

Mise en place d'un dispositif expérimental pour la caractérisation énergétique d'une paroi bioclimatique ventilée

Installation of an experimental device for the energetic characterization a ventilated bioclimatic wall

Dwinanto SUKAMTO^{1*}, François GLORIAN¹, Monica SIROUX¹

¹INSA de Strasbourg, Laboratoire de ICUBE (UMR 7357)

24 Boulevard de la Victoire – 67000 Strasbourg.

* (auteur correspondant : monica.siroux@insa-strasbourg.fr)

Résumé – Les orientations politiques actuelles imposent le bâtiment à énergie zéro (NZE) comme nouveau standard de la construction neuve pour 2020. Par ailleurs, dans le domaine de la réhabilitation énergétique des bâtiments existants, la recherche de solutions pour la rénovation est un sujet fondamental. L'enjeu de cette démarche est l'efficacité énergétique des bâtiments pour la lutte contre le changement climatique ; un des moyens pour y parvenir, ce sont les parois innovantes bioclimatiques, qui sont la base des économies d'énergie dans le bâtiment de demain. Les travaux de cette communication s'inscrivent dans ce cadre et visent à caractériser les performances énergétiques d'une paroi ventilée bioclimatique. Un dispositif original a été mis en place permettant l'étude expérimentale d'une paroi ventilée bioclimatique. C'est la pertinence de ce dispositif que nous questionnons dans ce papier.

Mots-clés : bâtiment, paroi ventilée, convection

Abstract – The current policy direction enforces a zero-energy building (NZE) as a standard for new constructions in 2020. Moreover, in the area of existing constructions rehabilitation, the quest of renovation solutions is still a fundamental issue. The goal is to seek for the building energy efficiency in the fight against climate change. One of the means to achieve this goal is by implementing innovative bioclimatic walls, which are the core of energy savings for the buildings of the future. This paper falls within this perspective and aims to characterize the energy performances of a bioclimatic ventilated wall by setting up an original experimental device. It is then the question of this device relevance that we address in this paper.

Keywords: Building, ventilated wall, convection

Nomenclature

q densité de flux, $W.m^{-2}$

h coefficient d'échange global, $W.m^{-2}.K^{-1}$

T température, K

Indices et exposants

s surface de la paroi

a ambiance de la cellule

1. Introduction

Le changement climatique est l'enjeu majeur que devra affronter le monde dans l'avenir. Dans ce contexte, la France place le secteur du bâtiment au cœur de sa stratégie pour relever ce défi [1]. L'économie d'énergie est une priorité dans les pays développés. Le secteur du bâtiment est responsable de 40% de la consommation d'énergie en Europe [2]. L'enveloppe du

bâtiment est l'élément de construction qui a le plus grand impact sur la consommation énergétique globale du bâtiment [3][4]. Il faut tenir compte du fait que la façade représente l'interface entre les facteurs environnementaux extérieurs et les exigences intérieures des occupants.

Ces dernières années, l'architecture a montré un intérêt particulier pour les parois ventilées. On ne peut nier qu'il existe un nombre considérable d'études et de publications sur les "enveloppes ventilées" [5][6][7], en particulier sur les façades double peau [8][9][10], le photovoltaïque intégré aux bâtiments [11][12][13], les cheminées solaires, les murs solaires et les murs Trombe [14][15][16], ou encore les capteurs solaires de façade [17][18].

La façade ventilée est choisie par les architectes et les entrepreneurs comme solution d'enveloppe dans une large variété de types de bâtiments, de climats et de configurations de conception. Le système offre une grande diversité de revêtements extérieurs et la possibilité de sélectionner une grande variété de matériaux, de couleurs et de tailles de panneaux. Outre l'aspect esthétique, le but premier de ce type de façade est de protéger les matériaux isolants en dissipant l'humidité.

