

# Modélisation et simulation thermique d'un bâtiment équipé d'une façade photovoltaïque ventilée

Syamimi SAADON<sup>1,2</sup>, Leon GAILLARD<sup>1,2</sup>, Christophe MENEZO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>CETHIL UMR CNRS 5008, INSA Lyon, Université Lyon 1, Villeurbanne

<sup>2</sup>Chaire INSA/EDF "Habitats et Innovations Energétiques", 69100 Villeurbanne

\* (auteur correspondant : [syamimi.saadon@insa-lyon.fr](mailto:syamimi.saadon@insa-lyon.fr))

**Résumé** - Cette article traite de l'intégration de vitrages semi-transparents photovoltaïques à un bâtiment de bureau pour trois climats français. La modélisation adoptée décrit l'enveloppe active à partir d'une approche simplifiée. Dans un premier temps, les températures de surface et de l'air et le débit massique de ventilation sont évaluées et comparées à des données expérimentales. Dans un second temps, ces vitrages sont étudiés d'un point de vue énergétique grâce à la simulation thermique TRNSYS. Nous montrerons à travers cet article ces doubles façades photovoltaïques en tant que composants d'enveloppe du bâtiment sur lequel les vitrages semi-transparents seront intégrés et simulés.

## 1. Introduction

Aujourd'hui, le secteur du bâtiment représente 40% de l'énergie primaire totale consommée par l'union européenne, les deux tiers de cette consommation d'énergie étant due au chauffage, à la ventilation et à la climatisation (HVAC). Afin de réduire cette forte demande d'énergie, la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD) impose que tous les Etats membres de l'UE doivent mettre en place des politiques énergétiques visant à atteindre des bâtiments à énergie zéro pour la construction ou à très haute efficacité énergétique pour l'existant [1]. La réduction de la consommation d'énergie combinée à la diversification de la production d'énergie grâce aux énergies renouvelables aura un impact majeur sur les économies d'énergie et sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Selon Marszal et al. [2], le concept du bâtiment à énergie positive (BEPOS) n'est plus perçu comme un concept d'un futur lointain, mais comme une solution réaliste pour la réduction des émissions et/ou la réduction de la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment. Au niveau européen, les BEPOS devraient être atteints et se développer en seulement huit ans. Dans ce contexte l'intégration des composants solaires photovoltaïques sur la façade du bâtiment représente une importante étape. Les capteurs solaires photovoltaïques (PV) représentent non seulement une source locale et renouvelable d'électricité, mais peuvent également représenter source de chaleur pour le chauffage du bâtiment en hiver et de refroidissement par convection naturelle ou forcée en été.

Notre travail porte sur les systèmes photovoltaïques (PV) intégrés au bâtiment ayant des fonctionnalités visant à dissiper la chaleur des cellules photovoltaïques afin de limiter les pertes de rendement dépendant de la température. Les systèmes photovoltaïques-thermiques (PVT) vont plus loin en exploitant cette source de chaleur. Chow et al. [3] a montré qu'une part importante de l'énergie solaire incidente captée par un panneau solaire en paroi de bâtiment peut être récupérée pour l'eau chaude ou le chauffage dans les locaux [4].

Un composant de façade double peau PV-T comprend trois éléments principaux: un capteur photovoltaïque qui se compose d'une couverture avec des cellules PV incorporés, une lame d'air et une surface arrière. Il est bien connu que le rayonnement solaire absorbé non converti en électricité est la principale cause de l'augmentation de la température des cellules,

conduisant alors à une diminution de leur rendement électrique. Pour remédier à ce problème, le système photovoltaïque intégré au bâtiment peut être rafraîchi par convection naturelle ou forcée.

