

Etude expérimentale comparative de trois composants photovoltaïques intégrés au bâtiment (PVIB) en configuration double-façade naturellement ventilée

Leon GAILLARD^{1,2*}, Hervé PABIOU³, Stéphanie GIROUX⁴, Rémi LE-BERRE⁵,
Christophe MENEZO^{1,2}

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

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

³CNRS, CETHIL, UMR5008, 69621, Villeurbanne, France

⁴Université Lyon 1, CETHIL, UMR5008, 69621, Villeurbanne, France

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

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

Résumé - Les systèmes photovoltaïques (PV) intégrés au bâtiment offrent une solution prometteuse pour une production locale d'électricité propre et un refroidissement ou un chauffage par convection naturelle ou forcée. Dans cet article nous présentons à travers le projet ADEME "Ressources", une étude de ces composants développés à grande échelle (pour les constructions neuves et la rénovation). À ce jour, les études ont porté sur 3 prototypes d'enveloppes de bâtiment en configuration double-peau naturellement ventilée implantés sur des bâtiments réels : deux pour les maisons individuelles (à Moret sur Loing –site EDF R&D) et un pour un immeuble de bureaux (à Toulouse - site HBS-Technal). Cet article se compose d'une évaluation comparative des trois systèmes en termes de la production électrique et de refroidissement de cellules PV.

1. Introduction

L'Union Européenne a publié en janvier 2007 une feuille de route sur sa stratégie à long terme concernant le développement des énergies renouvelables [1]. Dans ce cadre, la cible des 3x20 consiste à atteindre pour 2020, une réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre, une baisse de 20% de la consommation énergétique par rapport aux projections sans contrainte et un niveau de 20% de production d'énergie renouvelable au sein du mixe énergétique européen. Le secteur du bâtiment étant le plus grand consommateur d'énergie le scénario européen vise à accroître la part d'énergie renouvelable pour répondre aux besoins de ce secteur (chaleur, froid et électricité). Les systèmes photovoltaïques intégrés au bâtiment (PVIB) sont incontournables pour la réalisation de bâtiments à énergie positive (BEPOS) dans un futur proche. Parmi les nombreux composants solaires étudiés, les double-peaux photovoltaïques thermiques (PV-T) permettent à la fois le refroidissement passif de composants PV (pour une amélioration du rendement électrique et de la durée de vie) et la valorisation du tirage thermique ou de la chaleur récupérée pour le confort et l'efficacité énergétique du bâtiment [2]. Si les études sont nombreuses concernant la validation de prototypes à échelle réduite et en conditions contrôlées, la confrontation aux résultats de mesures en vraie grandeur et en conditions réelles reste insuffisante et délicate à réaliser [3]. C'est dans ce contexte que le projet ADEME RESSOURCES, coordonné par le CETHIL, a permis la conception, la réalisation, l'installation et le suivi de prototypes. Nous présentons l'évaluation comparative de trois double-peaux en configuration de fonctionnement « été » (ventilation naturelle), avec les entrées et les sorties des lames d'air ouvertes vers l'extérieur.

2. Dispositifs expérimentaux

Les trois prototypes double-peaux PV-T sont présentés sur les figures 1 à 3. Aux Renardières, site EDF R&D deux prototypes double-peaux ont été installés sur la façade sud sud-ouest du laboratoire ETNA constitué de deux cellules jumelles du point de vue thermique et géométrique [4]. Chaque prototype consiste en une façade PV de 5.6 m de hauteur et 3m de largeur et une section de toiture PV. Le prototype A est de type façade/toiture (épaisseur de la lame d'air de 0,7 m). Le prototype B est de configuration véranda/toiture, qui offre un espace de vie supplémentaire de 12 m² au sol (épaisseur minimale de la lame d'air de 0.436 m). Les puissances crêtes des champs PV des prototypes A et B sont de 3.3 kWc et 3.8 kWc. La production électrique est mesurée en sortie d'onduleur en distinguant toiture et façade. Un troisième prototype double-peau PV-T a été installé chez HBS-Technal à Toulouse, sur un bâtiment de bureaux (open space) occupé sur trois niveaux. Le prototype vertical de hauteur 7.7 m, largeur 4.5 m couvre entièrement les deux premiers étages. La largeur de la lame d'air est de 60 cm et la puissance crête de 1.2 kWc. Ce prototype est orienté à l'ouest et les panneaux PV font un angle de 41° par rapport au sud d'où la forme plissée de la façade. Les modules PV ont été répartis en 3 champs, les noms « bloc » 1 à 3 correspondant respectivement au champ du haut, du milieu et du bas. Chaque bloc est relié à une charge résistive constante permettant de suivre la puissance produite.