L'objectif d'une conception bioclimatique d'un bâtiment est d'obtenir un confort intérieur de la manière la plus « naturelle » possible. Pour un site donné, il ne s'agit plus uniquement de se protéger des aléas du climat mais également de valoriser ses bienfaits. Dans cette démarche, on cherche donc à adapter au mieux le bâtiment avec son environnement. La paroi ventilée répond à cette démarche. Dans cette étude, nous cherchons à valoriser la lame d'air de la paroi pour assurer le préchauffage et le renouvellement d'air en période de chauffe. La paroi bioclimatique ventilée fait alors office d'organe d'entrée pour le renouvellement d'air du bâtiment qui en est muni. L'écoulement a lieu sous l'effet du tirage thermique ou à l'aide d'une VMC si le bâtiment concerné en est muni. Ce type de paroi est étudié depuis plusieurs décennies mais son utilisation pour assurer le préchauffage de l'air neuf reste encore rare. De plus, ces performances sont encore sujet à débat. Un dispositif expérimental a été mis en place pour la caractérisation énergétique de ce type de paroi innovante. L'originalité de notre dispositif repose en partie sur l'utilisation des fluxmètres qui permet une analyse plus précise des phénomènes de convection. Notre objectif à terme est d'étudier l'influence de l'épaisseur de la cavité ainsi que du débit d'air sur les performances de la paroi. Pour cela, nous devons auparavant nous assurer que le dispositif est pertinent et opérationnel. L'objet de cet article est donc de présenter notre dispositif expérimental et de montrer à travers plusieurs essais préliminaires sa viabilité.

2. Description du dispositif expérimental mis en place

2.1. Présentation de la paroi ventilée et de la boîte chaude gardée

La paroi ventilée est une paroi avec un canal non hermétiquement isolé participant à l'apport d'air neuf au sein du bâtiment; un échange convectif a lieu dans la cavité selon l'axe de la paroi, qui vient perturber le flux thermique radial entre les ambiances intérieure et extérieure (Figure 1). L'air en écoulement à l'intérieur de la cavité est alors préchauffé et introduit à l'intérieur du bâtiment. Ce dispositif permet alors la diminution des besoins en chauffage du bâtiment. L'échantillon étudié est composé de deux parois de couleur grise de 1m de hauteur et de largeur. La première est fixe tandis que la seconde est mobile permettant ainsi de faire varier l'épaisseur de la cavité ventilée. Ces deux parois sont constituées d'un alliage d'aluminium et de polyéthylène de 3 mm d'épaisseur et présentent une résistance thermique est de $0.008 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$. Leurs surfaces sont lisses (faible rugosité) avec une émissivité de 0.9.

La lame d'air ventilée est introduite au sein d'une boîte chaude gardée (Figure 1). Une boîte chaude gardée est un dispositif composé de deux enceintes climatiques capables de reproduire des conditions de température et d'humidité relative choisies. La plage en température et en humidité va de -30°C à $+60^{\circ}\text{C}$ et de 10% à 98%. Chaque enceinte possède son propre groupe frigorifique garantissant la production de froid avec une précision sur la température de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Chacune possède également 3 résistances électriques de 2.5 kW, garantissant la production de chaleur avec une précision sur la température de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ [19]. La boîte chaude gardée est connectée à un ordinateur permettant de contrôler les paramètres de température et d'humidité de chacune des enceintes.

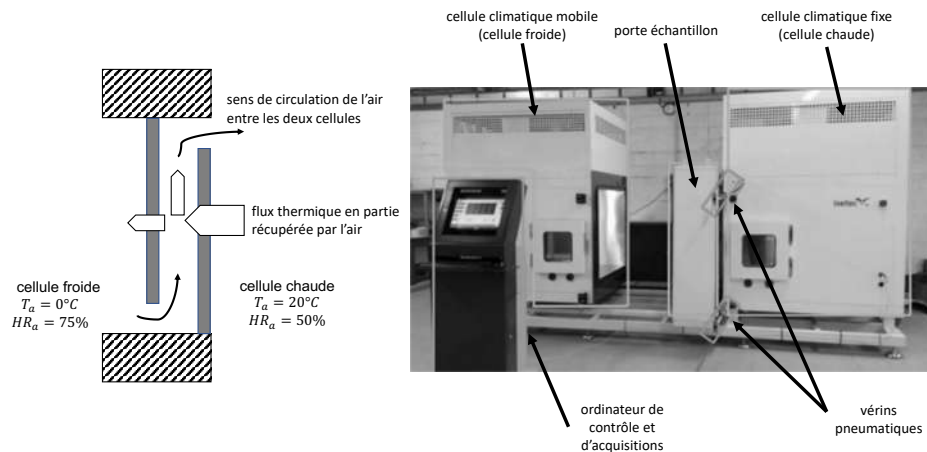


Figure 1: *Présentation de la paroi ventilée (à gauche) intégrée à la porte-échantillon de la boîte chaude gardée (à droite)*

