

Prédictibilité des performances énergétiques de double-peaux photovoltaïques-thermiques à grande échelle et en conditions réelles

Leon GAILLARD^{1,2*}, Christophe MENEZO^{1,2}, Stéphanie GIROUX³, Hervé PABIOU⁴, Rémi LE-BERRE⁵

¹INSA-Lyon, CETHIL, UMR5008, 69621, Villeurbanne, France

²Chaire INSA-EDF « Habitats et Innovations Énergétique », 69100 Villeurbanne, France

³Université Lyon 1, CETHIL, UMR5008, 69621, Villeurbanne

⁴CNRS, CETHIL, UMR5008, 69621, Villeurbanne

⁵EDF R&D, Renardières, Dpt ENERBAT, 77818 Moret sur Loing

* (auteur correspondant : leon.gaillard@insa-lyon.fr)

Résumé - La géométrie des doubles-peaux photovoltaïques adaptées aux différents besoins (énergétiques, esthétiques, confort des occupants) est complexe, en particulier dans les cas de la rénovation. Afin d'évaluer le potentiel de tels composants et d'étudier le comportement de double-peaux réalistes, l'expérimentation à l'échelle réelle est essentielle. Dans ce contexte, le projet RESSOURCES, a permis la conception de prototypes double-peaux PV-T en collaboration étroite avec un architecte, des fabricants de composants PV, un concepteur de structures de façade de bâtiment et un fournisseur d'électricité. Cet article présente l'évaluation expérimentale des 3 premiers prototypes, opérationnels depuis juillet 2011 et fonctionnant en mode de ventilation naturelle.

Nomenclature

A	surface d'échange, m^2	T	température moyenne, $^{\circ}C$
C_p	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}K^{-1}$	ΔT_{air}	écart de température d'air haut-bas, $^{\circ}C$
G_i	rayonnement solaire incident, $W.m^{-2}$	<i>Symboles grecs</i>	
h	coefficient de transfert global, $W.m^{-2}K^{-1}$	α	absorptivité, -
$h_{conv,ext}$	coefficient d'échange convectif vers l'extérieur, $W.m^{-2}K^{-1}$	η	rendement de photoconversion, -
$h_{rad,ext}$	coefficient d'échange radiatif vers l'extérieur, $W.m^{-2}K^{-1}$	ε	émissivité, -
$h_{rad,int}$	coefficient d'échange radiatif vers l'intérieur de la cavité, $W.m^{-2}K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
m	débit massique dans la lame d'air, $kg.s^{-1}$	b	paroi primaire du bâtiment
Q_g	chaleur récupérée par la lame d'air, W	e	façade PV
		f	air de la cavité
		s	ciel

1. Introduction

Pour atteindre les objectifs « 20-20-20 » de l'Union Européenne [1], sur l'énergie à l'horizon 2050, la France, comme d'autres membres, travaille sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et la production d'énergie d'origine renouvelable, tant pour les structures neuves que pour la rénovation du parc existant. Dans ce contexte, le déploiement massif de systèmes photovoltaïques en milieu urbain peut s'appuyer sur le développement de composants actifs multi-énergies et multifonctionnels. Parmi les configurations envisagées, les double-peaux PV-thermiques (PV-T) ventilées représentent une solution intéressante pour répondre aux besoins (électricité, chaleur, rafraîchissement) du bâtiment et en améliorer ses performances à travers une valorisation des toitures et des façades.

Cela implique une redéfinition de l'enveloppe (toiture et façades) classiquement concernée par l'isolation et l'étanchéité, d'inclure des fonctionnalités dynamique (variation saisonnière ou quotidienne) et actives (production d'énergie et moteur de la ventilation). Les composants photovoltaïques intégrés au bâtiment (PV) et ventilés permettent une production locale d'électricité et un contrôle de la température par convection naturelle ou forcée. L'élévation en température des cellules de silicium cristallin peut en effet être limitée par ventilation naturelle (BIPV) ou forcée (PV-T) [2]. La performance de ces systèmes photovoltaïques intégrés est très sensible à leur conception. La demande pour les systèmes photovoltaïques entièrement intégrés dans le cadre de construction (façade, toiture) est encore assez récente et peu d'études, de retour d'expériences sont disponibles à ce jour.