L'instrumentation des trois prototypes double-peaux est présentée sur les figures 2 et 3. Les températures sont mesurées par des thermocouples de type K installés sur un axe central de chaque composant. Des "peignes" constitués de tubes fins, ont été accrochés aux structures métalliques porteuses, pour permettre de positionner des sondes de vitesse (anémomètres de type Ahlborn FVA935 TH4 sensibles dans la gamme [0,05 ; 2,0] m/s) et de température dans la largeur de la lame d'air. Pour le composant plissé, les mesures de vitesse et de température ont été prises dans la partie large et la partie étroite de la lame d'air. La moyenne spatiale de ces mesures a été calculée par simple moyenne arithmétique ou par moyenne pondérée suivant les zones où la géométrie le nécessite. Les sites sont équipés d'une station météorologique, comprenant des pyranomètres pour le rayonnement global sur un plan horizontale et dans le plan des modules PV, un pyrhéliomètre pour le rayonnement direct, ainsi que des capteurs pour la température ambiante, les conditions du vent, l'humidité et la pression atmosphérique. Pour le prototype HBS-Technal, les capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition de données (Keithley 3706 datalogger et 2 centrales de type Almemo).



Figure 1 : Trois prototypes double-peaux PV-T du projet RESSOURCES. De gauche à droite : ETNA B, ETNA A, et HBS-Technal

Un système d'acquisition de données a été développé avec le logiciel Labview, qui se compose d'une simple boucle prenant des mesures toutes les 2 minutes. Le système

d'acquisition de données est géré à distance par l'intermédiaire d'une interface VNC. Pour les prototypes ETNA A & B, l'acquisition de données est surveillée in situ. En amont de l'analyse, les données ont été converties et importées dans une base de données (BDD) MySQL. Le logiciel opensource Scilab a servi d'interface à la BDD et comme environnement pour l'élaboration des scripts d'analyse [5]. La combinaison de BDD et du logiciel Scilab a permis l'exploitation de requêtes structurées de types SQL.

	Capteur	ETNA A	ETNA B
→	Vitesse d'air	2 x 5	2 x 5
■	Température de surface	PV ext. 9 PV int. 7 Tuiles 2 Mur ext. 2	PV ext. 9 PV int. 7 Tuiles 2 Mur ext. 2
⌋	Température d'air	6	6
○	Hygrométrie	3	3
⊙	Pyranomètre	2	1

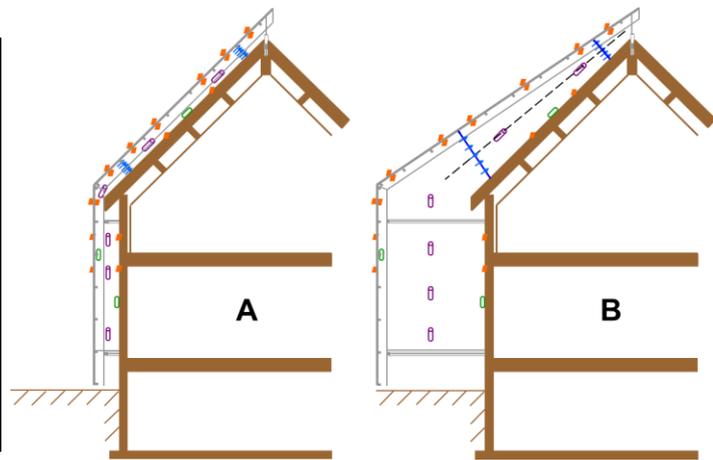


Figure 2 : Schéma de prototypes ETNA avec l'emplacement des principaux capteurs

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 typiques ensoleillés peu ventés. Pour cela, on a effectué les sommes d'une part de l'énergie solaire incidente et d'autre part de la vitesse du vent. Les jours typiques sont définis comme ceux pour lesquels ces deux sommes sont respectivement supérieure et inférieure à un seuil.

