

Développement d'un modèle semi-analytique pour la prédiction du comportement thermique et énergétique d'un panneau photovoltaïque en conditions réelles de fonctionnement

Candice BANES¹, Benjamin GAUME¹, Vincent BOURDIN^{2,3}, Jodi BADOSA⁴, Johan PARRA⁴, Olivier QUÉMÉNER^{1*}, Anne MIGAN-DUBOIS²

¹ Laboratoire de Mécanique et d'Énergétique d'Évry, Univ. Évry Paris-Saclay.

² Laboratoire Génie Électrique et Électronique de Paris, CentraleSupélec, Sorbonne Univ., Univ. Paris Saclay, CNRS.

³ Laboratoire Interdisciplinaire des Sciences du Numérique, CNRS.

⁴ Laboratoire de Météorologie Dynamique (UMR 8539), Institut National des Sciences de l'Univers, Ecole Polytechnique, Sorbonne Univ., CNRS, Département des Géosciences, ENS Paris.

Résumé - Cet article concerne le développement d'un modèle semi analytique pour simuler le comportement thermique d'un panneau photovoltaïque. Ce modèle prend en compte l'intégralité des différents échanges, les différents flux de rayonnement, l'inertie thermique ainsi que le gradient de température dans l'épaisseur du panneau. Une comparaison avec des essais effectués en conditions réelles de fonctionnement sur une année de mesure, permet de quantifier la précision obtenue.

Nomenclature

c	capacité thermique, $J.m^{-3}.K^{-1}$	η	rendement
e	épaisseur, m	θ	angle du soleil
P_{elec}	puissance électrique, W	ρ	réflexion
s	angle d'inclinaison du panneau	<i>Indices et exposants</i>	
S	surface du panneau, m ²	atm	atmosphère
T	température, K	p	paroi face avant
V	vitesse, m.s ⁻¹	IR	infrarouge
<i>Symboles grecs</i>		sol	solaire
α	coefficient d'absorption	$grad$	sol
ε	émissivité	cv	convection
φ	densité de flux, $W.m^{-2}.K^{-1}$	vc	voûte céleste

1. Introduction

L'augmentation constante de la production d'électricité photovoltaïque mondiale au cours de ces dernières années montre l'importance de ce vecteur d'énergie renouvelable, dont la variation en fonction des conditions météorologiques nécessite le développement de modèles capables d'anticiper la production photovoltaïque (PV). Parmi les paramètres fondamentaux du comportement d'un panneau PV, se trouve le niveau thermique de ce dernier qui conditionne son rendement. De nombreux auteurs ont ainsi proposés différents modèles thermiques, de différents niveaux de complexité et de précision : D'un côté des modèles simples empiriques [1] [2] ou basés sur un bilan énergétique [4] permettent une estimation rapide du niveau de température global, de l'autre des modèles numériques [3] détaillent le gradient thermique au sein du panneau. Une alternative possible tient dans le développement de modèles semi-analytiques afin de déterminer rapidement le gradient thermique dans l'épaisseur du panneau, et de voir quelle

en est l'implication. Cet article présente ainsi ce type de modèle, pour lequel les différents flux échangés avec l'environnement sont détaillés, et la constitution du panneau est prise en compte.