L'intégration des systèmes photovoltaïques (PV) en façades double-peaux peut être une solution efficace pour améliorer l'efficacité énergétique des structures existantes et les constructions nouvelles. La lame d'air de la double peau agit comme une cheminée solaire, et le flux d'air est entraîné par un effet cheminé et des différences de pression provoquées par le vent (s'il est ouvert vers l'extérieur). En été, la lame d'air permet de refroidir les composants photovoltaïques, augmentant ainsi la production d'électricité, et agissant comme une barrière thermique pour le bâtiment. En hiver, la même configuration peut servir à préchauffer l'air entrant dans le bâtiment (avec l'ajout d'une ventilation mécanique). Afin d'évaluer ce potentiel énergétique des façades de type double-peau (PV) photovoltaïque, des modèles sont nécessaires pour prédire la performance thermique et électrique dans des conditions réelles, en tenant compte de la convection naturelle et l'effet du vent sur le flux d'air dans la cavité. De plus, les simulations doivent être suffisamment robustes pour être applicables sur une large gamme de géométries liées à l'orientation du bâtiment, ses environs, et d'autres usages de la façade double peau [5]. Dans ce contexte, plutôt que de développer un modèle physique détaillée avec une description fidèle de la géométrie du système, le comportement thermique et aérodynamique peut être approché de manière adéquate en utilisant des modèles basés sur des caractéristiques globales physiques dominantes, comme celui développé par Brinkworth et al. [6].

Le présent travail concerne la simulation d'une façade double peau photovoltaïque semi-transparente en utilisant 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 « Thermal Energy System Specialist » (Type 567) [7], qui calcule l'état thermique du système pour un débit d'air donné. Le modèle a été adapté et étendu pour incorporer un calcul d'un débit massique induit par le tirage thermique, et pour permettre la prise en compte du degré de semi-transparence de la paroi.

## **2. Confrontation expérimentale du modèle de composant PV semi-transparent**

### **2.1. Dispositif expérimental**

Une photo et un schéma du dispositif expérimental sont présentés dans la figure 1. Il s'agit d'un composant double-peau PV-T qui a été installé sur un bâtiment de bureaux de trois étages sur le site de HBS-Technal à Toulouse. 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 en moyenne 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, du haut au bas. Chaque bloc est relié à une charge résistive constante permettant de suivre la puissance produite. La lame d'air est ouverte vers l'extérieur en haut et en bas de la façade, pour favoriser le développement du tirage thermique [8].

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. 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. Le site est doté d'une centrale météorologique installée sur la toiture du bâtiment, ainsi que des pyranomètres installés sur la façade. Le suivi du prototype a été piloté par une simple boucle d'acquisition de données (Labview) avec un pas d'échantillonnage de 120s. Pour la validation du modèle, une séquence de 9 jours consécutifs en juin (été) a été choisie.

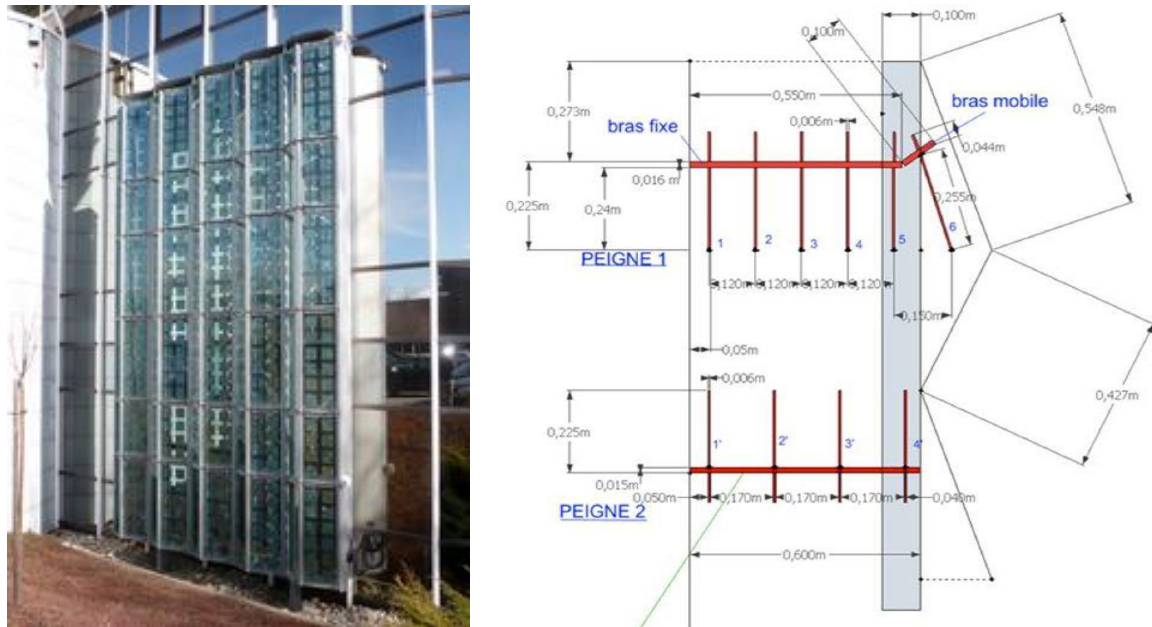


Figure 1 : Le composant PV-T HBS-Technal du projet RESSOURCES, se composant d'une double-peau photovoltaïque plissée installé sur la face ouest d'un bâtiment tertiaire à Toulouse. A droite : vue d'en haut d'une section prismatique instrumentée

