovoltaïques, de 72–73 °C pour $N = 24$ à 69–70 °C pour $N = 108$. L'effet sur le rendement électrique η_{el} reste toutefois limité, avec des valeurs comprises entre 0,12 en milieu de journée et 0,16 en début et fin de journée.

3.1.2. Influence de la vitesse de l'air

Le doublement de la vitesse d'écoulement de l'air, de 2 à 4 m.s⁻¹, a un effet plus marqué que l'augmentation du nombre d'ailettes. Comme l'illustre la Figure 4(a), le rendement thermique maximal passe d'environ 0,40 à 0,52–0,54, soit un gain voisin de 30 %, lié à l'augmentation du coefficient de convection et du débit massique d'air.

La Figure 4(b) met aussi en évidence une baisse de la température maximale des cellules, de 70–71 °C à 64–65 °C, soit une réduction de 5 à 6 °C. Cette amélioration du refroidissement se traduit par une légère hausse du rendement électrique, qui demeure néanmoins modérée.

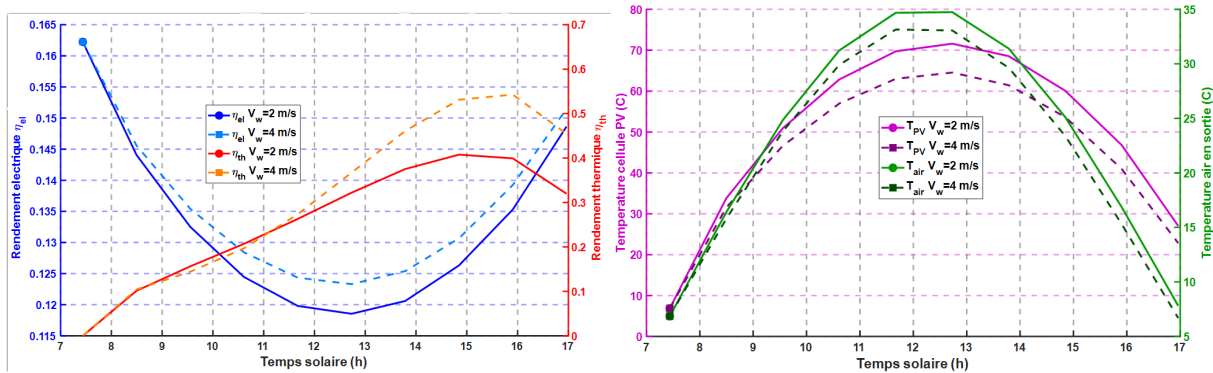


Figure 4 : (a) Influence du doublement de la vitesse d'air sur les rendements électrique et thermique et (b) sur les températures des cellules PV et de l'air de sortie pour $N = 24$.

3.1.3. Synthèse sur les puissances

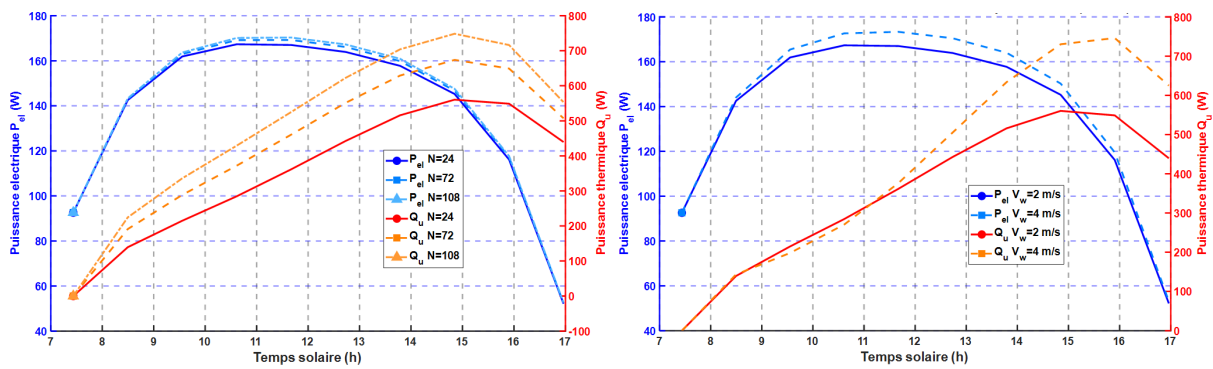


Figure 5 : (a) Puissances électrique P_{el} et thermique Q_u en fonction du nombre d'ailettes pour $V_w = 2$ m.s⁻¹ ; (b) puissances électrique et thermique pour deux vitesses d'air avec $N = 24$ ailettes.