2. Banc expérimental et mesures

La présente étude est basée sur les données expérimentales d'un panneau photovoltaïque au silicium monocristallin utilisant la technologie HIT, avec un verre traité antireflet en face extérieure et un "backsheet" en tedlar blanc. Sa puissance nominale (STC) est de $231,08 \text{ W} \pm 0,24\%$. Les matériaux constituant le module sont précisés sur la figure 1 et le tableau 1. Le panneau est placé sur un banc de test de systèmes photovoltaïques en environnement réel avec l'inclinaison $s = 27 \pm 1^\circ$ et l'azimut local $\gamma = 0 \pm 1^\circ$ (face au sud) sur une dalle horizontale en enrobé. On trouvera l'essentiel des informations sur cette installation métrologique dans la référence [5]. Ce banc (fig. 2) est installé à l'observatoire SIRTÀ [6] sur le campus de l'École Polytechnique, IPP, à Palaiseau (France, 48.7 N, 2.2 E) et bénéficie des mesures aux standards de l'organisation météorologique mondiale (éclairagements horizontaux direct BHI , diffus DHI , global GHI , densité du flux direct circumsolaire BNI , vitesse du vent, température et humidité de 1 à 50 m d'altitude et au-delà par télédétection, mesure du spectre solaire, des flux solaires et terrestres montant et descendant, température du sol jusqu'à -2 m). De plus le banc est doté de sa propre station météorologique : vitesse du vent sous les modules à 0,3 m et au sommet à 1 m, direction du vent, éclairagements solaires "short waves" et terrestres "long waves" montant et descendant dans le plan des modules, température et humidité de l'air. Chaque panneau est doté d'une sonde platine de classe A câblée en 4 fils, collée en face arrière et recouverte d'un ruban d'aluminium. Toutes sources d'erreur cumulées, l'incertitude des mesures est $\pm 0,4^\circ\text{C}$ de -20°C à 100°C . Du lever au coucher du Soleil, les caractéristiques intensité – tension $I(U)$, sont mesurées à l'aide d'une charge variable commandée. On en déduit la puissance maximum P_{mpp} à une cadence d'environ un point par minute, avec une incertitude de $\pm 5,6\%$.

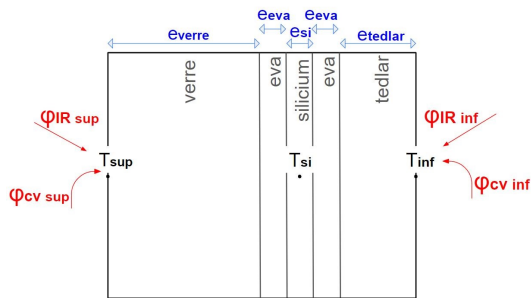


Figure 1 : Constituants du panneau



Figure 2 : Banc d'essais

3. Modèle semi analytique

Comme de nombreuses études l'ont montrée, une simulation numérique 3D gourmande en temps calcul n'est pas prioritaire pour ce type de problème, compte tenu de l'importance du gradient thermique selon l'épaisseur devant les autres directions spatiales [3]. Ainsi en négligeant les effets de bord de la surface du panneau, il est possible de considérer le phénomène de diffusion thermique uniquement selon l'épaisseur du panneau.

	e (mm)	c ($J.m^{-3}.K^{-1}$)	k ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
verre (ver)	4	1857	1,4
eva (eva)	0,13	2102	0,35
silicium (Si)	0,1	1462	140
tedlar (ted)	1	2411	0,35

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux du panneau

3.1. Modèle diffusif dans l'épaisseur du panneau

Un simple modèle considère la conservations des flux en faces avant et arrière (fig. 1), soit en notant les deux résistances supérieure $R_{sup} = \frac{e_{ver}}{k_{ver}} + \frac{e_{eva}}{k_{eva}}$ et inférieure $R_{inf} = \frac{e_{eva}}{k_{eva}} + \frac{e_{ted}}{k_{ted}}$:

$$T_{sup} = T_{Si} + R_{sup} (\varphi_{cv_{sup}} + \varphi_{IR_{sup}}) \quad (1)$$

$$T_{inf} = T_{Si} + R_{inf} (\varphi_{cv_{inf}} + \varphi_{IR_{inf}}) \quad (2)$$

L'inertie du panneau est prise en compte par une capacité globale prenant en compte tous les composants i du panneau et localisée au niveau du silicium. Elle intervient dans le bilan thermique où apparait le flux solaire φ_{sol} et la puissance électrique produite P_{elec} :

$$\sum_i c_i e_i \frac{\partial T_{si}}{\partial t} = \varphi_{sol} + \varphi_{cv_{sup}} + \varphi_{IR_{sup}} + \varphi_{cv_{inf}} + \varphi_{IR_{inf}} - \frac{P_{elec}}{S} \quad (3)$$

