

Modélisation et simulation thermique d'un bâtiment équipé d'une façade double-peau photovoltaïque naturellement ventilée

Syamimi SAADON^{1,2}, Léon GAILLARD^{1,2}, Stéphanie GIROUX-JULIEN³, Christophe MENEZO^{1,2}

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

² Chaire INSA de Lyon / EDF « Habitats et Innovations Energétiques », Villeurbanne

³ Université de Lyon 1, CETHIL, UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France

*(auteur correspondant : syamimi.saadon@insa-lyon.fr)

Résumé - Cet article se concentre sur la simulation d'une façade PV partiellement semi-transparente, ventilée conçue pour la protection et le rafraîchissement en été (par convection naturelle) et la récupération de chaleur en hiver (par ventilation mécanique). L'air intérieur de la cavité entre les deux peaux du bâtiment (photovoltaïque et paroi primaire) est chauffé par transmission à travers les sections vitrées, et par échange convectif et rayonnement.

Le système est simulé à l'aide d'un modèle multi-physique d'ordre réduit et adapté simplifié à l'échelle 1 en situation réelle qui a été développé pour l'environnement TRNSYS. Nous présentons les résultats du modèle pour la configuration d'été, ce qui est la configuration la plus délicate car il faut retranscrire l'effet cheminé ainsi que celui du vent impactant les performances de tels systèmes. Le modèle décrit l'enveloppe active en termes d'une géométrie simplifiée, et inclut des paramètres tels que la densité de cellules photovoltaïques, le ratio de surface semi-transparentes / opaques, et le rapport de la hauteur / largeur de la double-peau. Les températures de surface et de l'air, le débit massique et la puissance du PV sont obtenues à partir du calcul du bilan thermique et aérodynamique, pour un ensemble donné de conditions météorologiques.

Nous décrirons dans un premier temps le modèle d'enveloppe naturellement ventilée. Ensuite, la validation du modèle et la simulation du couplage au bâtiment ont été réalisées en utilisant des données expérimentales du projet Ressources (ANR-PREBAT 2007). Les mesures in situ ont été réalisées sur un prototype à l'échelle 1 installé à Toulouse, en France, et monitoré en continu avec un taux d'échantillonnage de 1/120 Hz durant plus d'un an.

Enfin, les besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment ont été calculés et l'impact des variations climatiques sur la performance de ces bâtiments a également été étudié. Il a été constaté que les besoins en refroidissement sont plus prédominants pour tous les climats considérés, alors que l'effet de la façade sur les besoins en chauffage ne semble pas décisif d'un point de vue énergétique.

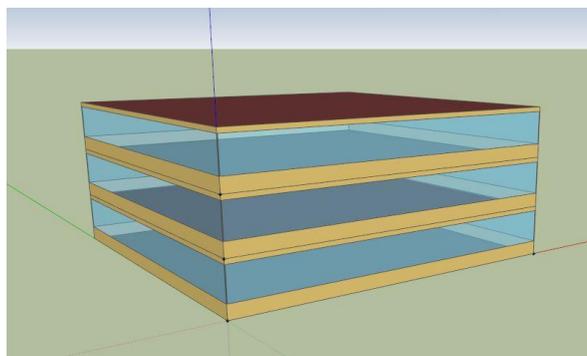


Figure 1 : Architecture du bâtiment modélisé

Nomenclature (11 points, 2 colonnes)

C_p	chaleur spécifique de l'air, $J/kg/K$	w	largeur de la façade, m
d	épaisseur de la lame d'air, m	W	vitesse du vent, m/s^2
D_h	diamètre hydraulique, m	<i>Symboles grecs</i>	
g	accélération universelle, m/s^2	β	coefficient de dilatation, $1/K$
L	longueur de la façade, m	ρ	masse volumique d'air, kg/m^3
\dot{m}	débit massique d'air, kg/s	θ	angle d'incidence
P_{th}	puissance thermique, W		