2.2. Instrumentation et système d'acquisition

Pour caractériser le comportement thermique de l'échantillon étudié, la paroi ventilée est équipée de thermocouples de type K et de fluxmètres de la marque Captec Entreprise®, permettant la mesure conjointe des températures de surface, de l'air à l'intérieur comme à l'extérieur de la cavité, ainsi que l'estimation des flux de chaleur de part et d'autre de la cavité ventilée (Figure 2). Dans chacune des cellules climatiques, 3 thermocouples permettent de déterminer les températures d'ambiance. Au niveau de chacune des parois de la cavité ventilée, 12 thermocouples et 4 fluxmètres ont été installés sur 4 niveaux de hauteurs différentes et sont également répartis sur la largeur. Pour la mesure de la température d'air, 3 thermocouples ont été disposés à l'entrée et 3 autres à la sortie de la cavité. A l'intérieur et au milieu de la cavité, se trouvent également 4 thermocouples.

L'écoulement d'air au sein de la cavité est généré à l'aide d'un ventilateur contrôlé par un variateur de tension et la mesure du débit est estimée à l'aide d'un anémomètre à fil chaud CTV 210 du fabricant KIMO.

L'ensemble des capteurs sont connectés à un multimètre Keithley 2700® permettant une mesure en tension de l'ordre du dixième de microVolt. Le multimètre est lui-même relié à un ordinateur par le canal de communication série RS-232. L'acquisition et le traitement des données sont alors effectués via le logiciel LabVIEW.

Une caméra infrarouge est également utilisée afin d'avoir une estimation de la température de la paroi froide du dispositif.

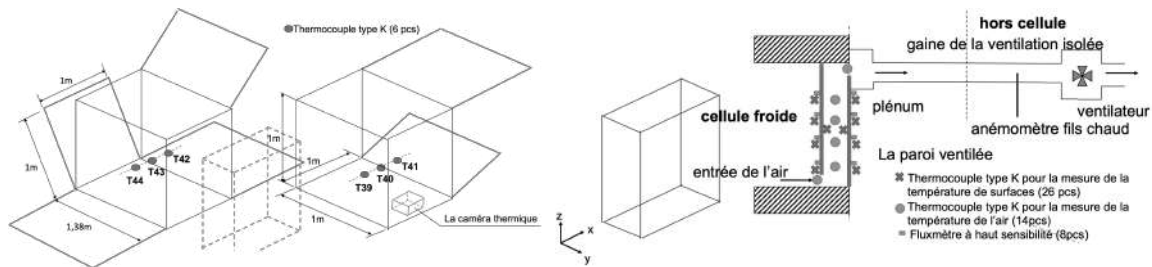


Figure 2: Instrumentations du dispositif

3. Résultats Préliminaires

Plusieurs essais ont été entrepris afin de s'assurer du bon fonctionnement du dispositif. Pour l'ensemble de ces essais de contrôle, les conditions d'ambiance sont fixées à 20°C et 55% d'humidité relative pour la cellule fixe, et 0°C et 75% d'humidité relative pour la cellule mobile. Les relevés de mesure sont réalisés en régime permanent, le débit d'air est de 20 m³.h⁻¹ et s'écoule de la cellule mobile (ambiance froide) à la cellule fixe (ambiance chaude) dans une cavité de 0.01 m d'épaisseur.

3.1. Températures de consigne de la boîte chaude gardée

Dans un premier temps, une vérification de la température de consigne dans chacune des cellules de la boîte chaude gardée a été réalisée. On cherche à obtenir une différence de température d'au moins 20°C entre les 2 cellules de façon à obtenir des flux de chaleur suffisamment élevés pour être correctement mesurés par les fluxmètres [20].