La validation de ce modèle s'effectue à partir de la géométrie réelle du panneau photovoltaïque, en considérant un flux solaire direct $\varphi_{sol} = 1000 [W.m^{-2}]$, un rendement électrique $\eta_g = 10 [\%]$, et des échanges entre le panneau et l'extérieur caractérisés par un unique coefficient global d'échange $h_g [W.m^{-2}.K^{-1}]$ dont on fait varier la valeur. Le modèle analytique est comparé aux résultats issus d'une simulation éléments finis 1D dans le sens de l'épaisseur du panneau (figure 3). On note que pour un faible vent ($h_g = 10 W.m^{-2}.K^{-1}$), le modèle analytique donne des résultats satisfaisants, et permet de retrouver les températures des parois et du silicium, avec une erreur maximum inférieure à $0,5^\circ C$ (figure 3.a). Pour une configuration extrême ($h_g = 100 W.m^{-2}.K^{-1}$), l'erreur est du même ordre de grandeur, avec toujours un maximum inférieur à $0,5^\circ C$ (figure 3.b). Cependant, compte tenu du fort refroidissement et donc de la faible montée en température du panneau, cette erreur apparait nettement dans le tracé de l'évolution de la température au cours du temps. Quoiqu'il en soit, ces erreurs doivent être mise en balance avec les incertitudes de mesure, soit des différents flux à partir desquels sont utilisé ce modèle, soit de la température de la paroi qui est utilisée pour valider le modèle sur des mesures réelles. Compte tenu de ces différents facteurs expérimentaux, l'erreur du modèle analytique parait tout à fait acceptable.

3.2. Application dans le cas de sollicitations réelles

3.2.1. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire représenté figure 4 intervient sous la forme du flux direct (B_{poa}), du flux diffus provenant de l'atmosphère (D_{atm}), et du flux diffus provenant du sol (D_{grd}). Ces flux diffus rayonnent des deux cotés du panneau en fonction de l'angle d'inclinaison s de ce dernier. On a ainsi :

$$\varphi_{sol} = \varphi_{sol_{sup}} + \varphi_{sol_{inf}} = B_{poa_{sup}} + D_{atm_{sup}} + D_{grd_{sup}} + B_{poa_{inf}} + D_{atm_{inf}} + D_{grd_{inf}} \quad (4)$$