Le projet Ressources, soutenu par l'ADEME, vise à progresser sur la compréhension des configurations de type double-peau. Trois prototypes ont été mis en œuvre, l'un sur : une façade d'immeuble de bureaux existant (Figure 1) et les deux autres sur des maisons individuelles (Figure 2). Dans cet article, nous examinons dans un premier temps le comportement thermique heure par heure de ces trois prototypes lors d'une journée type ensoleillée et non ventée. . Puis, nous présentons un modèle empirique de prédiction de la quantité de chaleur extraite que nous confrontons aux grandeurs mesurées.



Figure 1 : *prototype de double-peau PV plissée implanté sur une façade d'immeuble de bureaux HBS*



Figure 2 : *prototypes de double-peaux PV sur maisons individuelles. Maisons jumelles ETNA d'EDF R&D. Gauche: ETNA B. Droite: ETNA A.*

2. Description des prototypes et de leur instrumentation

Les prototypes conçus (figure 1 et 2) présentent trois géométries différentes de double-peaux de densité de modules PV, de couleur de cellules et de degrés de semi-transparence distinctes. La ventilation naturelle induite par l'effet cheminée au sein de la lame d'air a pour objectif le maintien de la température des panneaux photovoltaïques permettant de limiter la dégradation de leur performance et leur vieillissement.

Un prototype de configuration double-peau PV plissé vertical de hauteur 7.7 m (deux étages), largeur 4.5 m a été installé sur le site de HBS à Toulouse, sur la façade ouest nord ouest d'un bâtiment tertiaire en service toute l'année. Le prototype comprend une série de structures prismatiques adjacentes en aluminium, verres teintés et modules photovoltaïques, afin d'améliorer l'orientation des composants PV par rapport au soleil.

Sur le site d'EDF R&D des Renardières deux doubles façades photovoltaïques ont été installées sur la façade des cellules ETNA orientée sud / sud-ouest. Ces deux cellules d'essais sont jumelles en termes de dimension, de caractéristiques thermiques et de contrôle de l'ambiance intérieure [3]. Les prototypes ETNA A et B comprennent chacun une paroi PV couvrant la paroi verticale et le toit des maisons en continuité (jonction étanche). La double-peau mise en œuvre sur ETNA A est de largeur constante (lame d'air de 70 cm). Celle mise en œuvre sur ETNA B, est de type véranda présentant un espace de vie supplémentaire de 12m². Compte tenu de cette surface au sol ajoutée, la double peau est convergente sur la partie toiture, présentant une section réduite (de hauteur 43.6 cm) au niveau de la faîtière. En façade, ces deux double-peaux mesurent 5,6 m de hauteur et 3 m d'envergure. La puissance crête installée est respectivement 3,3 et 3.8kWc sur ETNA A et ETNA B.

L'instrumentation des trois prototypes a été précédemment présentée au congrès SFT en 2013 [4]. Concernant la métrologie mise en place sur les trois prototypes, les températures de surface ont été mesurées en utilisant des thermocouples de type K insérés répartis sur la colonne centrale de chaque prototype : pour le prototype HBS, 16 thermocouples sont situés de chaque côté de la façade PV ; pour les prototypes ETNA, 9 thermocouples ont été installés sur la face externe et 7 sur la face interne des parois PV. Un système de tubes minces ou « peignes » ont été installés dans la cavité d'air pour supporter les sondes de vitesse (anémomètres Ahlborn FVA935 TH4 réglées sur l'intervalle [0,05;2,0] m/s) et de température d'air. Sur le composant de façade plissé (immeuble de bureau), la température de l'air et la vitesse ont été mesurées à la fois dans la section la plus large et la plus étroite de la colonne de prisme central, en trois hauteurs. Une station météorologique donnant les indications de température ambiante, de vent, d'humidité et de pression atmosphérique a été installée sur chaque site. Un pyranomètre et pyréliomètre permettent de mesurer le rayonnement global sur une surface horizontale ainsi que le rayonnement direct collimaté. Deux pyranomètres ont également été fixés en partie haute et basse de la façade et d'autres capteurs ont été installés pour mesurer la température ambiante, le vent, l'humidité et la pression atmosphérique. Concernant le prototype HBS-Technal, le réseau de capteurs est connecté au système d'acquisition de données (Keithley 3706 enregistreur de données et 2 cartes Almemo).