1. Introduction

La directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) incite les Etats Membres à mettre en place des politiques énergétiques qui favorisent la mise en œuvre des bâtiments à énergie zéro [1]. Aujourd'hui le secteur du bâtiment représente environ 40% de l'énergie primaire totale consommée dans l'Union européenne, les deux tiers de cette demande étant due au chauffage, à la ventilation et de climatisation (HVAC). La réduction de consommation d'énergie combinée à une diversification de la production d'énergie grâce aux énergies renouvelables devraient également conduire à une réduction considérable des émissions de gaz à effet de serre. Selon Marszał et al. [2], le concept de bâtiment à énergie positive (BEPOS) n'est plus perçue comme une solution lointaine, mais comme une solution réaliste pour l'atténuation des émissions de CO_2 et/ou la réduction de la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment. Au niveau européen ceci devrait devenir une réalité en seulement cinq ans pour les bâtiments non-publics et en 3 ans pour les nouveaux bâtiments publics, en supposant que des solutions efficaces soient trouvées pour la réduction de la demande d'énergie et la production d'énergie locale.

L'intégration des composants solaires photovoltaïques dans des enveloppes de construction représente une étape importante vers l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments. En plus de fournir une source de l'électricité renouvelable, le capteur solaire peut être conçu pour accroître la consommation de chauffage et de refroidissement par convection naturelle ou forcée. Des composants photovoltaïques intégrés au bâtiment (PVIB) sont généralement conçus avec des fonctionnalités de promouvoir la dissipation de la chaleur au loin des cellules photovoltaïques afin de limiter les pertes dépendant de la température. Les systèmes photovoltaïques-thermiques (PV-T) vont plus loin en exploitant cette source de chaleur. Jie Ji et al. [3] a montré qu'une fraction importante de l'énergie solaire incidente absorbée par un panneau solaire installé sur un mur du bâtiment peut être récupéré pour l'eau chaude sanitaire ou l'échauffement d'un espace, et plus tard il a démontré l'application d'un vitrage photovoltaïque naturellement ventilée à refroidir les espaces intérieurs tout en produisant d'électricité et les résultats indiquent que cette technologie innovante pourrait réduire les besoins de refroidissement d'un bureau à Hong Kong de 28%, par rapport à la même système mais avec un simple-vitrage [4].

Une façade double-peau photovoltaïque à lame d'air ventilée peut s'avérer une solution efficace pour les projets de rénovation et de nouvelles constructions. La lame d'air agit comme une cheminée solaire et le flux d'air est entraîné en partie ou en totalité par l'effet de cheminée. Par conséquent, en été, la lame d'air peut refroidir les éléments photovoltaïques, tout en agissant comme une barrière thermique pour le bâtiment. Avec l'ajout de la ventilation mécanique, en hiver la même configuration peut aussi servir à préchauffer l'air avant d'entrer dans le bâtiment.

Pour valider ces concepts, des modèles numériques sont nécessaires pour quantifier le gain potentiel de ces deux modes de fonctionnement. Ces modèles doivent transcrire la complexité de ces systèmes soumis à une grande variabilité et interdépendance des mécanismes physiques régissant leurs performances thermique et électrique. Ils doivent en effet être capables de fournir une description de l'évolution des phénomènes impliqués, y compris l'effet de cheminée et de l'impact des perturbations externes tels que l'effet du vent, tout en étant suffisamment robustes et fiables pour tenir compte de la vaste gamme de géométries qui peuvent résulter de l'orientation du bâtiment, de ses environs et d'autres fonctions d'une façade double-peau [5]. Dans ce contexte, plutôt que de développer un modèle avec une description détaillée de la géométrie du système, le comportement thermique et aérodynamique peut être approché de manière adéquate en utilisant des modèles globaux sur la base des caractéristiques physiques dominantes, comme celui développé par Brinkworth et al. [6].