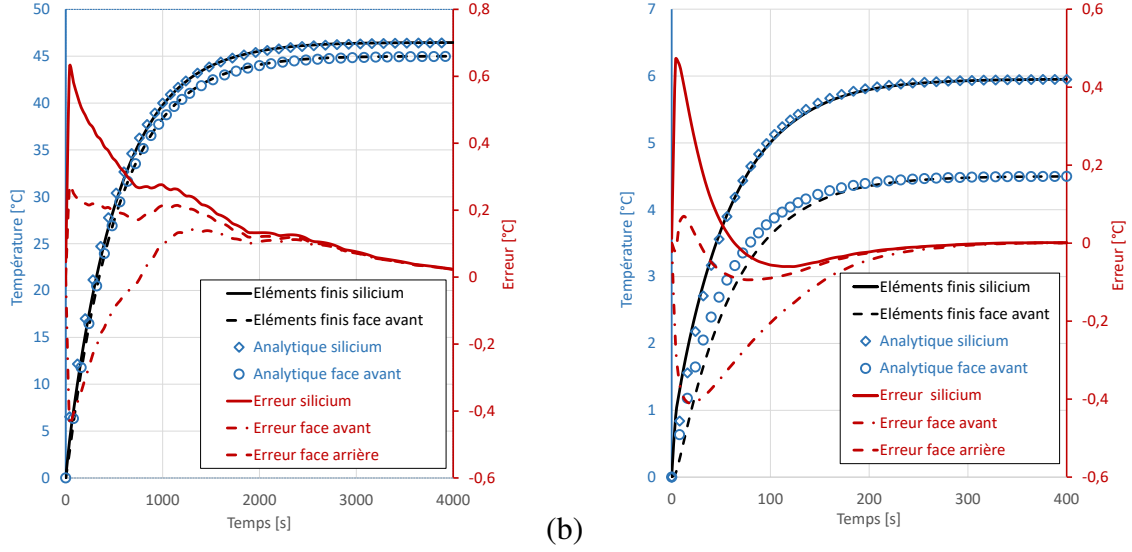


Figure 3 : Comparaison entre modèle analytique et numérique pour deux valeurs du coefficient global d'échange $h_g = 10 [W.m^{-2}.K^{-1}]$ (a) et $h_g = 100 [W.m^{-2}.K^{-1}]$ (b).

Les différents termes sont précisés dans le tableau 2 en fonction des mesures des différents rayonnements directs et diffus (BNI , DHI et GHI). Le flux direct en face avant est caractérisé par un coefficient de transmission du verre qui varie en fonction de l'angle θ (figure 5). Le flux diffus provenant de l'atmosphère arrivant sur le dessus du panneau ($D_{atm_{sup}}$) tient compte du fait que la voûte est plus lumineuse vers l'horizon qu'au zénith (modèle de Klucher [7]). Pour les autres flux, on considère une luminance de voûte uniforme. Les valeurs des différents paramètres utilisés sont le coefficient de transmission du verre $\tau_D = 0,75$, le coefficient de réflexion du sol $\rho_{grd} = 0,05$ et le coefficient d'absorption du tedlar situé sur la face arrière $\alpha_{ted} = 0,9$.

	Face supérieure $\varphi_{sol_{sup}}$	Face inférieure $\varphi_{sol_{inf}}$
Flux direct B_{poa}	$\tau_B BNI \cos(\theta), -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$	$\alpha_{ted} BNI \cos(\theta), \frac{\pi}{2} < \theta < \frac{3\pi}{2}$
Flux atmosphère D_{atm}	$\tau_D DHI \cos^2\left(\frac{s}{2}\right) F$	$\alpha_{ted} DHI \sin^2\left(\frac{s}{2}\right)$
Flux sol D_{grd}	$\rho_{grd} \tau_D GHI \sin^2\left(\frac{s}{2}\right)$	$\rho_{grd} \alpha_{ted} GHI \cos^2\left(\frac{s}{2}\right)$

Tableau 2 : Expression des différents flux solaires

avec le facteur de correction $F = \left[1 + \gamma \sin^2\left(\frac{s}{2}\right)\right] (1 + \gamma \cos^2(\theta) \sin^2(\theta_Z))$, où θ_Z est l'angle zénithal et $\gamma = 1 + \left(\frac{DHI}{GHI}\right)^2$ [7]

3.2.2. Rayonnement infrarouge (grandes longueurs d'ondes)

Le panneau échange sous forme de rayonnements infrarouges avec la voûte céleste et avec le sol sur la face supérieure et inférieure du panneau, les quantités de flux échangés sur chacune des faces, soit :

$$\varphi_{IR} = \varphi_{IR_{sup}} + \varphi_{IR_{inf}} = \varphi_{IR_{vc_{sup}}} + \varphi_{IR_{vc_{inf}}} + \varphi_{IR_{grd_{sup}}} + \varphi_{IR_{grd_{inf}}} \quad (5)$$