## 2.2. Configuration d'utilisation du modèle

Un modèle numérique a été développé à partir du Type 567 de la bibliothèque TESS de TRNSYS. Ce modèle de composant PV-T opaque a été adapté pour une configuration semi-transparente naturellement ventilée en ajoutant la détermination du débit et la prise en compte du degré de semi-transparence de la couverture constituée de modules bi-verres à densité de cellule variable. Ci-après ce modèle est nommé Type 867.

Le Type 867 a été intégré dans l'environnement TRNSYS afin de simuler la température de sortie de la lame d'air, la température moyenne du fluide, la température du bâtiment, le débit massique d'air à la sortie, la quantité de chaleur récupérée et la production électrique. Le type est couplé à plusieurs autres types de TRNSYS afin d'obtenir les entrées nécessaires (météo notamment) pour le calcul et des résultats.

Une description du modèle a été précédemment présentée [9]. Selon le modèle créé par Brinkworth [6], une méthode simplifiée pour estimer le débit d'air du modèle est utilisée. La circulation de fluide dans la lame d'air ouverte en entrée et en sortie est décrite comme une circulation en boucle. En régime stationnaire, le débit d'air le long du circuit se conserve. Le bilan d'énergie mécanique le long de ce circuit d'air permet de calculer ce débit. Ce bilan d'énergie mécanique exprime le fait que la force induite par la poussée d'Archimède (et provoquée par l'échauffement de l'air dans le capteur) compense les pertes dues aux frottements. Ce modèle permet donc d'évaluer le débit massique d'air en convection naturelle.

La configuration du modèle pour prédire les performances du prototype HBS-Technal est la suivante. La géométrie du composant est réduite à une lame d'air rectangulaire d'épaisseur

60 cm, découpée en 3 macro-volumes à température et à pression uniforme de 2,3 m, 2,8 m et 2,3 m de hauteur. Concernant le coefficient d'échange convectif et radiatif entre le vitrage et l'extérieur, la corrélation de la convection dépendant du vent présenté par McAdams a été utilisée [10]. Pour le coefficient de perte de charge linéaire, le rapport de forme du canal, le flux de chaleur capté en façade suggère que l'écoulement de convection naturelle devrait être principalement turbulent. Pour un écoulement turbulent, il est possible d'utiliser le modèle de Hyprri, qui estime un coefficient de frottement  $f = 0,028$  pour une configuration géométrique similaire [11]. Les coefficients de pression du vent pour une paroi verticale et face au vent, en entrée et en sortie sont fixés à 0,001 pour un écoulement laminaire ( $Re < 100\,000$ ) et 0,005 pour un écoulement turbulent ( $Re > 100\,000$ ). Les coefficients de pertes de charge singulières  $K_{f1}$  et  $K_{f2}$  sont estimées à 0,5 pour l'entrée et la sortie en ajustant le modèle.

### 2.3. Résultats

Les débits d'air mesurés et simulés sont présentés sur la Fig. 2. Pour la plupart des jours la simulation est en accord avec l'expérience en grandeur et en variation quotidienne. Sur ces figures, les séries de données de «modèle» se réfèrent au modèle développé. Toutefois, en regardant l'écart maximal du débit d'air mesuré et calculé, nous pouvons observer que la simulation ne permet pas de prédire les fluctuations à court terme qui sont probablement causés par l'effet du vent. L'écart absolu entre les résultats de simulation et les mesures expérimentales est d'environ 0,2 kg/s en moyenne et il peut aller jusqu'à 1,5 kg/s.