La Figure 5(a) montre que l'augmentation du nombre d'ailettes améliore principalement la puissance thermique utile Q_u , qui passe d'environ 450 W pour $N = 24$ à 600–650 W pour $N = 108$, tandis que la puissance électrique P_{el} reste globalement inchangée (165–170 W). La Figure 5(b) confirme que la vitesse de l'air est le paramètre le plus influent : son doublement (2 à 4 m.s⁻¹) permet d'augmenter Q_u jusqu'à près de 700 W, sans effet notable sur P_{el} . Ainsi, l'optimisation thermique repose principalement sur la vitesse de l'air, les performances électriques restant peu sensibles.

3.2. Validation expérimentale du modèle numérique

L'expérimentation du 26 février 2024 a permis de valider le modèle sur une journée complète. Les mesures, réalisées sur un capteur PV/T instrumenté dans les mêmes conditions, montrent un rayonnement maximal d'environ 900 W.m^{-2} à midi et une température ambiante de 12 à 24 °C. La configuration correspond à $N = 24$ ailettes et $V_w = 2 \text{ m.s}^{-1}$.

3.2.1. Dispositif expérimental et instrumentation

Le dispositif expérimental (Figure 6) comprend un pyranomètre, 28 thermocouples de type K et une chaîne d'acquisition Agilent 34970A. La vitesse d'air est mesurée par capteur de vitesse d'air et le débit imposé par ventilateur, avec acquisition via BenchLink Data Logger.

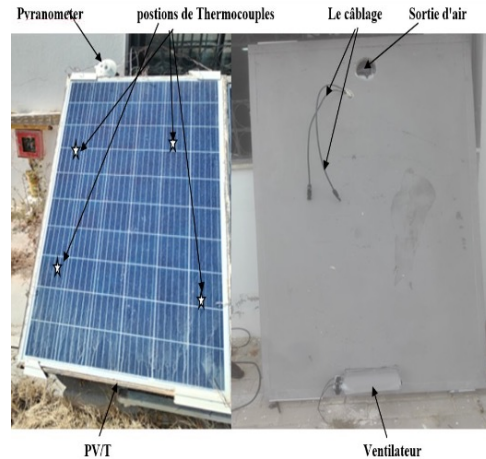


Figure 6 : Vue d'ensemble du dispositif expérimental et de l'instrumentation du capteur PV/T à air.

3.2.2. Validation de la température des cellules photovoltaïques

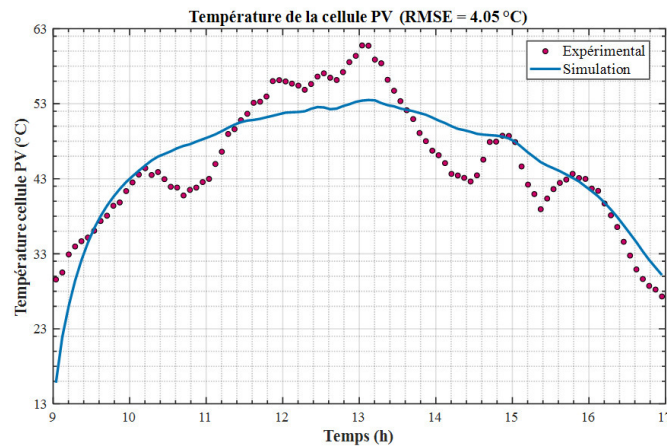


Figure 7 : Températures des cellules : Comparaison des résultats numériques et expérimentaux.

La Figure 7 compare les températures des cellules photovoltaïques obtenues par simulation et expérimentation. Un bon accord est observé sur l'ensemble de la journée, avec une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 4,05 °C, validant la pertinence du modèle thermique. Des écarts locaux pouvant atteindre 10 °C apparaissent à certaines périodes, notamment aux heures de fort rayonnement. Ils sont attribués à des perturbations expérimentales non prises en compte dans le modèle, telles que les variations rapides du rayonnement solaire, les fluctuations du vent ou les incertitudes de mesure. Malgré cela, le modèle reproduit correctement la tendance globale des températures.

3.2.3. Validation des rendements électrique et thermique

La Figure 8 présente la comparaison entre les rendements simulés et mesurés. Le rendement électrique est reproduit avec un excellent accord (RMSE = 0,27 %), tandis que le rendement

thermique présente également un très bon accord global (RMSE = 1,88 %). Malgré ce bon accord global, certaines fluctuations locales des courbes expérimentales ne sont pas entièrement reproduites par le modèle. Ces écarts peuvent être attribués à des variations transitoires des conditions extérieures, telles que le passage nuageux, les rafales de vent ou encore les incertitudes de mesure, qui ne sont pas explicitement prises en compte dans le modèle dynamique.