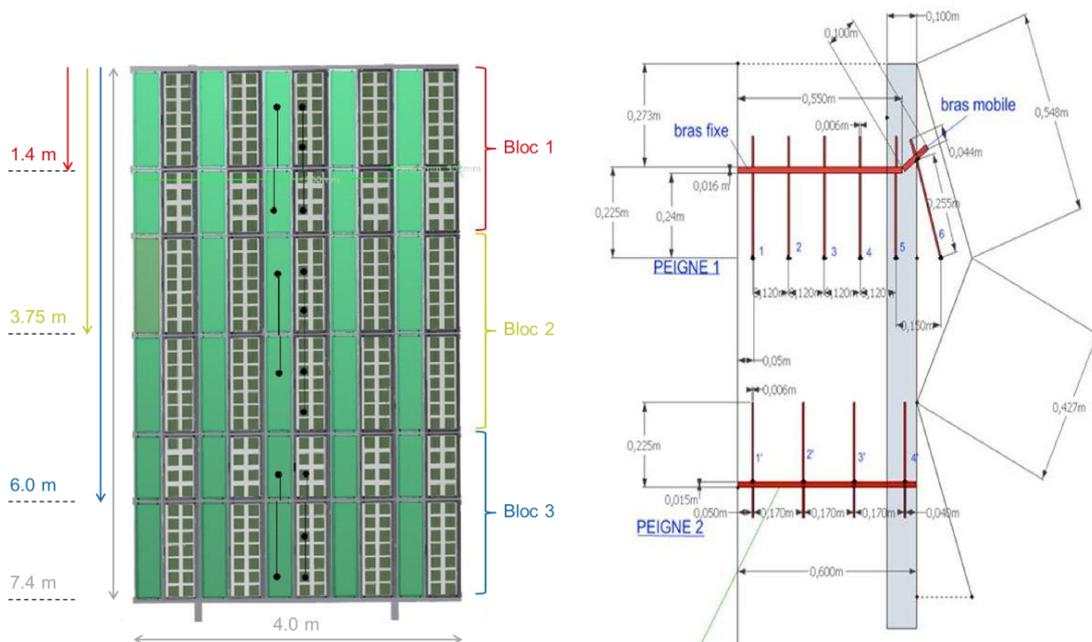


Figure 3 : Schéma du prototype HBS-Technal avec instrumentation. A gauche : vue de devant vers la façade. A droite : vue d'en haut d'une section prismatique instrumentée

3. Résultats

3.1. Comparaison des jours types

Le 9 septembre 2012 a été sélectionné comme journée type (ensoleillée peu ventée) pour les prototypes ETNA et du site HBS qui est très similaire pour cette date. La composante directe de l'énergie solaire cumulée était 6,93 kWh/m² pour ETNA et 6,88 kWh/m² à HBS-Technal. L'énergie solaire cumulée incidente à l'horizontale (pyranomètre) était respectivement 5,56 kWh/m² et 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.

Les évolutions des conditions environnementales climatiques et des états thermique et aéraulique des trois prototypes sont résumées sur la figure 4. Pour l'ensemble des prototypes, le comportement est caractérisé par une réponse électrique et thermique décalée dans l'après-midi du fait de leur orientation sud-ouest. Le pic de rayonnement incident sur la façade HBS-Technal est vers 17h. Pour les champs PV sur les toitures ETNA, le rayonnement incident atteint son maximum vers 13h00 et 13h30 car leur inclinaison est légèrement différente. Les figures 4 c) et d) présentent l'évolution de températures lors de la journée type. Comme attendu, les températures maximales des champs PV coïncident avec le pic du rayonnement incident. Malgré un rayonnement incident plus important sur les toitures des prototypes ETNA, les températures moyennes des champs sont similaires à celle de la façade HBS-Technal. Ceci est en lien direct avec un effet cheminé plus fort malgré l'inclinaison comme nous le verrons sur les débits pour ces derniers. Nous observons un déphasage temporel de plus d'une heure entre les pics de température sur la paroi primaire et secondaire (PV) du bâtiment. La fluctuation de la température est aussi moins importante.