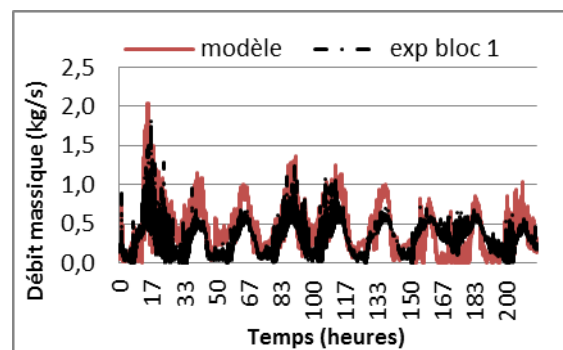


Figure 2 : Le débit massique calculé et mesuré pendant 9 jours consécutifs en juin.

Dans la Fig. 3 et 4 la température de l'air de sortie est affichée pour la même séquence de 9 jours en été. La température de sortie simulée est en accord raisonnablement avec les données mesurées. La différence s'est produite habituellement entre 11h00-14h00 chaque jour, au cours du midi lorsque le rayonnement incident est à son maximum. Selon Jones et Underwood [12] pour un rayonnement supérieur à  $100\text{ W/m}^2$ , la cause principale de changement de température de la cellule PV est l'augmentation de la température par l'absorption de rayonnement à ondes courtes. Cet écart pourrait être aussi dû à une simplification de l'écoulement d'air décrit par les modèles, mais il est possible de réduire cette différence en affinant la valeur du coefficient de pertes de charge linéaire le long du canal. Ainsi on pourrait comparer ces résultats aux températures mesurées lors d'essais en vraie grandeur réalisées en calculant l'écart relatif par :

$$\text{Ecart relatif} = \frac{|T_{867} - T_{\text{exp}}|}{T_{\text{exp}}} \quad (1)$$

L'écart relatif maximal entre le modèle et l'expérience est de 3,5% et il est en moyenne d'environ 0,3%.

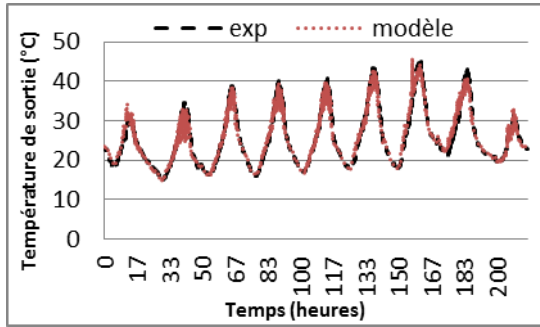


Figure 3 : La température de sortie calculée et mesurée en été

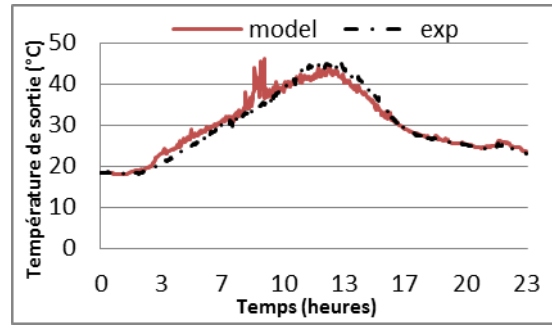


Figure 4 : Un zoom sur la différence maximale de température de sortie mesurée et calculée

La température de la cellule PV calculée est assez satisfaisante par rapport aux données mesurées. Elle atteint environ 60°C en été. Cependant le modèle sous-estime légèrement l'expérience, sauf lors de certaines périodes pour lesquelles le rayonnement incident élevé, où il surestime la température en certains points particuliers. L'écart relatif maximal entre le modèle et l'expérience est de 7,4% au cours de l'après-midi lorsque le rayonnement incident est au maximum et il est en moyen d'environ 0,8% ce qui est tout à fait raisonnable étant donné qu'il ne dépasse pas de 10%.

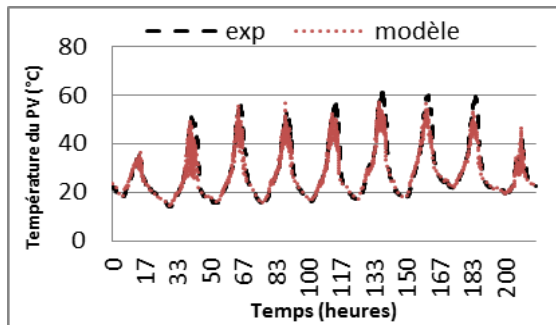


Figure 5 : La température de cellule PV calculée et mesurée en été

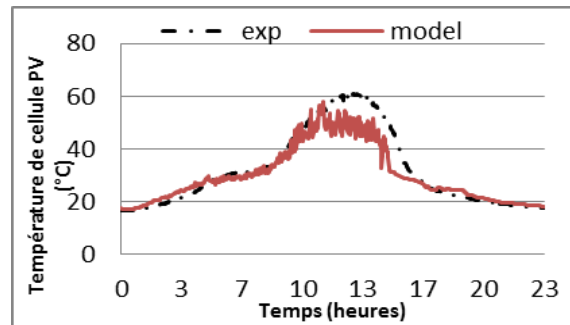


Figure 6 : Un zoom sur la différence maximale de température des cellules photovoltaïques mesurée et calculée