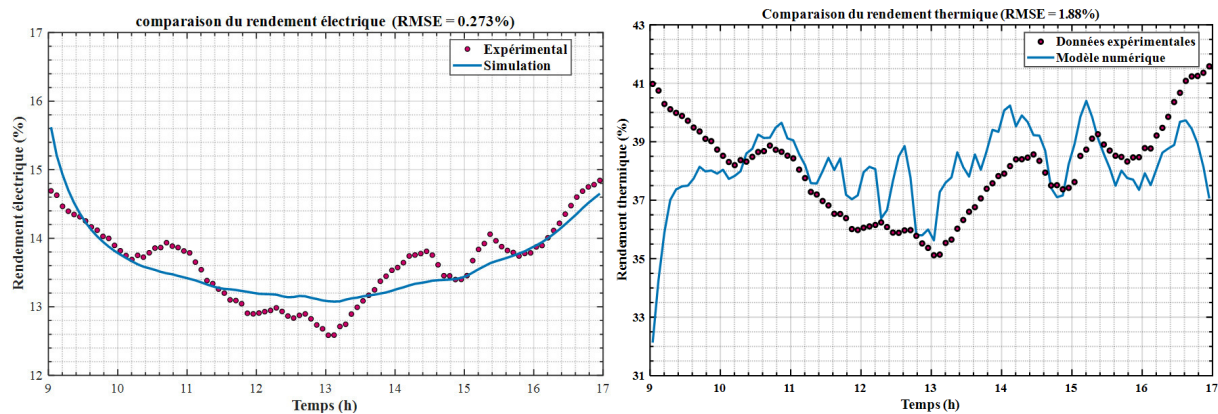


Figure 8 : Comparaison des rendements (a) électrique et (b) thermique obtenus par simulation et par expérimentation (26 février 2024).

Les résultats montrent que le modèle décrit correctement le comportement thermo-électrique du capteur PV/T et peut être utilisé pour l'analyse paramétrique et l'optimisation.

4. Conclusion

Ce travail présente un modèle dynamique validé expérimentalement d'un capteur PV/T à air aileté. L'augmentation du nombre d'ailettes et de la vitesse d'air améliore la puissance thermique, avec un impact limité sur le rendement électrique. La vitesse étant imposée par un ventilateur, une analyse du bilan énergétique global est nécessaire pour évaluer le gain net. Ces résultats ouvrent des perspectives d'optimisation multi-objectif.

Références

- [1] Skoplaki E., Palyvos J.A., "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance : A review of efficiency/power correlations", *Solar Energy*, vol. 83, pp. 614–624, 2009. doi :10.1016/j.solener.2008.10.008.
- [2] Tonui J.K., Tripanagnostopoulos Y., "Improved PV/T solar collectors with heat extraction by fins", *Solar Energy*, vol. 82, no. 2, pp. 107–115, 2008. doi :10.1016/j.solener.2007.06.003.
- [3] Chow T.T., "A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology", *Applied Energy*, vol. 87, pp. 365–379, 2010. doi :10.1016/j.apenergy.2009.06.037.
- [4] Sahlaoui K., Oueslati H., Gammoudi H., Ben Mabrouk S., "Benchmarking and economic analysis of the impact of geometric structural design on the thermoelectric performance of air-cooled photovoltaic thermal systems", *IET Renewable Power Generation*, 2024. doi :10.1049/rpg2.12900.
- [5] Sahlaoui K., Oueslati H., Nasri H., Ben Mabrouk S., "Infrared thermography energy performance analysis of a hybrid air photovoltaic-thermal system", *Energy Sources, Part A*, vol. 45, no. 3, pp. 6918–6931, 2023. doi :10.1080/15567036.2023.2217786.
- [6] Kanzari I., Oueslati H., Ben Mabrouk S., "Numerical simulation of photovoltaic thermal air panel with phase change materials", *Renewable Energy Focus*, vol. 37, 2021. doi :10.1016/j.ref.2021.03.001.
- [7] Kallio S., Siroux M., "Exergy and exergo-economic analysis of a hybrid renewable energy system under different climate conditions", *Renewable Energy*, vol. 194, 2022.
- [8] Barbu M., Darie G., Siroux M., "A parametric study of hybrid photovoltaic-thermal system coupled with a domestic hot water storage tank", *Energies*, vol. 13, no. 24, 2020.
- [9] Swinbank W.C., "Long-wave radiation from clear skies", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 89, pp. 339–348, 1963.