

Modélisation de transfert thermique couplé d'une façade photovoltaïque ventilée

Julie RATOVONKERY^{*1,2,3}, Ya Brigitte ASSOA², Christophe MENEZO³

¹Université Savoie Mont Blanc, LOCIE UMR CNRS 5271, Campus Scientifique Savoie Technolac, F-73376 Le Bourget-du-Lac, France

²CEA, LITEN, Département de Technologie Solaire, F-73375 Le Bourget du Lac, France

³Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie 20, avenue du Grésillé- BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France

*julie.ratovonkery@univ-smb.fr

RESUME. Cette étude présente un modèle de transfert thermique couplé en régime transitoire d'une façade photovoltaïque ventilée. La façade étudiée est composée de modules photovoltaïques semi-transparents bifaciaux. Le modèle numérique est développé dans l'environnement Python. Les échanges thermiques sont modélisés en utilisant la méthode nodale ou la méthode des résistances-capacitances. Afin de considérer l'aspect aérodynamique dans la lame d'air, le débit de ventilation est calculé à partir d'un bilan de pressions. Pour valider le modèle, les températures simulées sont comparées à cinq jours de données expérimentales acquises pendant le mois de juillet. Une étude des écarts entre températures simulées et températures mesurées est alors effectuée afin d'évaluer la précision du modèle. Les coefficients de détermination du modèle numérique varient entre 0,926 et 0,972. Ces résultats de validation montrent que le modèle développé donne des précisions satisfaisantes pour décrire le comportement thermique de la façade.

MOTS-CLÉS : Modélisation numérique, Transfert thermique, Façade photovoltaïque ventilée.

ABSTRACT. This study presents a transient coupled heat transfer model of a ventilated photovoltaic façade. The studied façade is composed of bifacial semi-transparent photovoltaic modules. The numerical model is developed in Python environment. Thermal exchanges are modeled using a nodal approach or a resistance-capacitance method. In order to consider the aerodynamic aspect in the air gap, the ventilation flow rate is calculated based on a pressure balance. To validate the model, the simulated temperatures are compared with five days of experimental data obtained in July. A study on the differences between the simulated and measured temperatures is, then performed in order to evaluate the accuracy of the model. The coefficients of determination obtained for the numerical model vary between 0.926 and 0.972. These validation results show that the developed model gives acceptable accuracy to describe the thermal behavior of the façade.

KEYWORDS : Numerical modeling, Heat transfer, Ventilated photovoltaic facade.

1. INTRODUCTION

Les directives européennes ont pour objectif de réduire la consommation d'énergie de 40% à 50% et l'émission de CO₂ d'au moins 80% d'ici 2050 dans le secteur du bâtiment (European Commission 2013). En France, l'établissement de la réglementation thermique RT2020 visant à concevoir des bâtiments à énergie positive s'inscrit dans ces ambitions. Etant donné l'abondance de l'énergie solaire, l'intégration des composants solaires photovoltaïques au bâtiment est une solution avantageuse pour atteindre l'exigence de cette nouvelle réglementation. Avec leur grande superficie disponible, les façades présentent un énorme potentiel pour la collecte d'énergie solaire, en particulier dans le cas des bâtiments de grande hauteur. Dans ce sens, différentes solutions technologiques sont envisagées pour une