Le travail présenté concerne la simulation numérique d'une façade PV double-peau photovoltaïque semi-transparent sous l'environnement TRNSYS. Le point de départ est le modèle existant pour les systèmes BIPV opaques avec des cavités d'air ventilés développés par TESS (type 567). Il calcule l'état thermique du système pour un débit d'air donné. Le modèle a été adapté et étendu pour intégrer un calcul du débit massique en raison de la ventilation naturelle et en prenant en considération le degré de transparence de la façade composée de module silicium cristallin bi-verres. Une approche zonale a été adoptée pour permettre de transcrire l'évolution de la température de l'enveloppe PV sur la hauteur de la façade et impactant la production électrique. Ce modèle a ensuite été couplé à un modèle simple pour le débit d'air en suivant de l'approche présentée par Brinkworth et al. [6]. Après avoir été confronté à des expérimentations menées en vraie grandeur et en conditions réelles, ce modèle a été mis en œuvre dans une simulation de construction TRNSYS. Une évaluation de l'impact de la façade double-peau PV sur un bâtiment type a été menée pour différents climats français.

2. Modèle numérique d'une façade double-peau semi-transparent PV ventilée

2.1. Estimation du débit d'air de convection naturelle

Le débit massique de l'air dans une façade double-peau naturellement ventilée peut être estimée en effectuant une seule analyse des forces de flottabilité en considérant un bouclage sur la lame d'air, de l'effet du vent (C_w), des pertes par frottement (f) et des pertes de charge à l'entrée et à la sortie (K_f). Par cette approche Brinkworth et al. [6] ont proposé l'équation polynomiale suivante concernant le débit massique à un flux de chaleur imposé, où un paramètre de stratification δ_s a été introduit pour permettre une variation non linéaire de la température de l'air.

$$\dot{m}^3 \left[K_{f1} + K_{f2} + f \frac{L}{D_h} \right] = (\rho w d)^2 \dot{m} W^2 [C_{w1} - C_{w2}] + \frac{2\delta_s P_{TH} (\rho w d)^2 g L \beta \sin(\theta)}{C_p} \quad (1)$$

3. Confrontation expérimentale d'un modèle couplé thermique-aéraulique

3.1. Configuration du modèle

Le modèle a été configuré pour prédire le comportement d'un prototype de façade double-peau PV à échelle 1 développé et contrôlé dans le cadre du projet RESSOURCES (ADEME), représenté sur la Figure 1 [7].

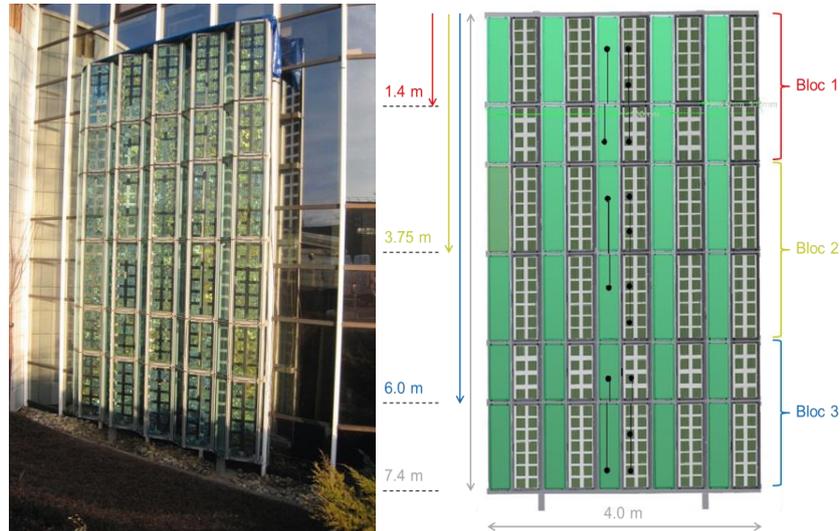


Figure 1 : Gauche : Prototype d'une façade double peau PV, projet RESSOURCES. Droit : Schéma des trois blocs.