Une interface d'acquisition de données a été développée sous le logiciel Labview, qui se compose d'une simple boucle prenant des mesures toutes les 2 minutes. Cette interface est pilotée à distance par l'intermédiaire d'une interface VNC. Pour les prototypes ETNA A & B, l'acquisition de données est réalisée sur site. Les mesures effectuées sont converties et importées dans une base de données (BDD) MySQL gérée par le logiciel open source Scilab, logiciel sous lequel sont également implémentés des requêtes structurées et des scripts d'analyse [5].

L'évaluation comparative des prototypes est faite sur un jeu de données de 133 jours du 25/06 au 5/11/2012. Durant cette période les prototypes ont fonctionné en ventilation naturelle. Les données ont d'abord été filtrées pour identifier des jours types ensoleillés et peu ventés. Les critères de sélection sont basés sur les sommes de l'énergie solaire incidente puis de la vitesse du vent. Les jours types sont définis comme ceux pour lesquels ces deux variables sommes sont respectivement supérieures et inférieure à un seuil.

3. Analyse et résultats expérimentaux

Le 9 septembre 2012 a été sélectionné comme journée type (ensoleillée et peu ventée) pour les prototypes ETNA et celui du site HBS. La composante directe de l'énergie solaire cumulée était de 6,93 kWh/m² pour ETNA (Les Renardières) et de 6,88 kWh/m² à HBS-Technal (Toulouse). L'énergie solaire cumulée incidente sur un plan horizontal (pyranomètre)

était respectivement de 5,56 kWh/m² et de 5,50 kWh/m². La vitesse moyenne du vent perpendiculaire à la façade PV était inférieure à 2m/s pour les deux sites. Sur le site ETNA la température ambiante a varié dans l'intervalle [10,5 ; 32,6] °C, correspondant à une gamme plus étendue que celle du site HBS-Technal, [16,8 ; 31,7] °C. Nous avons précédemment présenté la performance électrique, l'évolution de températures et le débit massique constaté lors de ce jour type [4]. Pour approfondir l'évaluation des prototypes comme barrière thermique, nous nous intéressons au bilan enthalpique en configuration « été ». La chaleur récupérée par la lame d'air est définie par le produit du débit massique, la capacité thermique, et l'écart de température entrée-sortie du composant. Le débit massique a été calculé à partir de la moyenne (spatiale) pondérée des mesures instantanées de vitesse dans une section de la lame d'air et de la masse volumique estimée à partir des températures. Le bilan enthalpique peut être également défini à partir des flux de chaleurs provenant des deux parois, donc en considérant ainsi les apports provenant du bâtiment et de la peau PV. Le bilan énergétique du système est exprimé par l'équation 1. Cette formulation permet également l'évaluation d'un coefficient de transfert thermique global [6], pour les températures de surfaces en entrée et en sortie de lame d'air connues.

$$\dot{m}C_p\Delta T_{\text{air}} = h_e A_e (T_e - T_f) + h_b A_b (T_b - T_f) \quad (1)$$

ΔT_{air} est l'écart de température d'air entrée-sortie ; les indices e, f, et b correspondent à la façade PV, la lame d'air, et la paroi primaire du bâtiment respectivement ; h est le coefficient de transfert par convection pour une surface d'échange A.

Dans cette formulation, le couplage radiatif au travers la deuxième paroi (semi-transparente) ainsi que l'effet du vent sont négligés, comme le transfert de masse avec l'intérieur du bâtiment. En supposant $h_e=h_b$, et $A_e=A_b$ on obtient

$$\begin{aligned} \dot{m}C_p\Delta T_{\text{air}} &= hA((T_e - T_f) + (T_b - T_f)) \\ \Rightarrow h &= \frac{\dot{m}C_p\Delta T_{\text{air}}}{A(T_e + T_b - 2T_f)} \end{aligned} \quad (2)$$