optimisation du productible des façades photovoltaïques, telles que l'intégration de modules bifaciaux permettant une production électrique sur leurs deux faces. Bien que diverses études numériques et expérimentales aient été menées en vue d'évaluer le comportement thermique et la performance électrique des façades photovoltaïques, peu sont basées sur le bifacial. Ainsi, certaines études se concentrent sur la modélisation thermique des façades photovoltaïques à partir d'une méthode nodale ou de résistances-capacitances. Guiavarch et Peuportier (2006) présentent la modélisation thermique de composants photovoltaïques intégrés au bâtiment en régime permanent. Ils ont considéré dans leur étude des modules opaques ou semi-transparents avec ou sans lame d'air en face arrière. Le modèle proposé est intégré à l'outil de simulation thermique dynamique COMFIE et validé par comparaison avec d'autres outils de simulation dynamique de bâtiment. Saadon et al. (2016) ont réalisé un modèle couplé thermo-aérodynamique d'une façade double peau intégrant des modules photovoltaïques semi-transparents dans l'environnement du logiciel TRNSYS 17. Ils ont validé le modèle présenté avec neuf jours consécutifs de données expérimentales obtenues en été. Athienitis et al. (2018) modélisent le comportement thermique en régime transitoire d'une façade photovoltaïque en considérant la capacité thermique du mur composant la façade. Les modules photovoltaïques intégrés sont des modules biverres opaques. La confrontation expérimentale de leur modèle a donné des erreurs relatives comprises entre 1,9 et 2,4 %. Ooshaksaraei et al. (2017) présentent des modèles thermiques de capteurs solaires photovoltaïques bifaciaux ayant des configurations similaires à celle d'une façade photovoltaïque avec lame d'air. Les modèles sont également validés expérimentalement. Dans la présente étude, un modèle couplé en régime transitoire du comportement thermo-aérodynamique d'une façade photovoltaïque ventilée comprenant des modules semi-transparents bifaciaux est proposé en prenant en compte la paroi d'intégration.

Une description de la façade étudiée est présentée en première partie ainsi que son instrumentation. Le modèle numérique est détaillé dans une deuxième partie et sa validation en dernière partie.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

2.1. DESCRIPTION DE LA FAÇADE PHOTOVOLTAÏQUE

La façade étudiée de 3,34 m de hauteur et 1,81 m de largeur est montée au sud d'un bâtiment expérimental implanté sur la plateforme de CEA-INES au Bourget-du-Lac en France. C'est une façade photovoltaïque ventilée constituée de modules photovoltaïques semi-transparents bifaciaux, d'une lame d'air ventilée naturellement et d'un mur multicouche isolé par l'extérieur. Le champ photovoltaïque est composé de deux (2) rangés de quatre (4) modules en série. Il forme une paroi discontinue, les modules étant séparés de 7 mm. Chaque module photovoltaïque est un biverre comprenant des cellules photovoltaïques en silicium monocristallin bifacial encapsulées entre deux couches éthylène-acétate de vinyle (EVA). Les cellules n'occupent pas tout l'espace entre les verres d'encapsulation et laissent des parties transparentes d'où la semi-transparence du module. Chaque module est fixé sur une paroi en béton fibré ultra haute performance (BFHUP) de 2 cm d'épaisseur et d'une dimension de 83 cm × 90 cm. Les caractéristiques du module sont données dans le *Tableau 1*. La lame d'air a une épaisseur de 2 cm et la circulation de l'air se fait sur la paroi externe de la façade. Le mur est composé de trois couches : la couche de support des modules en BFHUP, une couche d'isolant de 20 cm d'épaisseur et une paroi en béton de 20 cm d'épaisseur (cf. *Figure 1*). Dans cette étude, le comportement thermique et aéraulique d'une partie de la façade comprise par un seul module est analysé.

Module	
Largeur	90 cm
Hauteur	83 cm
Nombre de cellules	24 demi-cellules
Puissance de crête	55 Wc
Rendement η_{STD}	20 %
Facteur de transparence ξ	34 %

Tableau 1 : Caractéristiques des modules photovoltaïques

2.2. CAMPAGNE DE MESURES

Les données expérimentales sont issues d'une campagne de mesures thermiques, électriques et météorologiques (mesures de la température d'air ambiant, de la vitesse et de la direction du vent, de l'ensoleillement global dans le plan vertical et dans le plan horizontal et de l'ensoleillement diffus horizontal) réalisée au CEA INES. La Figure 1 montre les positions des capteurs de mesure sur la façade et à l'intérieur du bâtiment. Des thermocouples de type T (d'incertitude de $\pm 2\%$) sont collés aux parois à une position correspondant au centre des modules pour mesurer les températures. La mesure de la température d'air ambiant est acquise grâce à des capteurs de température de type PT100 d'incertitude $0,1^\circ\text{C}$. Tous les modules sont connectés à un micro-onduleur emphase M215 fournissant les valeurs électriques avant et après onduleur (puissance, tension et intensité de courant). Une centrale d'acquisition Graphtec GL240 enregistre les mesures électriques et thermiques. Les données de températures utilisées pour la validation du modèle sont acquises du 01 au 05 juillet 2019 sur un module situé à 1,2 m du sol.