Etant donné la complexité du système modélisé, des phénomènes régissant son comportement, les sources des écarts entre les valeurs expérimentales et de simulation sont nombreuses. Un des facteurs qui peut contribuer à cet écart est le rapport de forme (hauteur/épaisseur) relativement faible et le non prise en compte du différent régime d'écoulement suivant la hauteur du canal. A des rapports inférieurs, la différence entre les résultats de simulations et les mesures expérimentales sont relativement grandes, mais la correspondance s'améliore avec l'augmentation du rapport [11]. Dans notre étude, le rapport de forme est de 12 seulement.

### 3. Intégration du composant au bâtiment

#### 3.1. Géométrie et typologie du bâtiment modélisé

Afin d'évaluer les doubles façades photovoltaïques en tant que composants d'enveloppe du bâtiment, il est nécessaire de définir un «cas test» sur lequel les vitrages semi-transparents seront intégrés et simulés. Ce modèle sur lequel le verre sera intégrée sont définis par la géométrie du bâtiment (longueur x largeur = 15 m x 15 m), le climat, le type d'enveloppe de



bâtiment et le système d'énergie. Les modules PV utilisées sont de type silicium poly cristallin avec un rendement nominal de 12%.

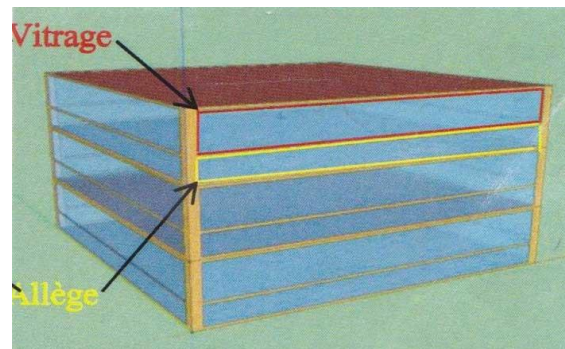


Figure 7 : Architecture du bâtiment modélisé

Construit en béton, le bâtiment est isolé au niveau des murs externes, plancher bas et toiture terrasse par des couches de polystyrène extrudé d'épaisseur 20 cm avec un coefficient de transmission thermique U total d'un paroi environ  $0,14 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . Le bâtiment est divisé en trois zones thermiques et possède une façade vitrée dans ses quatre orientations. Ces quatre surfaces verticales ont une hauteur de 2,2 m (1,4 m de fenêtre et 0,8 m d'allège) avec une largeur de 14,2 m. Le bâtiment est implanté dans trois climats différents (Nice, Lyon, et Paris) afin d'étudier l'impact du climat sur la performance du vitrage. Toutes les fenêtres sont modélisées en double vitrage avec un degré de transparence variant de 0 % (totalement opaque) à 50 % et un facteur solaire g de 0,5.

Le bâtiment est modélisé avec un système de ventilation double flux avec échangeur et by-pass. Le rendement de l'échangeur est estimé à 60 %. En by-pass le débit injecté  $18 \text{ m}^3$  par heure par occupant. La température de consigne pour le chauffage est prise égale à  $19^\circ\text{C}$ , et celle du refroidissement est fixée à  $26^\circ\text{C}$ , sans réduction de température en inoccupation. 36 occupants par étage sont considérés dans le bâtiment de bureaux uniquement en semaine de 8h00 à 18h00. L'activité métabolique considérée pour chacun des occupants est 100 W par personne. Contributions des apports internes liés aux équipements sont identiques pour chacune des trois zones thermiques. Ainsi, pour chaque étage 5040 W de chaleur est considéré en semaine entre 8h00 à 18h00. Les gains internes dus à l'éclairage sont considérés comme environ  $5 \text{ W/m}^2$  lorsque les feux sont allumés. Et enfin, les contributions hebdomadaires de la chaleur générée lors de la consommation d'eau chaude ont été estimées à 65 W par chauffage.