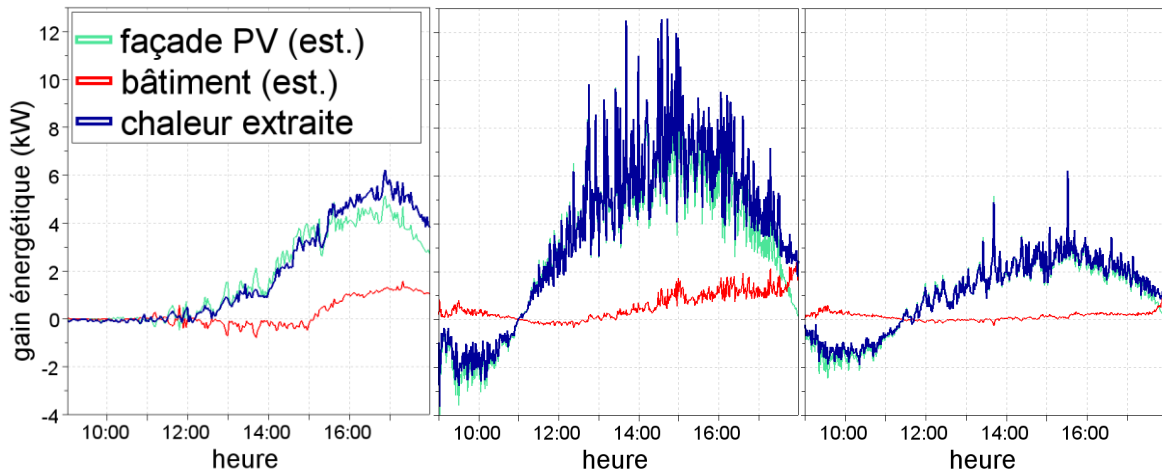


Figure 3 : *Quantité de chaleur récupérée par la lame d'air des trois composants PV-T double-peaux, ainsi que les contributions estimées côtés bâtiment et façade PV. De gauche à droite : HBS, ETNA A, ETNA B.*

La figure 3 montre l'évolution de la quantité de chaleur récupérée pendant un jour ensoleillé pour les trois prototypes. Le jour a été choisi pour sa similarité en termes de rayonnement solaire pour les deux sites. Dans la figure, chaque graphe présente le bilan enthalpique de la lame d'air, ainsi que les contributions du bâtiment et de la façade PV. Pour

le prototype HBS, le flux de chaleur atteint un maximum de $5,0 \pm 0,1$ kW vers 17h, ce qui correspond à un rendement thermique instantané, défini par le rapport de puissance extraite et rayonnement solaire incident [7], de $24,7 \pm 4,9\%$. Le comportement du prototype ETNA A pendant l'après-midi est similaire à celui de HBS, montrant pourtant un degré de fluctuations plus important. Ce prototype récupère au maximum $8,0 \pm 2,0$ kW, équivalent à un rendement thermique instantané de $42,8 \pm 10,7\%$. On peut donc déduire que le prototype ETNA A est le plus efficace. Le prototype ETNA B est le moins performant, avec une chaleur récupérée maximale de $2,5 \pm 1,0$ kW, un rendement de $11,3 \pm 4,5\%$, et un niveau de fluctuation plus élevé que le prototype HBS.

4. Proposition d'un modèle de comportement empirique

Les variations périodiques ou récurrentes de l'état du système impliquent des corrélations causales ou de coïncidence entre le système et son environnement. Pour étudier ces corrélations, et afin de déduire si une simple description fonctionnelle est pertinente pour une période étendue, des modèles de comportement ont été construits afin de retranscrire la chaleur récupérée sur des séquences de jours similaires.

Les modèles de comportement sont élaborés à partir des connaissances physiques (bilan énergétique) et les corrélations identifiées. Une méthodologie classique de régression linéaire a été appliquée pour l'identification des coefficients des modèles : pour un modèle donné, la matrice de conception correspondante est établie puis utilisée pour évaluer les coefficients de régression par l'intermédiaire de la solution

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (3)$$

Avec y le vecteur de la variable réponse, β le vecteur des coefficients de régression, et X la matrice de conception. Ce dernier se compose d'une colonne par variable. Le calcul des résidus modèle-mesure permet de comparer les modèles. La solution obtenue pour un échantillon de données ensoleillées en été a été ensuite extrapolée sur une année complète afin d'évaluer sa validité.

Plutôt que de chercher le modèle optimal pour prédire la réponse thermique du prototype, l'objectif de cette analyse est d'évaluer la pertinence de cette approche pour les systèmes complexes, et de déterminer si des modèles stationnaires peuvent décrire le comportement de tels systèmes PV en conditions réelles. Si elle s'avère fiable, l'approche fournira une méthode de prédiction de performances du système sans description détaillée de la géométrie, des propriétés physiques de la double-peau PV et de l'environnement.