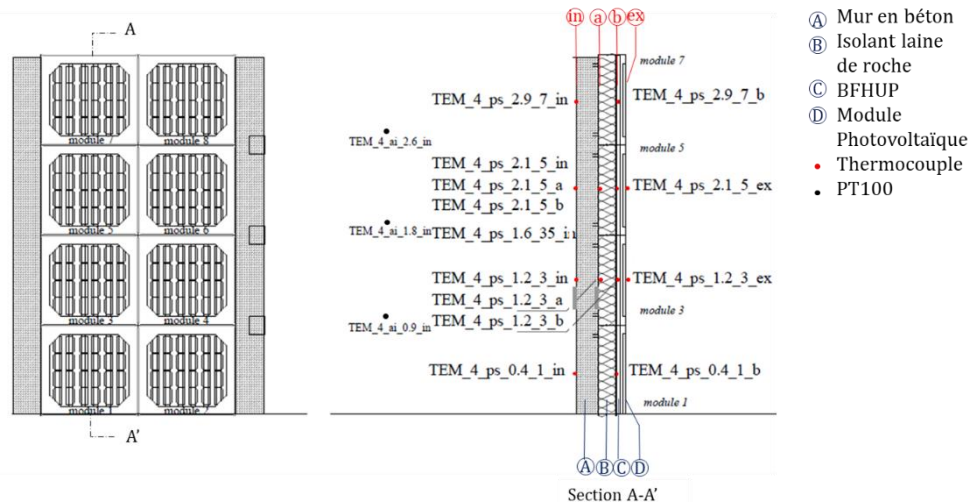


Figure 1: Schéma de la façade photovoltaïque ventilée et emplacement des capteurs de mesure

3. MODELISATION NUMERIQUE

3.1. DESCRIPTION DU MODELE

La façade photovoltaïque (PV) étudiée est modélisée dans l'environnement de Python en utilisant la méthode nodale ou la méthode des résistances-capacitances (RC). Il s'agit d'une modélisation 1D où les températures surfaciques (ou les températures aux interfaces) sont moyennées en un seul nœud de température. La répartition 3D de la température dans le module qui est due à sa semi-transparence est négligée. Le module PV est discrétisé en trois nœuds et sa capacité thermique est négligée. Le premier nœud T_{g1} décrit la température sur la surface extérieure en face avant du module. T_{PV} est le nœud de

température des cellules photovoltaïques. T_{g2} est la température sur la surface en échange avec la lame d'air en face arrière du module. La température moyenne de l'air dans la lame d'air est calculée par T_f . Le mur est discrétisé en cinq nœuds. Les nœuds de températures T_{M1} et T_{M2} représentent respectivement les températures de la surface extérieure et de la surface intérieure du mur. Les températures T_{Ma} , T_{Mb} et T_{Mc} sont les températures au milieu de chaque couche constituant le mur (cf. *Figure 2*).