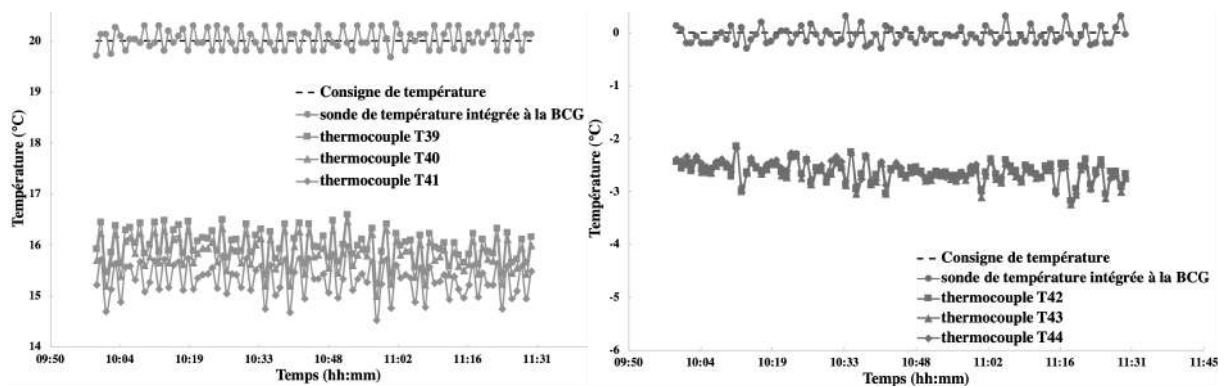


Figure 3 : Mesures de la température ambiante dans la cellule froide (à gauche) et dans la cellule chaude (à droite)

Avec les consignes considérées (20°C dans la cellule fixe et 0°C dans la cellule mobile), on constate pour chacune des cellules, une différence non négligeable sur la mesure de la température ambiante entre le capteur intégré de la boîte chaude gardée et les mesures des thermocouples (Figure 3). On ne peut donc pas se fier à la sonde de température intégrée à la boîte chaude gardée car celle-ci surestime la température ambiante de 2,6°C pour la cellule mobile et de 4,3°C pour la cellule fixe. Cette imprécision peut en partie s'expliquer par le fait que les cellules ne sont pas étanches puisque l'on a créé artificiellement un écoulement d'air entre elles. Or pour une utilisation standard de la boîte chaude gardée, il ne devrait pas y avoir d'échange d'air entre les cellules ; le système de régulation du dispositif s'en trouve alors perturbé.

Par ailleurs, on constate que le brassage de l'air est suffisant pour obtenir une répartition homogène de la température dans le temps et dans l'espace. En moyenne, la différence de mesure maximale constatée entre les thermocouples est de $0,04^{\circ}\text{C}$ dans la cellule mobile et de $0,7^{\circ}\text{C}$ dans la cellule fixe.

3.2. Températures de surface

Dans un second temps, on cherche à vérifier la mesure des températures de surface effectuée par les thermocouples. Pour cela, on la compare à celle obtenue à l'aide d'une caméra infrarouge. La zone couverte par la caméra infrarouge présente une surface de 10 cm^2 . Sur la partie haute et sur la partie basse de cette surface, se trouvent respectivement les thermocouples T8 et T5 (Figure 4).

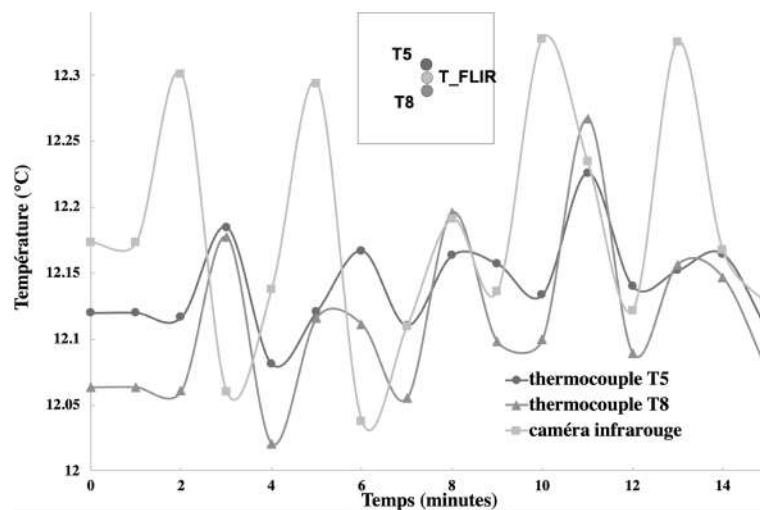


Figure 4 : Mesure des températures de surface

On peut observer que les mesures de température de chacun des capteurs sont stables dans le temps et sensiblement proches. Les moyennes sur la période considérée pour les thermocouples T5, T8 et la caméra infrarouge sont respectivement de $12,14^{\circ}\text{C}$, $12,11^{\circ}\text{C}$ et $12,18^{\circ}\text{C}$. C'est un résultat attendu que d'obtenir une température légèrement supérieure au niveau du thermocouple T5 par rapport au thermocouple T8 [20]. En effet, l'air en circulant dans la paroi se réchauffe peu à peu en récupérant une partie du flux thermique venant de la cellule chaude. Ainsi, la paroi adjacente à la cellule froide qui est en contact avec cet air de plus en plus chaud, se réchauffe également le long de la cavité. En faisant une moyenne de température avec les thermocouples T5 et T8, on obtient une moyenne de la température sur la surface couverte par la caméra infrarouge. On constate alors que l'écart de mesure entre ces 2 types de sondes est de $0,05^{\circ}\text{C}$. Les mesures des températures de surface par les thermocouples sont donc en adéquation avec les mesures réalisées par caméra infrarouge et confirme la fiabilité de l'instrumentation des parois.