Les prototypes HBS-Technal et ETNA diffèrent aussi sur la température d'air à la sortie et en débit massique. Pour le prototype HBS-Technal (fig 4c), l'écart de température dT_{air} (sortie - ambiante) est positif tout au long de la journée. En effet, il augmente avec le rayonnement incident sur la façade jusqu'à un maximum de 10 °C. La diminution de cet écart apparaît retardée en fin d'après-midi (décroissance du rayonnement) et est en lien avec un flux de chaleur provenant du bâtiment. Pour les prototypes ETNA (fig. 4d), dT_{air} est négatif le matin lorsqu'il y a un rayonnement incident sur les toitures alors que les façades restent ombragées. Un écart minimal de -5°C est constaté vers 9h00 pour les deux double-peaux. Une fois que le rayonnement incident sur la façade augmente en intensité, cette tendance est inversée : un écart maximal de +7 °C est constaté vers 16h00 pour ETNA A (double-façade) est de +4 °C pour ETNA B (véranda + double-peau).

Le débit massique a été calculé à partir de la moyenne (spatiale) pondérée des mesures instantanées de vitesses dans une section de la lame d'air et de la masse volumique estimée à partir des températures. L'évolution du débit massique, présentée sur les figures 4 e) et f), indique que le débit maximal de la double-peau HBS-Technal est plus faible que pour les autres systèmes ce qui est normal étant donné la plus faible densité de cellules PV (zone opaques) et donc un rapport entre surface transparente et surface opaque plus important de la double-peau. Cependant, contrairement aux autres configurations (ETNA), cet écoulement persiste plusieurs heures après le crépuscule. Une analyse précédente a montré que l'écoulement de nuit est induit par une injection de chaleur par la paroi primaire du bâtiment [6]. Pendant la journée, un débit massique plus important mais aussi plus fluctuant est constaté pour les prototypes ETNA, indiquant un écoulement plus turbulent.