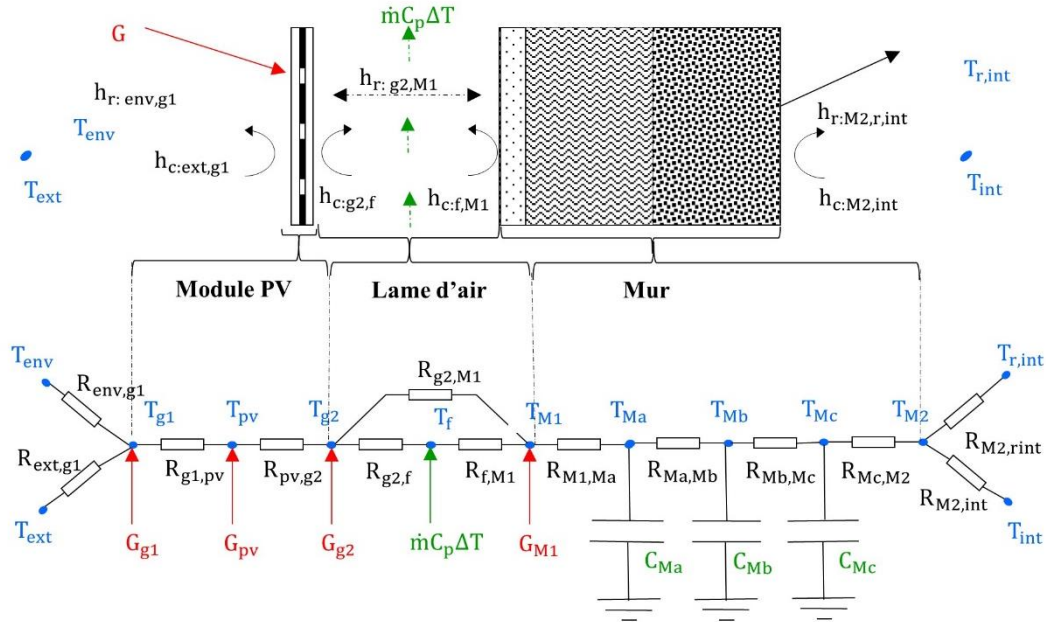


Figure 2 : Représentation du réseau RC du modèle de la façade photovoltaïque ventilée

Le module est en échange convectif avec l'air extérieur qui est décrit par sa température T_{ext} et par la vitesse du vent V_{vent} . La face avant du module est également en échange radiatif avec l'environnement extérieur qui est considéré comme un corps noir de température radiante T_{env} qui est fonction de la température du ciel et de la température du sol.

La surface arrière du module et la surface du mur du côté la lame d'air sont en échange radiatif. Ces surfaces sont aussi en échange convectif avec l'air. Les coefficients de convection dans la lame d'air sont calculés en fonction des corrélations du nombre de Nusselt (choisies selon le type de convection et la nature de l'écoulement) (Incropera et al. 2013).

L'ensoleillement est considéré uniforme à la surface de la façade. Il est supposé absorbé en chaque nœud du module (G_{g1} , G_{PV} et G_{g2}) et par la surface extérieure du mur (derrière le module PV) (G_{M1}). Les multiples réflexions du rayonnement solaire dans la lame d'air sont approximées en une seule réflexion des rayonnements par la paroi du mur pour calculer le rayonnement solaire absorbé par les parois (cf. *Figure 3*). La *Figure 3* montre les coefficients effectifs d'absorption pour le calcul de rayonnement absorbé. G_{g1} , G_{PV} , G_{g2} et G_{M1} . α_n , τ_n et ρ_n sont respectivement le coefficient d'absorption, le coefficient de transmission et le coefficient de réflexion de la paroi d'indice $n = \{g1, g2, M1\}$. $(\tau\alpha)_{PVf}$ et $(\tau\alpha)_{PVr}$ sont respectivement les coefficients effectifs d'absorption des cellules PV en face avant et en face arrière. Ces coefficients sont fonction du coefficient d'absorption des cellules PV et du coefficient de transmission du verre sur la face considérée (Duffie et Beckman 2006). b_f le facteur de bifacialité est le rapport entre les rendements du module en face avant et en face arrière. $\eta_{PV,f}$ est le rendement du module en face avant en condition réelle. ξ est le facteur de transparence du module.

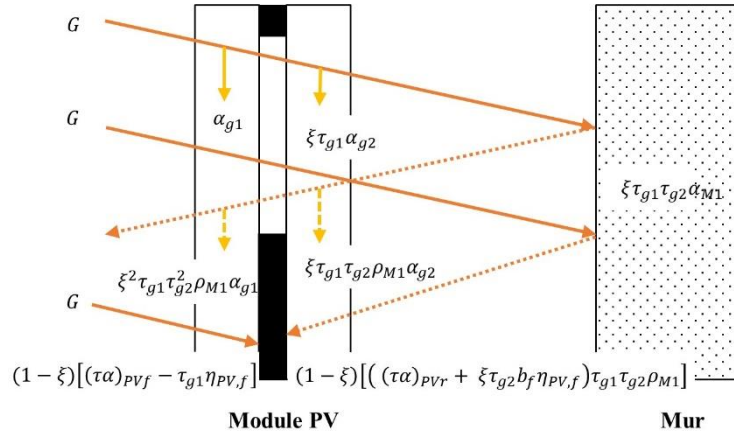


Figure 3 : Représentation des chemins des rayons solaires incidents au niveau de la façade