3.3. Calcul du coefficient d'échange de chaleur h à la surface des parois

Pour finir, on cherche à quantifier le coefficient d'échange de chaleur entre les parois de notre échantillon et les ambiances de chacune des cellules. Pour ce travail, nous avons considéré 2 épaisseurs de lame d'air distinctes ($0,005\text{ m}$ et $0,01\text{ m}$) et 3 débits d'air ($10\text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, $20\text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ et $30\text{ m}^3.\text{h}^{-1}$).

L'utilisation conjointe des thermocouples et des fluxmètres permet une estimation expérimentale de ces coefficients d'échange sans avoir recours à des corrélations existantes. C'est un des intérêts de notre dispositif. Pour estimer ces paramètres, on se base sur la loi de Newton :

$$h=q/(T_s-T_a) \quad (1)$$

Selon cette relation, l'estimation du coefficient d'échange pariétal h , nécessite la connaissance de la densité du flux de chaleur q traversant la paroi, de la température ambiante de l'air dans la cellule considérée T_a ainsi que de la température à la surface de la paroi T_s .

Chaque paroi de l'échantillon étant munie, selon différentes hauteurs, de 4 fluxmètres et de 4 thermocouples, il est possible d'obtenir 4 estimations locales du coefficients h par cellule. Pour la température ambiante dans chacune des cellules, on considère une unique température d'air correspondant à la moyenne des mesures des 3 thermocouples installés dans chaque cellule.

La figure 5 présente les estimations du coefficient h à la surface de la paroi dans chacune des cellules et pour des épaisseurs de cavité et des débits d'air différents. Le coefficient h varie entre $15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et $24 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ sur l'ensemble des essais avec une moyenne de $20,4 \pm 2,7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour la cellule mobile et $18,4 \pm 1,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pour la cellule fixe. Cet ordre de grandeur est cohérent par rapport aux corrélations que l'on peut trouver dans la littérature [21]. On peut remarquer que ni l'épaisseur de cavité, ni le débit d'air dans la paroi, n'ont véritablement d'influence sur les estimations du coefficient h . Cela signifie que ces 2 paramètres n'ont pas d'influence sur les ambiances des 2 cellules climatiques. Par contre, le coefficient h dépend de la position à laquelle il a été calculé et on peut constater que, pour une hauteur donnée, les estimations du coefficient h sont relativement homogènes. On peut penser que, dans chacune des cellules, les mouvements d'air provoqués par le système de régulation, ne sont pas uniformes près des parois de l'échantillon, provoquant des variations locales du coefficient h .

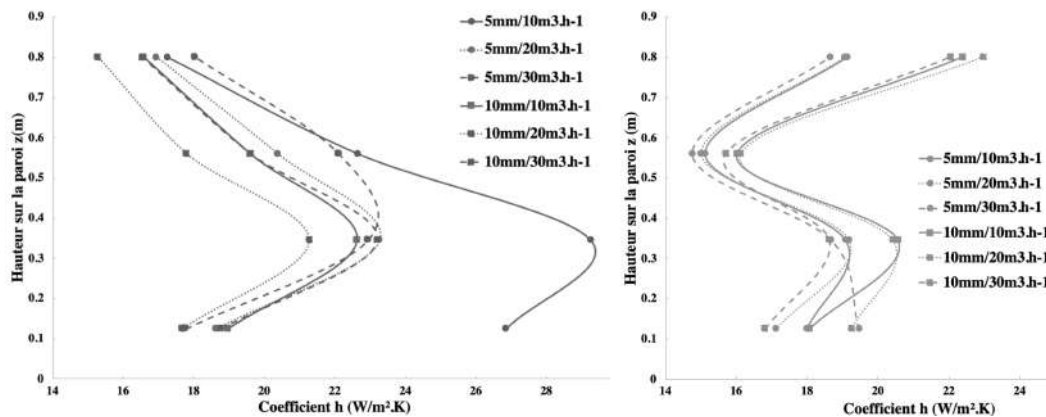


Figure 5 : Estimation du coefficient h à la surface de la paroi dans la cellule froide (à gauche) et dans la cellule chaude (à droite)