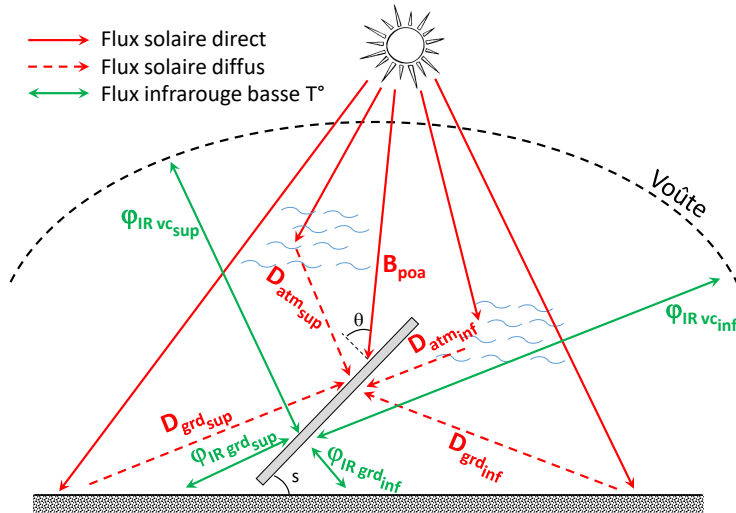


Figure 4 : Représentation des différents flux de rayonnement

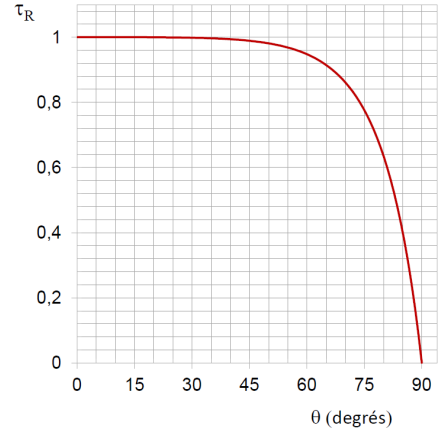


Figure 5 : Evolution du facteur de transmission relatif du flux solaire direct $\tau_R = \frac{\tau_B(\theta)}{\tau_B(0)}$

Le tableau 3 présente chacun des différents termes, en fonction des températures mesurées de voûte céleste T_{vc} et de sol T_{grd} . Les émissivités sont estimées pour le sol à $\varepsilon_{grd} = 0,9$ et pour le panneau à $\varepsilon_{psup} = \varepsilon_{pinf} = 0,83$. Seul le flux infrarouge échangé avec le sol fait l'objet d'une approximation notable, dont l'erreur estimée (par comparaison avec une simulation effectuée sur le logiciel Comsol) est de l'ordre de 7 %.

	Face supérieure $\varphi_{IR_{sup}}$	Face inférieure $\varphi_{IR_{inf}}$
$\varphi_{IR_{vc}}$	$\sigma \varepsilon_{psup} (T_{vc}^4 - T_{sup}^4) \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$	$\sigma \varepsilon_{pinf} (T_{vc}^4 - T_{inf}^4) \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$
$\varphi_{IR_{grd}}$	0	$\sigma \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{pinf}} + \frac{1}{\varepsilon_{grd}} - 1\right)} (T_{grd}^4 - T_{inf}^4) \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$

Tableau 3 : Expression des différents types de rayonnement infrarouge

3.2.3. Convection

L'échange convectif est caractérisé des deux côtés du panneau par un coefficient h_{cv} qui peut être calculés par différentes corrélations. Celles-ci amènent à des résultats assez dispersés. Nous utilisons la corrélation de Mac Adams [8].

$$\varphi_{cv} = h_{cv}(T_{air} - T_p)$$

$$h_{cv} = \begin{cases} 5.7 + 3.8V & \text{si } V \leq 5 \text{ m.s}^{-1} \\ 6.47 V^{0.78} & \text{si } V > 5 \text{ m.s}^{-1}. \end{cases} \quad (6)$$

3.2.4. Puissance électrique

La conversion du flux solaire reçu sur la face supérieure du panneau et converti en électricité joue sur la température du panneau. Nous intégrons donc le terme de puissance électrique dans notre modèle thermique.