En testant certaines valeurs de paramètres du modèle vis-à-vis des expérimentations nous avons trouvé que les coefficients du vent de l'entrée et de la sortie pour un mur vertical sont fixés à 0,001 et -0.001 respectivement pour un écoulement laminaire et pour un écoulement turbulent, ces coefficients dépendant de la direction du vent. Les coefficients du vent à l'entrée et à la sortie pour un écoulement turbulent sont fixés à 0,03 et -0,03 respectivement pour la direction du vent moins de 180° tandis que pour la direction du vent plus de 180° ces coefficients sont à 0,02 et -0,02 respectivement. En effet les mesures en permis de montrer qu'il y a un effet de vent venant renforcer l'effet cheminée pour le cas étudié [8]. Ainsi, pour le modèle que nous considérons les valeurs du coefficient de vent renforcent le débit massique.

Pendant ce temps, les coefficients de perte de charge singulière sont estimés à 0,5 et 1,0 pour l'entrée et la sortie selon Brinkworth et al. [6]. Même si la structure du modèle étudié par ces auteurs se distingue de la nôtre, nous avons choisi de garder ces valeurs cohérentes.

3.2. Résultats

Des débits d'air simulés et mesurés sur une période en Juin à Toulouse sont présentés dans la Figure 2. Pour la plupart des jours, la simulation est en accord avec les mesures à la fois quantitativement et qualitativement sur les évolutions quotidiennes. Sur cette figure, les débits d'air mesurés "exp" présentés concernent les valeurs moyennes des trois blocs et la série de données «modèle» désigne les sorties du modèle développé.

Une analyse plus en détails fait cependant ressortir que la simulation ne parvient pas à prédire les fluctuations haute fréquence qui sont probablement causées par le vent. Notez que durant cette période en été, la vitesse du vent peut par moment atteindre jusqu'à 12,7 m/s.

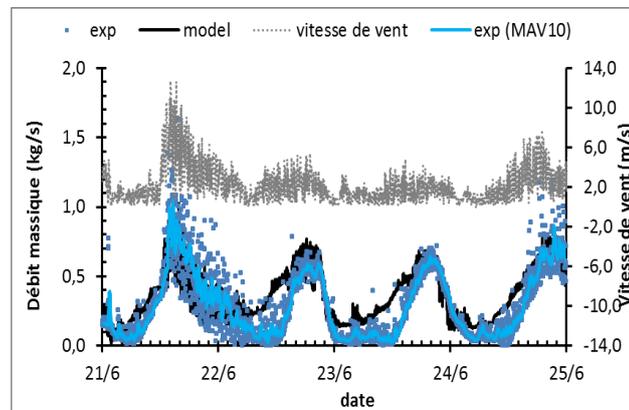


Figure 2 : Débits d'air mesurés et ses courbes de tendances moyennées sur 10 points et les débits d'air simulés pour les 4 jours successives en Juin

Cet écart entre les résultats des simulations et des mesures expérimentales est un peu plus prononcé durant la nuit que durant la journée. Ceci est susceptible d'être provoqué par des températures intérieures de l'immeuble et à la résistance thermique faible de l'enveloppe primaire. Une autre raison possible peut-être liée due aux échanges avec l'environnement durant la nuit : échanges radiatifs avec le sol environnant et échanges avec la voûte céleste pour une paroi verticale notamment mal prise en compte. La différence maximale entre les résultats de la simulation et des mesures expérimentales est 0,4 kg/s pendant la journée, mais pendant la nuit ces écarts peuvent atteindre jusqu'à 0,7 kg/s. L'évaluation précise du débit d'air induit par l'effet cheminée est très délicate et encore mal cernée même en conditions contrôlées. Ceci contribue grandement à la différence entre les résultats de la simulation et des mesures expérimentales.