4.1. Modèle stationnaire pour l'évaluation de la chaleur extraite

Le bilan énergétique de la façade PV est décrit par l'équation 4 lorsque l'inertie n'est pas considérée. Le flux net de chaleur extrait par la lame d'air, Q_g , est obtenu à partir des variables indépendantes suivantes : la température ambiante T_a , la température de la façade PV, T_e , la température de la paroi primaire du bâtiment, T_b , le rayonnement incident et la température du ciel T_s .

$$\frac{Q_g}{A} = [h_{\text{conv,ext}} + h_{\text{rad,ext}}](T_a - T_e) + [h_{\text{rad,ext}}](T_s^4 - T_a^4) + [h_{\text{rad,int}}](T_e^4 - T_b^4) + \left[\alpha \left(1 - \frac{\eta}{\alpha} \right) \right] G_i \quad (4)$$

Le regroupement des termes pour les transferts convectif et radiatif vers l'extérieur sert à diminuer la sensibilité du modèle à T_s qui a été estimée à partir de la température ambiante par l'équation suivante :

$$T_s = T_a \varepsilon_s^{0.25} \quad (5)$$

Avec les températures en Kelvin, et une émissivité du ciel, ε_s , calculée à partir de l'humidité relative et la température de rosée. Les termes identifiés par les crochets dans l'équation 4 correspondent au vecteur des coefficients à estimer par régression :

$$\frac{Q_g}{A} = [\beta_0](T_a - T_m) + [\beta_1](T_s^4 - T_a^4) + [\beta_2]\sigma(T_m^4 - T_b^4) + [\beta_3](G_i) \quad (6)$$

Pour la modélisation numérique des composants PV-T, des formulations similaires ont été appliquées par plusieurs auteurs, par exemple [8,9]. Cependant, dans ce domaine, peu d'études expérimentales sont basées sur une approche similaire [10].