La puissance électrique P_{elec} s'obtient en fonction du flux solaire reçu en face supérieure $\varphi_{sol_{sup}}$ et du rendement η_g du panneau, qui s'exprime [9] à partir de la température de silicium T_{Si} et des données indiquées par le constructeur : le rendement théorique $\eta_{STC} = 0,19$ et le coefficient de température $\beta_p = 0,0029$. On a ainsi :

$$P_{elec} = \eta_g \varphi_{sol_{sup}} S = \eta_{STC} (1 - \beta_p(T_{Si} - 25)) \varphi_{sol_{sup}} S \quad (7)$$

3.2.5. Résolution numérique du problème

Pour tenir compte de l'ensemble des termes de rayonnement, la résolution du problème 3 s'effectue via une discrétisation temporelle du premier ordre et semi implicite de façon à la rendre linéaire entre deux pas de temps consécutifs. En précisant uniquement les termes où apparaissent les températures, on obtient donc entre le temps t_1 et t_2 :

$$\begin{aligned} \sum_i c_i e_i \frac{T_{Si}^{(t_2)} - T_{Si}^{(t_1)}}{\Delta t} &= h_{cv_{sup}} (T_{air} - T_{sup}^{(t_2)}) + h_{cv_{inf}} (T_{air} - T_{inf}^{(t_2)}) \\ &+ \sigma \left[\varepsilon_{p_{sup}} \left(T_{vc}^4 - T_{sup}^{(t_1)^3} T_{sup}^{(t_2)} \right) + \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{grd}} + \frac{1}{\varepsilon_{inf}} - 1} \left(T_{grd}^4 - T_{inf}^{(t_1)^3} T_{inf}^{(t_2)} \right) \right] \cos^2 \left(\frac{S}{2} \right) \quad (8) \\ &+ \sigma \left[\varepsilon_{p_{inf}} \left(T_{vc}^4 - T_{inf}^{(t_1)^3} T_{inf}^{(t_2)} \right) \right] \sin^2 \left(\frac{S}{2} \right) \\ &+ \varphi_{sol} - \varphi_{sol_{sup}} \eta_{STC} \left[1 - \beta_p \left(T_{Si}^{(t_2)} - 25 \right) \right] \end{aligned}$$

et où les températures T_{Si} , T_{sup} et T_{inf} sont liées par la conservation des flux (eq. 1 et 2).

4. Résultats

Les calculs sont menés pour une durée d'une année et comparés avec les mesures effectuées selon une période de 1 minute. La figure 6 présente les résultats pour 4 journées caractérisées par des conditions météorologiques très différentes (hiver et été, beau et mauvais temps). On note une bonne correspondance entre les températures mesurées et calculées, pour des comportements journaliers très différents. Le modèle permet une bonne prise en compte de la dynamique du panneau. Par ailleurs la comparaison effectuée sur toute l'année entre mesures et modèle est caractérisée par les erreurs moyennes $\bar{\sigma}$ (eq. 9) et quadratique σ_{RMS} (eq. 10). Le tableau 4 présente les résultats obtenus par le modèle semi-analytique et par deux modèles empiriques usuellement utilisés. On retrouve pour notre modèle le même ordre de grandeur que l'écart observé lors des évolutions journalières (de l'ordre du degré Celsius), avec des résultats plus performants que ceux obtenus avec les modèles empiriques. L'ensemble de ces calculs est très rapide, puisque la modélisation sur Matlab du comportement du panneau sur une année (uniquement durant les périodes de jour) par pas de une minute s'effectue en 3,6 s pour les calculs et 24,4 s pour l'enregistrement de l'intégralité des résultats (températures et puissances), en utilisant un ordinateur portable (processeur Core I7 1,7Ghz, 32 Go de RAM).

L'énergie électrique produite est calculée en fonction de ces températures et comparée avec les résultats expérimentaux. Les 4 résultats journaliers sont présentés (fig. 7), ainsi que les valeurs récupérées chaque mois (fig. 8). Là encore les résultats obtenus sont très satisfaisants avec des erreurs mensuelles inférieures à 6%.