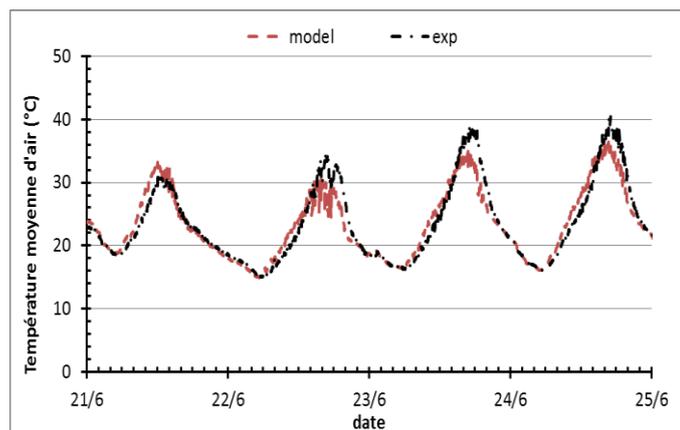


Figure 3 : Température moyenne de l'air mesurée et simulée en Juin

Le profil de température fourni par le modèle est comparé à celui mesuré sur le bloc supérieur. La température de sortie simulée correspond assez bien avec les données de mesure, avec une température maximale de 36°C. Pendant les jours ensoleillés et lorsque le rayonnement incident est le plus important quand le modèle tend à sous-estimer la température moyenne de l'air.

La différence entre les valeurs expérimentales et la simulation peut être liée ici au rapport d'aspect (L/d). Pour des rapports d'aspect plus petits la différence entre les résultats des simulations et des mesures expérimentales est relativement importante mais la correspondance s'améliore avec l'augmentation du rapport d'aspect [9]. Dans notre étude, le rapport d'aspect est seulement de l'ordre de 12. Un autre facteur qui peut expliquer la différence relativement faible est que l'écoulement n'est vraisemblablement pas turbulent sur toute la hauteur du canal. De plus, il est difficile d'identifier en conditions réelles la nature de l'écoulement et donc les études futures doivent être faites pour caractériser les valeurs de coefficient de frottement, les échanges de chaleur par convection et la limite entre un écoulement laminaire et turbulent basée sur le nombre de Reynolds par exemple.

4. Influences des composants photovoltaïques intégrés au bâtiment

4.1 Géométrie et typologie du bâtiment modélisé

Dans cette partie, nous utilisons le modèle développé pour l'intégration à un bâtiment de bureaux type en phase de rénovation. Cela correspond à un cas d'étude contraignant et à fort enjeu énergétique. Le transfert enthalpique récupéré en sortie de lame d'air (résultant du transfert de chaleur entre l'air dans la cavité, la façade double-peau PV et le mur principal du bâtiment) est exploité dans cette section dans le but d'évaluer la capacité de dissipation de chaleur et donc de rafraîchissement en été (par convection naturelle) et de récupération de la chaleur en hiver (par ventilation mécanique). Les besoins de refroidissement et de chauffage du bâtiment sont eux déterminés à partir des niveaux de température intérieure nécessaires pour assurer le confort. En saison de chauffage, la température de consigne est maintenue à 20°C en occupation et 17°C en inoccupation tandis qu'en saison de refroidissement, cette température est maintenue à 26°C en occupation et 30°C en inoccupation. Le weekend est le temps d'inoccupation.

L'objectif est d'évaluer l'influence sur le bilan énergétique de la façade double-peau photovoltaïque ventilée en tant que composant de bâtiments économes en énergie. Le modèle est défini par la géométrie du bâtiment (longueur x largeur = 15 m x 15 m), les conditions climatiques environnantes, l'orientation du bâtiment et le type d'enveloppe de bâtiment (opaque ou semi-transparente).

4.2 Résultats

Les données présentées dans cette section proviennent de la consommation d'énergie par les systèmes de refroidissement et de ventilation, et les gains internes par les appareils électriques, les occupants et l'eau chaude sanitaire. L'énergie thermique utile est l'énergie thermique collectée par la façade double-peau PV à un niveau de température valorisable pour les besoins en chaleur du bâtiment (la température de la façade est 3°C plus importante que celle de l'extérieur en cas d'occupation et elle est 3°C plus importante que celle du bâtiment en cas d'inoccupation).

Dans la Figure 4, il est évident que la production de PV est beaucoup plus élevée pour une paroi opaque PV que pour la paroi PV semi-transparente comme la densité de cellules PV est deux fois plus élevée pour opaque que pour le degré de transparence de 50%. De plus, en identifiant les résultats ci-dessus, nous avons remarqué que la paroi opaque semble fournir la meilleure solution en été car il peut augmenter la production de PV tout en même temps limite la surchauffe en été (gains solaires neutralisés fortement limités pour le bâtiment).