Pour les échanges à l'intérieur du local, la surface intérieure du mur est en échange convectif avec l'air intérieur qui est à la température T_{int} et en échange radiatif avec l'environnement intérieur qui est également considéré comme un corps noir de température radiante $T_{r,int}$ (cf. Figure 2). Le coefficient de convection intérieure est en fonction du nombre de Nusselt correspondant à une convection naturelle et dépendant de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent) (Incropera et al. 2013). Le coefficient de convection, le coefficient de rayonnement et le coefficient de conduction thermique sont notés respectivement $h_{c:i,j}$, $h_{r:i,j}$ et $h_{i,j}$, où i et j sont les nœuds concernés par l'échange thermique.

3.2. BILAN THERMIQUE EN CHAQUE NŒUD

Les bilans thermiques aux nœuds sont donnés par les équations (1) à (7). Dans les équations (4) et (6), A désigne la surface du module. C_{pair} est la capacité thermique massique de l'air et \dot{m} le débit massique de l'air (cf. équation (4)). L'équation (6) donne la forme du bilan thermique aux nœuds T_{Ma} , T_{Mb} et T_{Mc} pour un nœud courant T_{M_i} . C_{M_i} est la capacité thermique de la couche du mur i . $T_{M_{i0}}$ est la température du nœud M_i du pas de temps précédent. Δt est le pas du temps de discrétisation temporelle.

$$(T_{g1}): h_{c:ext,g1}(T_{ext} - T_{g1}) + h_{r:env,g1}(T_{env} - T_{g1}) + G_{g1} = h_{g1,PV}(T_{g1} - T_{PV}) \quad (1)$$

$$(T_{PV}): h_{g1,PV}(T_{g1} - T_{PV}) + G_{PV} = h_{PV,g2}(T_{PV} - T_{g2}) \quad (2)$$

$$(T_{g2}): h_{PV,g2}(T_{PV} - T_{g2}) + G_{g2} = h_{r:g2,M1}(T_{g2} - T_{M1}) + h_{c:g2,f}(T_{g2} - T_f) \quad (3)$$

$$(T_f): h_{c:g2,f}(T_{g2} - T_f) + h_{c:f,M1}(T_{M1} - T_f) = \frac{\dot{m}C_{pair}}{A}(T_f - T_{f,in}) \quad (4)$$

$$(T_{M1}): h_{r:g2,M1}(T_{g2} - T_{M1}) + h_{c:f,M1}(T_f - T_{M1}) + G_{M1} = h_{M1,Ma}(T_{M1} - T_{Ma}) \quad (5)$$

$$(T_{M_i}|i = \{a, b, c\}): h_{M_{i-1}M_i}(T_{M_i} - T_{M_{i-1}}) - h_{M_iM_{i+1}}(T_{M_i} - T_{M_{i+1}}) = \frac{C_{M_i}}{A} \left(\frac{T_{M_i} - T_{M_{i0}}}{\Delta t} \right) \quad (6)$$

$$(T_{M2}): h_{McM2}(T_{Mc} - T_{M2}) = h_{r:M2,r,int}(T_{M2} - T_{r,int}) + h_{c:M2,int}(T_{M2} - T_{int}) \quad (7)$$

3.3. ESTIMATION DE DEBIT MASSIQUE

Le débit massique \dot{m} de l'air en écoulement est calculé en utilisant la formulation de Brinkworth et al. (2000) qui se base sur l'équilibre de pression au niveau de l'entrée et de la sortie de la lame d'air, tel que :

$$\dot{m} \left[K_{f1} + K_{f2} + \frac{fL}{D_h} \right] = (\rho_0 ld)^2 \dot{m} [C_{P1}W_1^2 - C_{P2}W_2^2] + \frac{2s P_{th}(\rho_0 ld)^2 gL\beta\sin\theta}{C_{pair}} \quad (8)$$