Ce modèle permet en outre d'identifier l'impact des différents types de flux solaire (57.6 % correspond au flux direct), et les différents modes de refroidissement du capteur (44.6 % de

rayonnement infrarouge avec la voûte céleste, 11.5 % vis à vis du sol et 43.9 % par convection). Ainsi, l'erreur du modèle analytique concernant le flux infrarouge échangé avec le sol (7 %) a un impact inférieur à 1 % des échanges globaux avec l'environnement extérieur. La difficulté principale réside dans la détermination du coefficient d'échange, qui reste approximatif et a une influence importante sur la température du capteur.

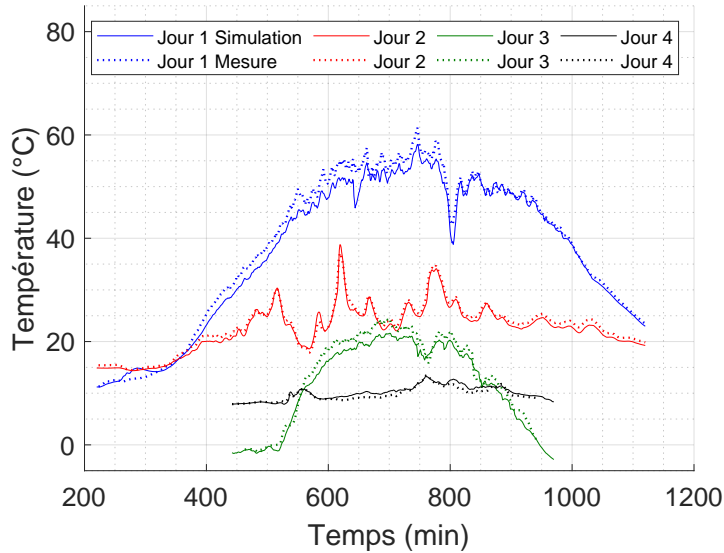


Figure 6 : Température en face arrière mesurée et simulée : en été jour 1 (18 Juillet 2020, beau temps) et jour 2 (16 Juillet 2020, mauvais temps), en hiver jour 3 (9 Janvier 2021, beau temps) et jour 4 (14 Janvier 2021, mauvais temps).

Modèle	$\bar{\sigma}$	σ_{RMS}
semi-analytique	1.54	2.23
empirique Sandia	2.15	3.34
empirique Faiman	2.19	3.41

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |T_{p_{mesure}}^{(t)} - T_{p_{calcul}}^{(t)}| \quad (9)$$

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (T_{p_{mesure}}^{(t)} - T_{p_{calcul}}^{(t)})^2} \quad (10)$$

Tableau 4 : Ecart sur une simulation d'une année

5. Conclusion

A partir de lois simples mais avec une prise en compte précise des différentes sollicitations thermiques reçues par un panneau photovoltaïque, il a été possible d'établir un modèle semi-analytique afin de pouvoir reproduire le comportement thermique et énergétique du panneau en conditions réelles. Une campagne expérimentale complète établie sur une année de test a permis de valider le modèle et de quantifier sa précision. L'analyse de la répartition des différents flux a fait apparaître la nécessité d'une détermination plus précise du coefficient d'échange convectif, dont les diverses corrélations amènent à des résultats assez dispersés. Ce modèle va donc être utilisé dans un processus d'identification de ce coefficient.