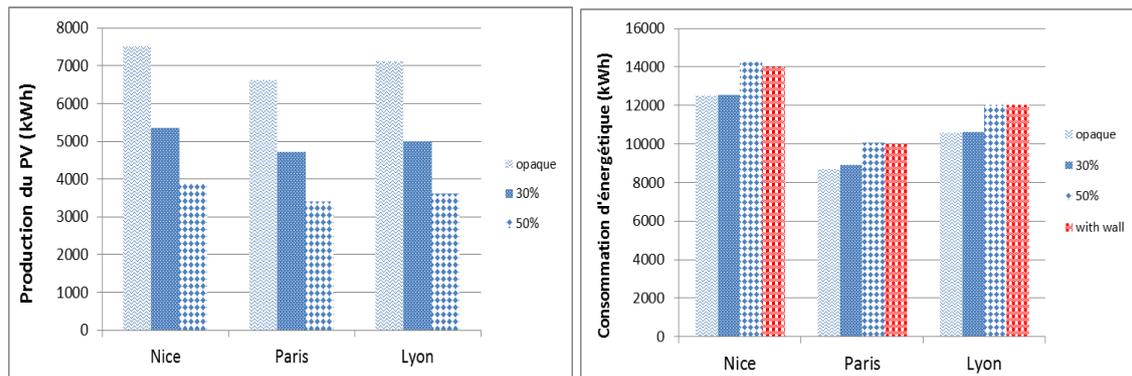


Figure 4 : La production du PV et la consommation d'énergie pour climatiser

A partir des résultats en été et en hiver, nous pouvons observer que la consommation d'énergie est plus élevée en été pour le bâtiment avec double-peau. D'une part, cela est dû à la transmission solaire élevée grâce à l'enveloppe du bâtiment qui augmente la nécessité pour le refroidissement du bâtiment. En conséquence cela crée une diminution des besoins de chauffage et d'éclairage dans la consommation totale d'énergétique. Les niveaux de consommation d'énergie déterminés montrent que le degré de transparence donne néanmoins un effet positif sur les besoins de chauffage, même si ces besoins sont plutôt faibles, par rapport aux besoins de refroidissement. Il peut également être noté que les gains de chaleur internes liés aux appareils électriques et aux occupants qui ont été modélisés sont très élevés car il s'agit d'un immeuble de bureau. En outre, la température de consigne qui a été imposée pour la configuration de chauffage a été réduite dans le cas d'inoccupation (les nuits et les week-ends). En conséquence, le préchauffage de l'air a un intérêt limité pour ce type de bâtiments.