### 3.2. Résultats

Les données présentées dans cette section proviennent de la consommation d'énergie par les systèmes de chauffage, de refroidissement, de ventilation et les apports des équipements d'éclairage, des occupants et du système de chauffage. La production d'électricité est calculée à partir de la production de cellules photovoltaïques intégrées à l'intérieur de la façade vitrée.

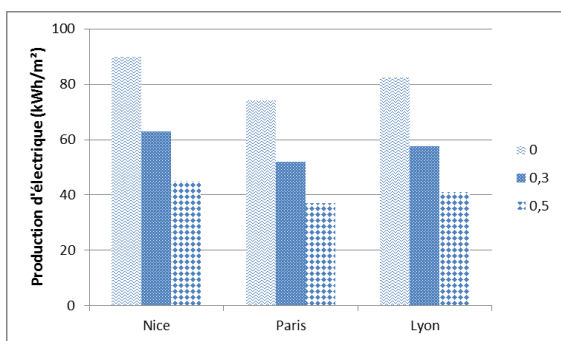


Figure 8 : La production d'électricité pour trois différents climats en été

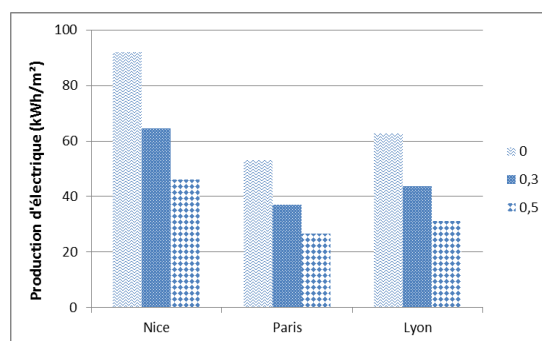


Figure 9 : La production d'électricité pour trois différents climats en hiver

Valeurs		0%	30%	50%
Production d'électricité (kWh/m <sup>2</sup> )	Nice	90	63	45
	Paris	74	52	37
	Lyon	82	58	41
Consommation d'énergie (kWh/m <sup>2</sup> )	Nice	32	33	33
	Paris	13	13	14
	Lyon	19	20	20
Bilan énergétique (kWh/m <sup>2</sup> )	Nice	58	30	12
	Paris	61	39	23
	Lyon	63	38	21

Tableau 1 : La production d'électricité, la consommation d'énergie et le bilan énergétique en été

Valeurs		0%	30%	50%
Production d'électricité (kWh/m <sup>2</sup> )	Nice	92	64	46
	Paris	53	37	26
	Lyon	63	44	31
Consommation d'énergie (kWh/m <sup>2</sup> )	Nice	35	36	36
	Paris	69	69	68
	Lyon	67	66	66
Bilan énergétique (kWh/m <sup>2</sup> )	Nice	57	28	10
	Paris	-16	-32	-42
	Lyon	-4	-22	-35

Tableau 2 : La production d'électricité, la consommation d'énergie et le bilan énergétique en hiver

Au cours du passage de 0% à 50% de degré de transparence, la consommation d'énergie augmente de seulement environ 1 kWh/m<sup>2</sup>. Cela veut dire que le choix du degré de transparence ne permet donc pas un contrôle efficace des apports solaires, et ainsi il ne limite pas les surchauffes en été. Cependant, par identification des résultats ci-dessus, nous avons remarqué que la configuration d'opaque donne la meilleure solution en été car il peut réduire la consommation d'énergie en maximisant la production d'électricité. En hiver, une diminution du degré de transparence entraîne aussi une augmentation de la production d'électricité, ainsi qu'une augmentation, en général, de la consommation énergétique, sauf à Nice, celle-ci augmente quand le degré de transparence est plus grand. Cela veut dire que pour des climats chauds des degrés de semi-transparences plus faibles semblent plus appropriées. Cependant pour les climats comme à Paris et à Lyon, il apparait donc clair qu'il faut atteindre un compromis entre ces deux aspects. Il dépend en effet des caractéristiques du bâtiment (géométrie, localisation, etc.) mais aussi des objectifs des décideurs, qui peuvent privilégier la