Où K_{f1}, K_{f2} et f sont respectivement les coefficients de perte de charge au niveau de l'entrée et de la sortie de la cavité correspondant au module considéré, f est le coefficient de friction. L, l, d et D_h sont respectivement la hauteur et la largeur du module, l'épaisseur de la lame d'air et son diamètre hydraulique qui est calculé en fonction de son épaisseur et de la largeur du module. ρ_0 est la masse volumique de référence de l'air. CP_1, CP_2 sont des coefficients de pression dus au vent déterminés à partir de l'étude de Saadon (2015). W_1 et W_2 sont les vitesses de l'air à l'entrée et à la sortie de la lame d'air sont considérées égales à la vitesse du vent à l'entrée de la lame d'air du module étudié. P_{th} est la puissance récupérée par l'air en écoulement. β est un coefficient de température ($\beta = 1/T_f$). g est la pesanteur, θ l'angle d'inclinaison de la lame d'air et s le coefficient de stratification de température dans la lame d'air.

4. VALIDATION DU MODELE

Les températures correspondant au placement des capteurs sont les températures aux nœuds T_{g1} (comparé au point de mesure sur le verre en face avant, TEM_4_ps_1.2_ex), T_{M1} (comparé au point de mesure sur la surface du mur du côté de la lame d'air, TEM_4_ps_1.2_b) et T_{M2} (comparé au point de mesure sur la surface intérieure du mur, TEM_4_ps_1.2_in) (cf. Figure 1). Ces températures sont investiguées parce que la température du module en face avant T_{g1} permet, ici, d'estimer l'échauffement des modules. La température du mur T_{M1} permet d'estimer l'influence de la ventilation de la lame d'air. La température T_{M2} indique la performance thermique de la façade.