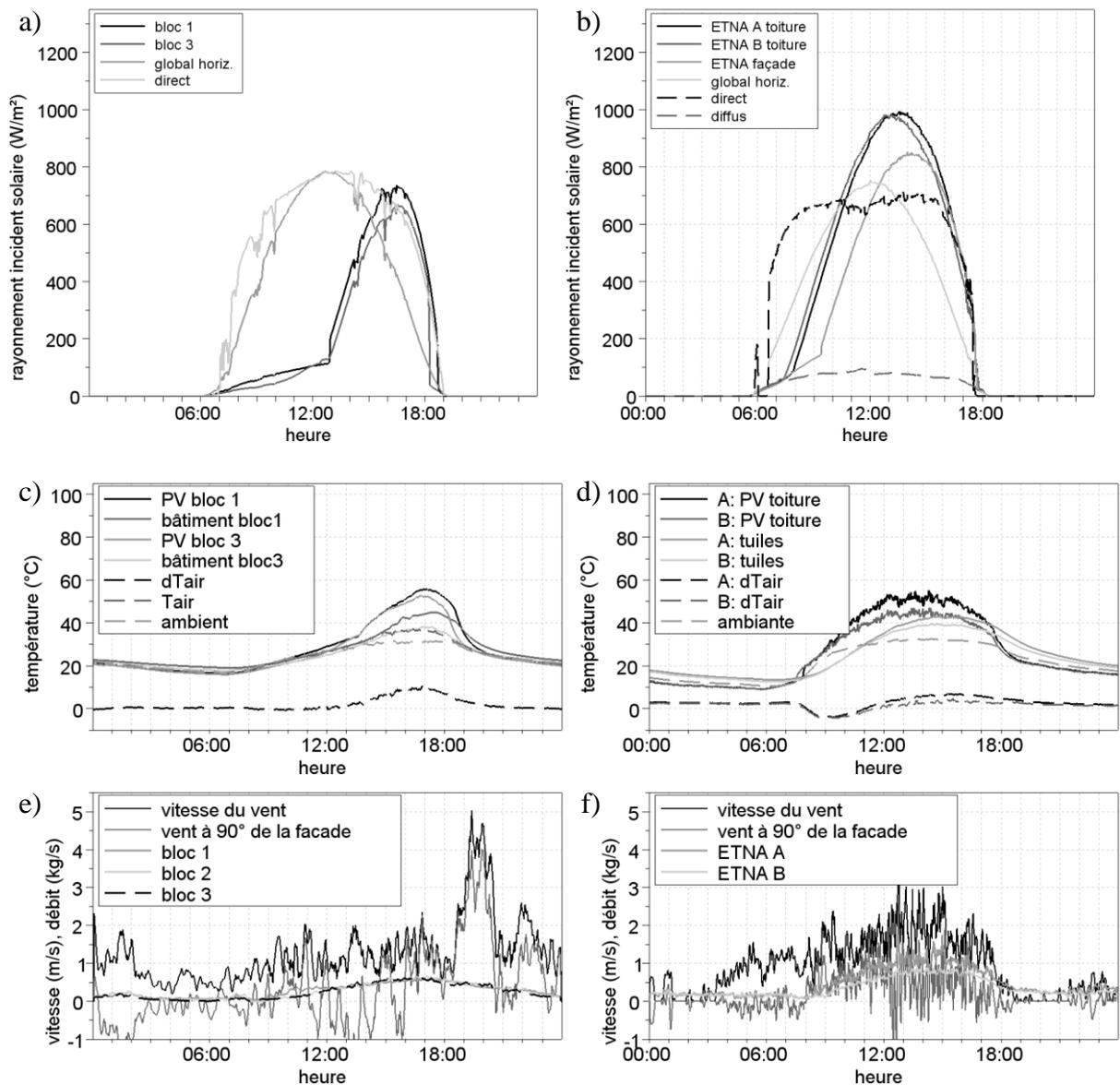


Figure 4 : rayonnement, températures, vitesse du vent et débit massique pour un jour type. A gauche : prototype HBS-Technal. A droite : prototypes ETNA A & B

3.2. Performance électrique

Les figures 5a) et b) présentent la puissance électrique des champs PV adimensionnée par leur puissance crête. Pour les champs ETNA, une corrélation linéaire est apparente. En revanche, la production électrique des champs PV installé sur la façade HBS-Technal est caractérisée par une évolution non-linéaire en fonction du rayonnement incident. Une saturation de la production électrique est évidente pour un rayonnement incident supérieur à $\sim 600 \text{ W/m}^2$. Cette tendance est due à la charge résistive constante reliée à chaque champ PV de cette double-peau [7]. En plus de cette évolution, le champ PV du bloc 3 (celui du bas de la façade) présente une chute de production anormale lors de la fin de l'après-midi, vers 18h00. Pour caractériser chaque champ PV, on utilise le ratio de performance (PR) défini comme le rapport entre le rendement électrique et le rendement en conditions de référence [8]) :

$$PR = \frac{P}{G_i} \bigg/ \frac{P_c}{G_{ref}} \quad (1)$$

où P est la puissance électrique, G_i le rayonnement incident, P_c la puissance crête du champ PV à $G_{ref}=1000 \text{ W/m}^2$ rayonnement incident et pour une température moyenne du champ de $T_c=25^\circ\text{C}$. Pour un système PV maintenu à son point de puissance maximale (par exemple par un tracker MPP), la production électrique est approximativement proportionnelle au rayonnement incident, sauf pour de faible rayonnement ou une évolution des caractéristiques spectrales du rayonnement incident [9]. Les figures 5c) et d) présentent le ratio de performance des champs PV. L'évolution du PR pour les prototypes ETNA, présenté dans la figure 5d), est cohérent, si la variation de température mesurée est prise en compte. Pour le prototype HBS-Technal, une forte variation du PR est constatée pendant la journée. Ainsi que l'effet de saturation discuté ci-dessus, plusieurs chutes intermittentes de performance apparaissent, en particulier pour le bloc 3.