production d'électricité, ou la consommation énergétique. Nous pourrions observer aussi que la consommation énergétique en hiver est plus grande qu'en été. D'une part, cela est dû au faible facteur solaire des vitrages par rapport à des vitrages clairs traditionnels qui permet de réduire les apports de chaleurs, donc les besoins en refroidissement. En contrepartie, cela engendre une augmentation des besoins en chauffage et en éclairage. D'autre part, vu que c'est un bâtiment de bureau fictif on peut également rappeler que les apports internes qui ont été modélisés ne sont pas trop importants, puisque le bâtiment n'est occupé que dans la journée du lundi au vendredi et vont dans le sens d'une augmentation des besoins en chauffage. De plus, la température de consigne pour le chauffage n'a pas été réduite même si en cas d'inoccupation. Ainsi, il semblerait qu'il y est un meilleur impact en été sur le bâtiment puisque celle-ci limite la consommation énergétique (dont la climatisation) et donne ainsi un meilleur bilan énergétique.

#### **4. Conclusion**

Ce travail a présenté une étude détaillée de la modélisation et la conception de BIPV/T mis en œuvre dans un bâtiment performant pour trois climats français différents. Un modèle de double façade photovoltaïque naturellement ventilée a été adapté. Le modèle prend en compte le calcul de débit massique d'air entraîné par la force de flottabilité et l'effet du vent, ainsi que le degré de semi-transparente du vitrage. Validation avec les données expérimentales à partir d'un véritable système à échelle réelle dans des conditions variées montre un accord raisonnable sur le débit massique, bien que les écarts soient observés dans les températures notamment pendant les périodes de fort rayonnement. Meilleure accord pourrait être trouvé pour des rapports de forme plus élevés. Cet écart entre les simulations et les mesures peut être attribuée en partie à des difficultés expérimentales. En même temps, le modèle nécessite plusieurs paramètres à déterminer ce qui accroît les incertitudes dans les prédictions de simulation. Par conséquent, des mesures avec une précision plus élevée sont exigées pour fournir une meilleure estimation de l'erreur.

Ces premiers résultats portant sur l'impact de composants photovoltaïques intégrés au bâtiment donnent une idée de l'influence du degré de semi- transparence sur le comportement énergétique du bâtiment. Cependant, les études menées dans ce travail sont très spécifiques : les bâtiments concernés par la modélisation sont très vitrés. Néanmoins, l'étude montre qu'un système BIPV/T peut être mis en œuvre dans un bâtiment à énergie positif pour les différents climats (chaud ou froid) et fournir un important potentiel de réduction de consommation d'énergétique en chauffage. Dans la phase suivante des travaux réalisés en modélisation vont porter sur les couplages de ces composants PV à d'autres composants afin d'étudier d'autres voies d'optimisation.

#### **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, et al., A review of definitions and calculation methodologies, *Energy Buildings* (2011).
- [3] T. T. Chow, W. He, J. Ji, Dynamic performance of hybrid photovoltaic/thermal collector wall in Hong Kong, *Building and Environment*, 38(11) (2003), pp 1327-1334.
- [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 (2008), pp 230-238.
- [5] M. A. Shameri, M. A. Alghoul, K. Sopian, M. Fauzi, M. Zain, O. Elaye, Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving, *Renewable and Sustainable Reviews*, 15 (2011).



- [6] B. J. Brinkworth, R. H. Marshall, Z. Ibarahim, A validated model of naturally ventilated PV cladding, *Solar Energy*, 69, 1 (1999) pp 67-81.
- [7] TESS, a “Thermal Energy System Specialist”; Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison (1994); TYPE 567: *Glazed building-integrated photovoltaic system (interacts with type 56)*.
- [8] L. Gaillard, S. Giroux, H. Pabiou, C. Ménézo, Full scale experimentation of building integrated photovoltaic component for naturally ventilated double-skin configuration, *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications* 2, (2012).
- [9] S. Saadon, L. Gaillard, S. Giroux, H. Pabiou, C. Ménézo, Modélisation d’une double peau photovoltaïque ventilée, Société Française Thermique, (2013).
- [10] W. H. McAdams, *Heat transmission*. 3<sup>rd</sup> Ed, New York, USA: McGraw-Hill, 532 p, (1954).
- [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* (2002).
- [12] A. D. Jones, C. P. Underwood, A thermal model for photovoltaic systems, *Solar Energy* (2000).