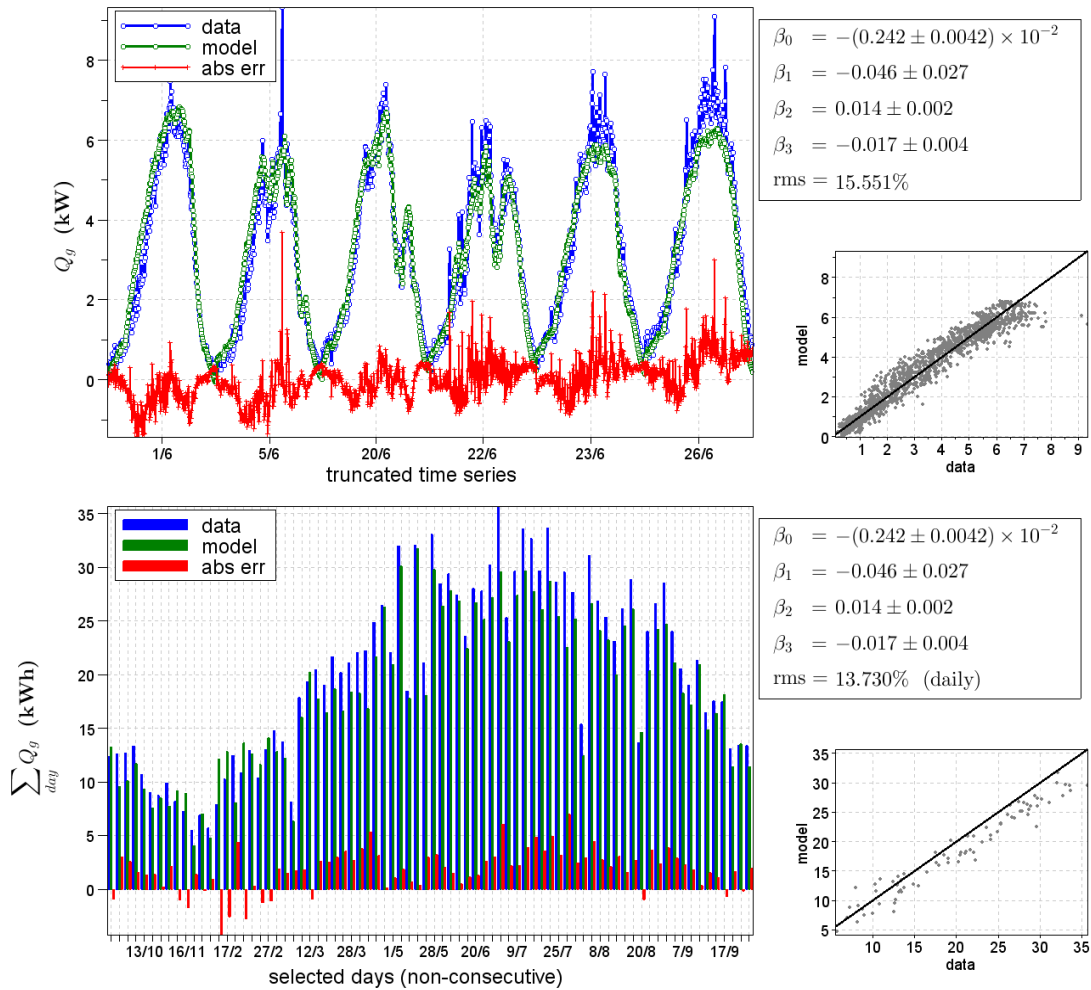


Figure 4 : Modèle stationnaire pour l'évaluation de la chaleur récupérée par la lame. En haut : comparaison modèle mesure pour une solution du modèle sur une séquence de jours ensoleillés en juin 2012. En bas : extrapolation de la solution aux jours ensoleillés durant une année.

La projection plane de la paroi plissée a été utilisée comme évaluation de la surface. En supposant la validité de l'équation 4, les coefficients β de la solution du modèle obtenu par la méthode de régression linéaire tiennent intrinsèquement compte des propriétés physiques du système : α le coefficient d'absorptivité de la façade PV, η le rendement (de photoconversion) des modules PV, $h_{conv,ext}$ le coefficient de transfert convectif vers l'extérieur (couplage à la température ambiante), et $h_{rad,ext}$ & $h_{rad,int}$ indiquent respectivement le transfert radiatif de la façade PV vers l'extérieur (température du ciel) et le bâtiment. L'ensemble de

ces valeurs sont ici supposées constantes. Une variante du modèle, tenant compte de l'impact de la vitesse du vent sur $h_{\text{conv,ext}}$ a été également considérée, mais cette modification n'a pas pu améliorer la qualité de la solution.

En termes de la solution générale du modèle, équation 3, on obtient

$$\begin{aligned}
 \mathbf{y} &= \left[\left(\frac{Q_g}{A} \right)_i \quad \dots \quad \left(\frac{Q_g}{A} \right)_n \right]^T, & \boldsymbol{\beta} &= \left[(h_{\text{conv,ext}} + h_{\text{rad,ext}}) \quad h_{\text{rad,ext}} \quad h_{\text{rad,int}} \quad \alpha \left(1 - \frac{\eta}{\alpha} \right) \right]^T \\
 \mathbf{X} &= \begin{bmatrix} (T_a - T_e)_i & (T_s^4 - T_a^4)_i & (T_e^4 - T_b^4)_i & (G_i)_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (T_a - T_e)_n & (T_s^4 - T_a^4)_n & (T_e^4 - T_b^4)_n & (G_i)_n \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Le modèle paramétrique estimant la quantité de chaleur récupérée par la lame d'air a été appliqué à un jeu de données comprenant 10 jours ensoleillés peu ventés en été 2012. Dans la figure 4, la solution du modèle est superposée sur les données expérimentales. Pour la régression linéaire, uniquement les données de l'intervalle 12h00 – 21h00 de chaque jour sont retenues (pendant lequel un flux de chaleur non-négligeable est constaté). En général, le modèle est capable de reproduire l'évolution du système, sauf pour les fluctuations de courte durée, ce qui est attendu pour un modèle pseudo-stationnaire. Une prise en compte du comportement transitoire pourra être effectuée par des modifications du modèle, par exemple par l'intégration de termes autorégressifs. Certaines anomalies sont présentes dans la séquence considérée où les écarts modèle-mesure sont plus importants : ceux-ci sont souvent accompagnés par une évolution similaire de la production électrique, et donc peuvent être attribués aux effets d'ombrage partiels. Malgré la qualité statistique de la solution trouvée, les coefficients ne semblent pas être physiquement significatifs : selon la solution trouvée, l'influence du rayonnement solaire est négligeable. Ce résultat est dû à la covariance des variables, par exemple la température ambiante et le rayonnement solaire : sans contrainte, le coefficient de régression associé à la température ambiante peut indirectement intégrer l'influence du rayonnement sur la chaleur extraite. Une valeur importante de ce coefficient sera compensée par une diminution de l'autre. Cette faiblesse peut être abordée par la considération d'une méthode de régression sous contrainte.