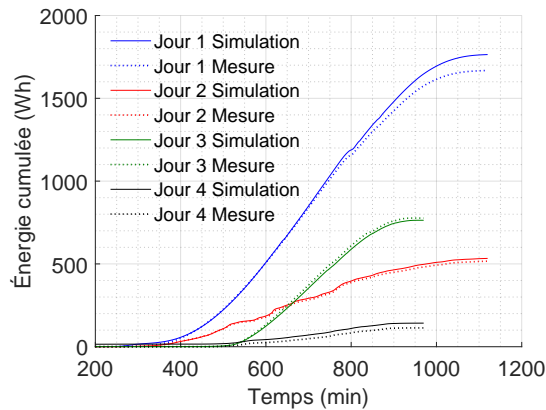


Figure 7 : Evolution de l'énergie électrique récupérée au cours d'une journée

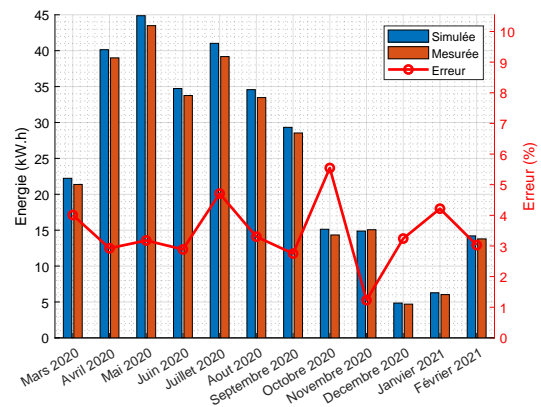


Figure 8 : Energie récupérée par mois

Une fois optimisé, l'intérêt principal d'un tel outil est de pouvoir obtenir très rapidement des résultats suffisamment précis en regard des incertitudes de mesure. Il permet de mener des campagnes de sensibilité afin d'analyser l'importance relative de chacune des sollicitations thermiques qui interviennent dans le calcul, ou de prédire le comportement du panneau en fonction des variations des différents paramètres (conditions météorologiques, positionnement et orientation du capteur, nouveaux constituants, ...). Enfin, il pourrait être utilisé simultanément avec un modèle météorologique pour la prédiction de la production photovoltaïque.

Références

- [1] Jinqing Peng and Lin Lu and Hongxing Yang and Tao Ma, Validation of the Sandia model with indoor and outdoor measurements for semi-transparent amorphous silicon PV modules, *Renewable Energy*, 80, (2015), <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.017>
- [2] Faiman, David, Assessing the Outdoor Operating Temperature of Photovoltaic Modules, *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 16, (2008), 307 - 315, <https://doi.org/10.1002/pip.813>
- [3] H.A. Zondag, D.W. de Vries, W.G.J. van Helden, R.J.C. van Zolingen, A.A. van Steenhoven, The thermal and electrical yield of a PV-thermal, *Solar Energy*, 72, (2002), 113-128, [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00094-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00094-9)
- [4] S. Armstrong and W.G. Hurley, A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions, *Applied Thermal Engineering*, 30, (2010), 1488-1495, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.03.012>
- [5] A. Migan Dubois, J. Badosa, V. Bourdin, M.I. Torres Aguilar and Y. Bonnassieux, Estimation of the Uncertainty due to Each Step of Simulating the Photovoltaic Conversion under Real Operating Conditions, *Hindawi International Journal of Photoenergy*, (2021), <https://doi.org/10.1155/2021/4228658>
- [6] M. Haeffelin, L. Barthès, O. Bock et al., SIRTA, a ground-based atmospheric observatory for cloud and aerosol research, *Annali di geofisica* (Bologna, Italy : 1993), 23 (2005), 2, 253-275, 2005.
- [7] Miklós Horváth, Tamás Csoknyai, Evaluation of Solar Energy Calculation Methods for 45° Inclined, South Facing Surface, *Energy Procedia*, 78, (2015), 465-470, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.700>
- [8] P.S. Ghahfarokhi, A. Kallaste, T. Vaimann and A. Belahcen, Natural convection from flat side's of coil system, *International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, (2018), <https://doi.org/10.1109/EPE.2018.8395967>
- [9] R. Couderc, H. Amara, M. Lemiti, In-Depth Analysis of Heat Generation in Silicon Solar Cells, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6, (2016), <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2566923>