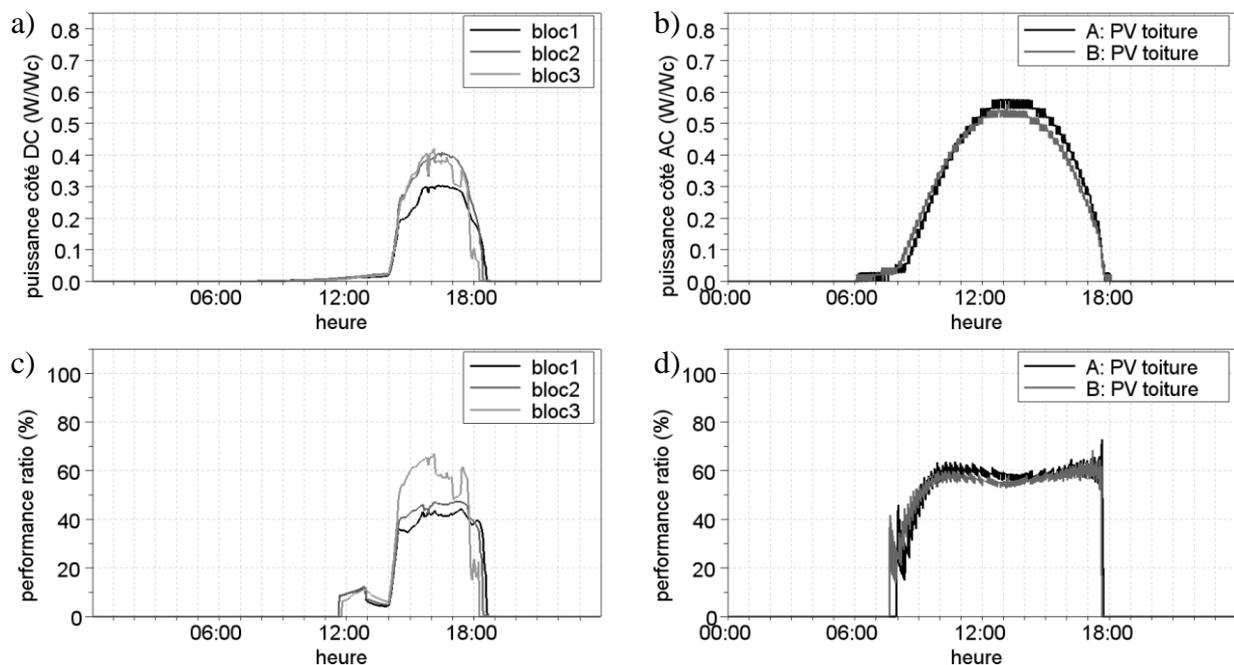


Figure 5 : performance électrique des champs PV pour un jour type, présenté en terme de production électrique et de performance ratio instantanés. A gauche prototype HBS-Technal. A droite : prototypes ETNA A & B.

Afin d'identifier le comportement anormal des champs PV du prototype HBS-Technal, des visualisations de type « carpet » sont présentés dans la figure 6. Les visualisations « carpet » ont été utilisées par [10] pour l'identification de défauts et d'erreurs dans un système de gestion énergétique d'un bâtiment (Building Management System). Ici la même approche est appliquée pour caractériser un éventuel comportement anormal. Les graphes représentent la production électrique du champ ETNA A (toiture) et du HBS-Technal (bloc 3) avec des axes en dates et heures. Chaque pixel correspond donc à la production instantanée, l'échelle de gris permettant de représenter l'ampleur de cette grandeur. Pour ETNA A l'échantillon de 133 jours est présenté. Pour le bloc 3 de HBS-Technal un an de données est représenté dans la visualisation.