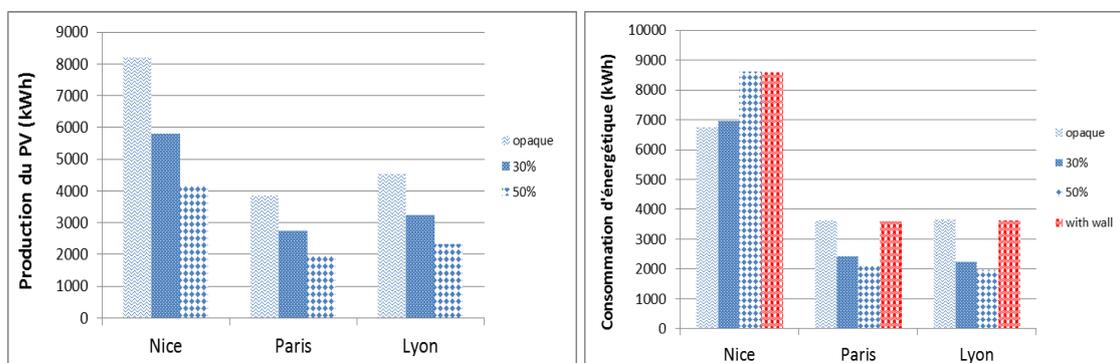


Figure 5 : La production du PV et la consommation d'énergétique en hiver

5. Conclusion

Ce travail a présenté une étude de la modélisation et de la conception de composants d'enveloppe PVIB/T mis en œuvre pour un bâtiment de bureau dans différents climats français. Les caractéristiques du modèle associé au composant permettent un calcul de débit d'air entraîné par l'effet de cheminée et combiné au vent ainsi que la prise en compte du degré de semi-transparent PV. La confrontation avec les données expérimentales, à partir d'un véritable système complet et pour des conditions opérantes variées, montre un accord raisonnable avec des températures et du débit massique même si certains écarts ponctuels apparaissent clairement pour des vitesses de vent élevées et forts ensoleillements. Ces écarts entre les simulations et les mesures peuvent être en partie attribués à des difficultés expérimentales pour estimer correctement le flux de convection naturelle et notamment les

régimes d'écoulement. En parallèle le modèle de simulation nécessite plusieurs paramètres à déterminer ce qui accroît les incertitudes dans les prédictions de simulation. Cependant les valeurs de certains paramètres déterminées par rapport aux mesures et concernant notamment les coefficients C_w et f sont semblent cohérentes.

Les premiers résultats obtenus en configuration d'intégration permettent d'obtenir des tendances sur l'influence de tels composants sur les performances énergétiques de l'ensemble en fonction notamment du degré de semi-transparence de la peau PV. Pour un immeuble de bureau tel que considéré, la consommation de chauffage n'étant pas prédominante le choix du degré de semi-transparence ne semble pas décisif d'un point de vue énergétique. Cependant, il semble que le principal avantage de ces façades, du point de vue de la réduction des besoins de chauffage, est d'opter pour une façade à degré de transparence plus élevé. L'influence semble par contre plus favorable pour ce type de bâtiment (à la base très vitré) sur la performance en été puisque les besoins en refroidissement ont été diminués. Cette étude montre qu'un système PVIB/T sont des éléments pertinents pour des bâtiments à énergie positive et offrent un important potentiel pour réduire les besoins en refroidissement. En tout cas dans les deux configurations de chauffage et de refroidissement on produit en plus d'électricité à partir des cellules PV, ce qui n'existe pas pour le bâtiment sans double-peau.

Références

- [1] Directive 2010/31/eu of the Europe a parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings; 2010. Available from: <http://www.epbd-ca.eu>
- [2] A.J. Marszal, P. Heiselberg, J.S. Bourrelle, E. Musall, K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano. Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies, *Energy and Buildings*, 43:971-979, 2011.
- [3] J. Ji, T.T. Chow, W. He. Dynamic performance of hybrid photovoltaic/thermal collector wall in Hong Kong, *Building and Environment*, 38:1327-1334, 2003.
- [4] T.T. Chow, Z. Qiu, C. Li. Potential application of « see-through » solar cells in ventilated glazing in Hong Kong, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93: 230-238, 2008.
- [5] M.A. Shameri, M.A. Alghoul, K. Sopian, M.F.M. Zain, O. Elayeb. Perspectives of double-skin façades systems in building and energy saving, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:1468-1475, 2011.
- [6] B.J. Brinkworth, R.H. Marshall, Z. Ibarahim. A validated model of naturally ventilated PV cladding, *Solar Energy*, 69:67-81, 2000.
- [7] L. Gaillard, S. Giroux-Julien, C. Ménézo, H. Pabiou. Experimental evaluation of a naturally ventilated PV double-skin building envelope in real operating conditions, *Solar Energy*, 103:223-241, 2014.
- [8] L. Gaillard, S. Giroux-Julien, H. Pabiou, C. Ménézo. Full-scale experimental on building an integrated photovoltaic component for naturally ventilated double-skin configuration, *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, Vol. 2, Article ID R120316, 2012.
- [9] M. Sandberg, B. Moshfegh. Buoyancy-induced air flow in photovoltaic façades. Effect of geometry of the air gap and location of solar cell modules, *Building and Environment*, 37:211-218, 2002.