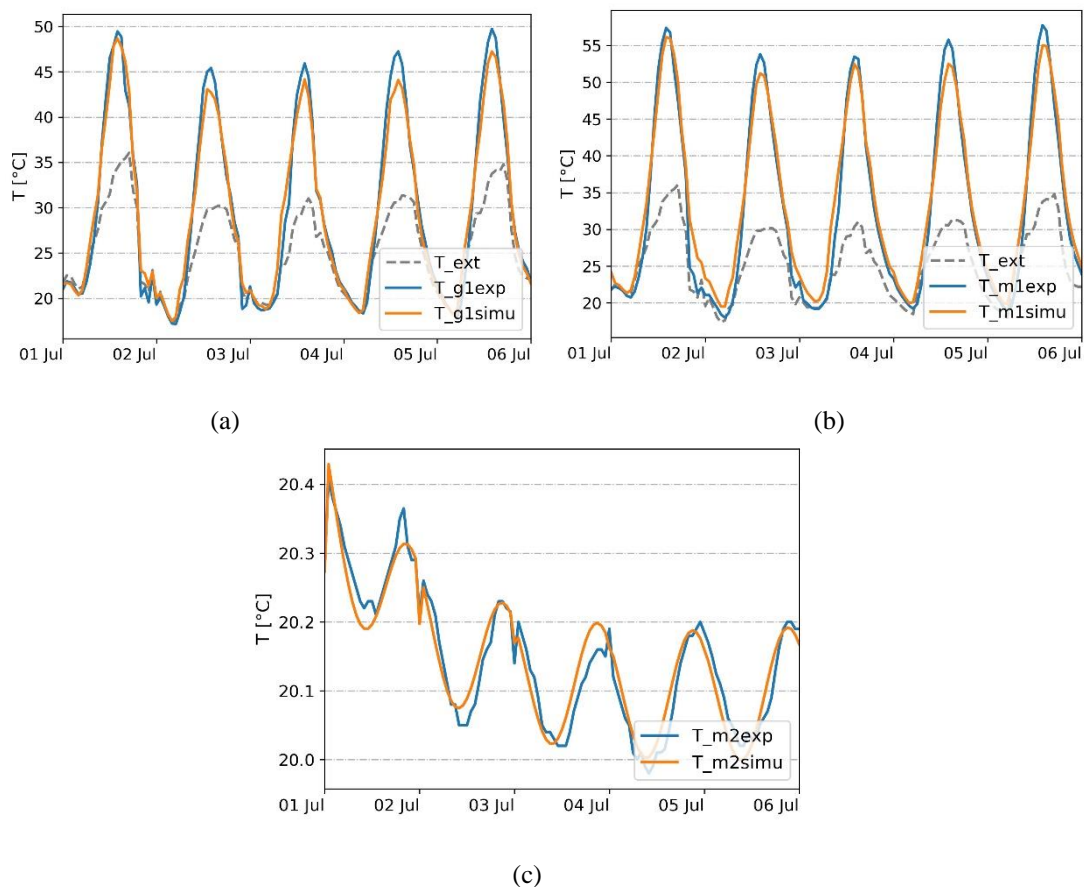


Figure 4 : Comparaison des températures simulées et des mesures expérimentales (a) Température au nœud T_{g1} (b) Température au nœud T_{M1} (c) Température au nœud T_{M2}

Les courbes de températures mesurées et simulées sont représentées sur la *Figure 4*. Cette figure montre que globalement les températures simulées s'ajustent bien avec les mesures. Néanmoins, les erreurs de simulation sont plus importantes pour les nœuds T_{g1} et T_{M1} . Ces erreurs sont prononcées à chaque pic de température (ou d'ensoleillement) pendant la journée. Lorsque l'ensoleillement est fort le modèle semble sous-estimer les températures au niveau de ces nœuds. Les écarts maximums obtenus sont de $5,07^{\circ}\text{C}$ pour T_{g1} et $7,01^{\circ}\text{C}$ pour T_{M1} . Les erreurs du modèle peuvent être dues à la négligence de la capacité thermique du module, au manque de précision sur les caractéristiques des parois, à la différence de localisation entre les nœuds de température et les capteurs de mesures ou encore au choix des équations empiriques pour déterminer la température du ciel, le coefficient de convection extérieur et le nombre de Nusselt.

		MAE [$^{\circ}\text{C}$]	RMSE [$^{\circ}\text{C}$]	MBE [$^{\circ}\text{C}$]	R^2
Température à chaque pas de temps	T_{g1}	1,290	1,701	-0,056	0,972
	T_{M1}	1,933	2,377	0,938	0,965
	T_{M2}	0,023	0,027	0,002	0,926
Température moyenne journalière	T_{g1}	0,3103	0,406	-0,056	0,836
	T_{M1}	0,938	1,067	0,938	-0,299
	T_{M2}	0,012	0,013	0,002	0,972

Tableau 2 : Résultats de l'évaluation de la précision du modèle

Pour évaluer la précision du modèle, les températures mesurées et simulées à chaque pas de temps puis les températures moyennes journalières mesurées et simulées sont comparées. En effet, l'évaluation du modèle en chaque pas de temps montre sa capacité à reproduire les fluctuations journalières des températures ou les dynamismes rapides du système. L'étude des températures moyennes journalières permet d'évaluer si le modèle prend en compte tous les transferts thermiques sous une sollicitation cyclique. Plusieurs estimateurs sont alors calculés : l'erreur moyenne absolue MAE , l'écart quadratique-moyenne-racine $RMSE$, l'écart moyen MBE et le coefficient de détermination R^2 . Les résultats de l'évaluation du modèle sont présentés dans le *Tableau 2*. Pour l'étude des températures à chaque pas de temps, les coefficients de détermination R^2 calculés pour chaque nœud de température sont proches de un (1). Ils sont respectivement de 0,972, 0,965 et 0,926 pour T_{g1} , T_{M1} et T_{M2} . Ces valeurs indiquent une précision acceptable pour décrire le comportement thermique de la façade photovoltaïque. Par contre, le coefficient de détermination diminue pour le nœud T_{g1} et il est très faible pour le nœud T_{M1} en considérant les températures moyennes journalières. En effet, le nombre de températures moyennes journalières évaluées (cinq températures à chaque nœud pour cinq jours d'expérimentation) est trop faible pour faire des déductions à partir des coefficients de détermination. Les erreurs moyennes absolues et les écarts quadratiques-moyennes-racines des températures journalières diminuent d'environ 1°C par rapport aux écarts des températures à chaque pas de temps. Cela montre que le modèle reproduit la globalité des phénomènes de transfert thermique au niveau de la façade. Toutefois, il doit être amélioré pour mieux représenter les dynamismes rapides du système. Par conséquent, la prise en compte de toutes les capacités thermiques des parois pourrait améliorer le modèle. Le modèle surestime les températures aux nœuds T_{M1} et T_{M2} car les écarts moyens MBE sur ces nœuds sont positifs (respectivement $0,938^{\circ}\text{C}$ et $0,002^{\circ}\text{C}$). Mais, au nœud T_{g1} , il sous-estime la température ($MBE = -0,055$). Les estimateurs indiquent des valeurs moins performantes au nœud T_{M1} par rapport aux autres nœuds. Il est alors