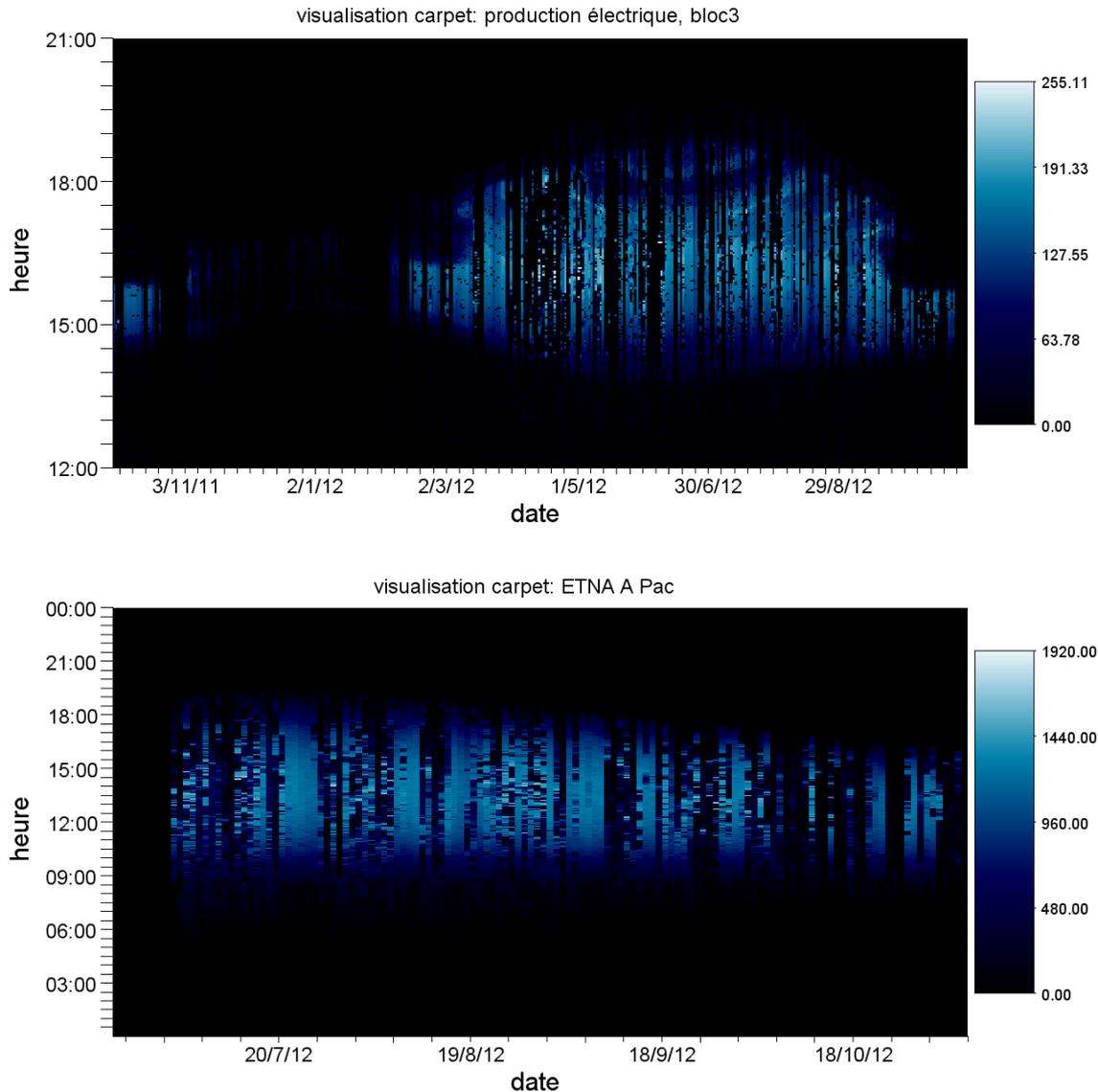


Figure 6 : visualisation de la production électrique du champ bloc 3 du prototype HBS-Technal (haut) et du champ toiture du prototype ETNA A, (bas) sur les axes de date et heure. L'échelle de couleurs donne l'intensité de la production électrique à un instant donné.