La solution obtenue pour la séquence de 10 jours a été extrapolée pour les jours ensoleillés pendant une année. La confrontation de la solution avec ces données est présentée sur la figure 4, en termes de chaleur cumulée par jour. On constate une précision avec une marge d'erreur inférieure à 14%, et le modèle a tendance à sous-estimer la quantité de chaleur extraite. La comparaison du modèle avec les résultats expérimentaux indique que le comportement du composant double-peaux PV-T est prédictible par un modèle pseudo-stationnaire pour les jours peu ventés.

5. Discussion et conclusions

Nous avons présenté une évaluation expérimentale de la réponse thermique de composants PV-T de type double-peaux naturellement ventilées en conditions réelles de fonctionnement. Malgré la complexité des composants et l'hétérogénéité de l'environnement dans lesquels ils sont étudiés, une corrélation évidente est constatée entre les sollicitations externes (rayonnement, températures) et l'état du système. Au-delà de la mise en évidence d'une évolution journalière du système qui suit les conditions environnementales, nous avons montré que cette évolution est reproduite avec un degré de précision raisonnable par un modèle pseudo-stationnaire à 4 variables. Ceci est un résultat important, étant donné la

complexité du système, les propriétés physiques mal ou pas connues, et les mesures très limitées (même si l'instrumentation des prototypes étudiés reste supérieure à celle généralement disponible sur les installations réelles). Les incertitudes associées aux solutions obtenues par la méthode de régression linéaire sont en partie la conséquence de ces limitations.

En ce qui concerne les perspectives, une investigation par des méthodes de type « fouille de données » est en cours pour améliorer la méthodologie du choix de modèle à partir de ces données expérimentales. De telles méthodes peuvent également contribuer à l'exploration de données pour identifier les comportements dits normaux et les comportements singuliers de tels systèmes.

Les prototypes HBS et ETNA A & B du projet RESSOURCES sont suivis depuis 2011. Dans la prochaine phase de l'expérience, deux prototypes de plus aux spécificités géométriques différentes seront installés pour étudier d'autres configurations de composants double-peaux PV ventilées.

Références

- [1] Energy roadmap 2050, European Commission, http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index_en.htm, (2011).
- [2] T. T. Chow, A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, *Applied Energy* 87 (2010), 365.
- [3] J. Neymark, P. Girault, G. Guyon, R. Judkoff, R. Le-Berre, J. Ojalvo, P. Reimer, The “ETNA Bestest” Empirical Validation Data Set, IBPSA BS05 proceedings, Montréal, (2005), pp839-846.
- [4] L. Gaillard, H. Pabiou, S. Giroux, R. Le-Berre, C. Ménézo, Etude expérimentale comparative de trois composants photovoltaïques intégrés au bâtiment (PVIB) en configuration double-façade naturellement ventilée, congrès SFT 2013, Gérardmer, 28-31 mai 2013.
- [5] Scilab Enterprises, Scilab: Free and Open Source software for numerical computation, [logiciel], disponible à : <http://www.scilab.org> (2012).
- [6] A. Zöllner, E. R. F. Winter, R. Viskanta, Experimental studies of combined heat transfer in turbulent mixed convection fluid flows in double-skin-façades, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 (2002) 4401.
- [7] K. S. Ong, C. C. Chow, Performance of a Solar Chimney, *Solar Energy* 74 (2003) 1-17.
- [8] A. Guiavarch, B. Peuportier, Photovoltaic collectors efficiency according to their integration in buildings, *Solar Energy* 80 (2006) 65.
- [9] T.T. Chow, Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model, *Solar Energy* 75 (2003) 143-152.
- [10] T. Guiot, S. Boddaert, B. Boillot, Y.-B. Assoa, L. Gaillard, Thermal behaviour of rooftop BIPV systems: an experimental approach, Proceedings 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference (2012) p4136-4139.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par le programme national PREBAT géré par l'ADEME : projet RESSOURCES (Convention ADEME 0705C0076). Nous sommes reconnaissants de l'aide apportée par les partenaires: EDF R&D (R. Le-Berre), HBS-Technal (P. Lahbib, J. H. Fortier), Jacques Ferrier Architectures (O. Cornefert), Tenesol (J. C. Marcel).