nécessaire d'améliorer la modélisation thermique et aérodynamique dans la lame d'air pour diminuer les erreurs au nœud T_{M1} .

5. CONCLUSION

Cette étude présente la modélisation thermo-aérodynamique d'une façade photovoltaïque ventilée. Le modèle présenté est un modèle nodal utilisant les résistances thermiques et les capacités thermiques des composants de la façade. Afin d'évaluer la précision du modèle développé, une validation est effectuée avec les données des mesures expérimentales. L'observation des températures mesurées et des températures simulées a montré des écarts plus importants lors des pics de températures ou d'ensoleillement pendant la journée. Toutefois, en s'appuyant des résultats de validation du modèle, le modèle présente une précision satisfaisante. Néanmoins, il doit être amélioré pour mieux représenter les fluctuations des températures journalières de la façade. La prise en compte de la capacité thermique du module photovoltaïque et l'analyse de choix des corrélations empiriques de calcul de la température de l'environnement et des coefficients de convection peuvent améliorer la précision du modèle. Plusieurs perspectives s'ouvrent pour la poursuite de cette étude. En effet, afin d'évaluer les performances thermiques et électriques de la façade, il est intéressant de coupler le modèle développé dans cette étude à un logiciel de simulation thermique de bâtiment comme TRNSYS et EnergyPlus. Le calcul de ces performances permet également de mener des études paramétriques et des études d'optimisation des paramètres de la façade photovoltaïque considérée.

6. REMERCIEMENT

Les auteurs remercient les partenaires du projet européen LIFE CONIPHER (référence LIFE14 CCM/FR/000954), à savoir le coordinateur VICAT, le CEA, Araymond et Workspaces de leur avoir permis d'utiliser les données expérimentales pour cette étude.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Athienitis, Andreas K., Giovanni Barone, Annamaria Buonomano, et Adolfo Palombo. 2018. « Assessing Active and Passive Effects of Façade Building Integrated Photovoltaics/Thermal Systems: Dynamic Modelling and Simulation ». *Applied Energy* 209 (janvier): 355-82. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.039>.
- Brinkworth, B. J., R. H. Marshall, et Z. Ibarahim. 2000. « A Validated Model of Naturally Ventilated PV Cladding ». *Solar Energy* 69 (1): 67-81. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00076-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00076-6).
- European Commission. 2013. *Energy-Efficient Buildings: Multi-Annual Roadmap for the Contractual PPP under Horizon 2020*. Luxembourg: Publications office of the European Union.
- Guiavarch, Alain, et Bruno Peuportier. 2006. « Photovoltaic Collectors Efficiency According to Their Integration in Buildings ». *Solar Energy*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.07.004>.
- Incropera, Frank P., Adrienne S. Lavine, Theodore L. Bergman, et David P. DeWitt. 2013. « Principles of heat and mass transfer ». CERN Document Server. 2013. <https://cds.cern.ch/record/1556016>.
- Ooshaksaraei, Poorya, Kamaruzzaman Sopian, Saleem H. Zaidi, et Rozli Zulkifli. 2017. « Performance of Four Air-Based Photovoltaic Thermal Collectors Configurations with Bifacial Solar Cells ». *Renewable Energy* 102 (mars): 279-93. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.043>.
- Saadon, Syamimi. 2015. « Modeling and simulation of ventilated building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) envelope ». Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Saadon, Syamimi, Leon Gaillard, Stéphanie Giroux-Julien, et Christophe Ménézo. 2016. « Simulation Study of a Naturally-Ventilated Building Integrated Photovoltaic/Thermal (BIPV/T) Envelope ». *Renewable Energy* 87 (mars): 517-31. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.016>.