La variation saisonnière des deux champs PV est clairement visible dans la figure 6 : l'enveloppe de production suit une fonction sinusoïde, avec une durée maximale le 21 juin. Les chutes ponctuelles de production et les traits verticaux sont attribués à la nébulosité. Pour le bloc 3, certains traits horizontaux sont également visibles, par exemple en été vers 18h. Ceux-ci correspondent aux périodes de production qui diminue à la même heure pour plusieurs jours ou semaines consécutifs. Un comportement anormal du champ PV du bloc 3 a été ainsi identifié : les effets de masque proches (ombrage partiel) en sont la cause.

4. Discussions et conclusions

Nous avons présenté la première évaluation comparative des résultats expérimentaux obtenus sur trois prototypes innovants de double-peaux PV-T naturellement ventilés : une

double-façade plissée (verticale), un double-peau façade/toiture, et un double-peau véranda/toiture. Parmi ces trois installations, la configuration façade/toiture (ETNA A) est nettement plus performante en été en termes de la production électrique (ratio de performance). Ce classement observé est conforme à ce qui est attendu en ventilation naturelle générée par les forces de flottabilité, et l'impact du rapport de forme sur le tirage et la performance thermique [11].

Les résultats obtenus indiquent aussi un impact significatif sur le bâtiment, ce qui est évident à partir des températures mesurées sur les parois du bâtiment et PV. L'impact des effets de masque proche/lointain a été également mis en évidence pour la façade HBS-Technal, par l'intermédiaire des visualisations « carpet ». Lors des prochaines études la sensibilité à l'effet du vent sera approfondie pour les trois prototypes, ainsi que la variation saisonnière des performances, pour la configuration mi-saison, été et hiver (récupération de chaleur notamment).

Références

- [1] Energy roadmap 2050, European Commission, http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index_en.htm, (2011).
- [2] D. Kamthania, S. Nayak, G.N. Tiwari, Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal double pass facade for space heating, *Energy and Buildings* 43 (2011) 2274-2281
- [3] M. D. Bazilian, F. Leenders, B.G. Van der Ree, D. Prasad, Photovoltaic cogeneration in the built environment, *Solar Energy* 71 1 (2001) 57-69
- [4] J. Neymark, P. Girault, G. Guyon, R. Judkoff, R. LeBerre, J. Ojalvo, P. Reimer, The "ETNA Bestest" Empirical Validation Data Set, IBPSA BS05 proceedings, Montréal, Canada, (2005), pp839-846
- [5] Scilab Enterprises, Scilab: Free and Open Source software for numerical computation [Software], available from: <http://www.scilab.org> (2012)
- [6] L. Gaillard, S. Giroux, H. Pabiou, C. Ménézo, Full scale experimentation of building integrated photovoltaic component for naturally ventilated double-skin configuration, *Proceedings of Solaris 2012*, Varanasi, India (2012)
- [7] S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, R. Corkish, A. Sproul, *Applied Photovoltaics*, (2007), Earthscan UK, ARC Centre for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics
- [8] B. Marion et al., Performance parameters for grid-connected PV systems, *IEEE PVSC* (2005), NREL/CP-520-37358
- [9] E. Skoplaki, J. A. Palyvos, Operating temperature of photovoltaic modules : a survey of pertinent correlations, *Renewable Energy* 34 (2009) 23-29
- [10] A. Colmenar-Santos, L. N. Terán de Lober, D. Borge-Diez, M. Castro-Gil, Solutions to reduce energy consumption in the management of large buildings, *Energy and Buildings* 56 (2013) 66-77
- [11] M. Sandberg, B. Moshfegh, Buoyancy-induced air flow in photovoltaic facades. Effect of geometry of the air gap and location of solar cell modules, *Building and Environment* 37 (2002) p211-218

Remerciements

Ce travail a 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, HBS-Technal, Jacques Ferrier Architectes, Tenesol.