Les résultats concernant les incertitudes sur les estimations du coefficient h (Tableau 1) sont globalement satisfaisants. Une incertitude de 5% a été considérée pour les fluxmètres et une incertitude de 0.02°C pour les thermocouples. On peut constater que les incertitudes sont plus faibles dans la cellule chaude dans la mesure où les flux et les différences de températures mis en jeu sont plus importants. C'est dans la cellule froide, au niveau de la partie basse de la paroi que les incertitudes sont les plus importantes ; à cet endroit, les

températures entre la paroi et l'ambiance de la cellule froide sont très proches et souvent de l'ordre du dixième de degré.

hauteur sur la paroi (m)	cellule froide						cellule chaude					
	cavité de 5 mm pour un débit (en $m^3.h^{-1}$) de			cavité de 10 mm pour un débit (en $m^3.h^{-1}$) de			cavité de 5 mm pour un débit (en $m^3.h^{-1}$) de			cavité de 10 mm pour un débit (en $m^3.h^{-1}$) de		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
0.8	1.5	1.5	1.7	1.5	1.4	1.7	1.5	1.5	1.4	1.8	1.8	1.6
0.56	2.7	2.3	2.7	2.2	2.0	2.4	1.2	1.2	1.1	1.3	1.3	1.2
0.345	4.6	3.0	3.0	3.1	2.7	3.2	1.5	1.6	1.5	1.6	1.6	1.4
0.123	5.1	2.8	2.7	3.1	2.9	3.4	1.4	1.3	1.5	1.4	1.5	1.2

Tableau 1 : Calcul des incertitudes sur la mesure du coefficient d'échange h à la surface de la paroi dans la cellule froide et dans la cellule chaude (en $W.m^{-2}.K^{-1}$)

4. Conclusion

Cette étude a pour objectif de montrer la pertinence de notre dispositif expérimental pour l'étude des parois bioclimatiques ventilées. A travers plusieurs essais préliminaires, nous avons cherché à caractériser notre dispositif. Nous avons tout d'abord remarqué que le système de régulation de la boîte chaude gardée n'est pas très précis et qu'il est indispensable d'instrumenter chacune des cellules pour en déterminer les conditions d'ambiance. Concernant la mesure des températures de surface, les résultats sont semblables, que l'on utilise des thermocouples ou une caméra infrarouge. Pour finir, nous avons cherché à estimer la valeur du coefficient d'échange h au niveau de chaque paroi de notre échantillon. Ce dernier travail a été complété par une analyse des incertitudes de mesure qui s'est révélée satisfaisante.

Par la suite, nous allons entamer une série d'expérimentations de façon à identifier la configuration optimale de la paroi ventilée en termes d'épaisseur de cavité et de débit.

Références

- [1] Bâtiments à énergie positive et réduction carbone, (2019) 3–5. <http://www.batiment-energiecarbone.fr/contexte-a2.html>.
- [2] E. Commission, Evaluation of the Energy Performance of Building Directive 2010/31/EU, 2015. http://ec.europa.eu/smart-regulation/evaluation/index_en.htm.
- [3] G. Manioğlu, Z. Yilmaz, Economic evaluation of the building envelope and operation period of heating system in terms of thermal comfort, Energy Build. 38 (2006) 266–272. doi:10.1016/j.enbuild.2005.06.009.
- [4] R. Pacheco, J. Ordóñez, G. Martínez, Energy efficient design of building: A review, Renew. Sustain. Energy Rev. 16 (2012) 3559–3573. doi:10.1016/j.rser.2012.03.045.
- [5] L.F. Cabeza, A. De Gracia, A. Castell, L. Navarro, E. Oro, Numerical modelling of ventilated facades : A review, 22 (2013) 539–549. doi:10.1016/j.rser.2013.02.029.
- [6] H.Y. Chan, S.B. Riffat, J. Zhu, Review of passive solar heating and cooling technologies, Renew. Sustain. Energy Rev. 14 (2010) 781–789. doi:10.1016/j.rser.2009.10.030.

- [7] C.M. Lai, S. Hokoi, Solar façades: A review, *Build. Environ.* 91 (2015) 152–165. doi:10.1016/j.buildenv.2015.01.007.
- [8] S. Barbosa, K. Ip, Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 40 (2014) 1019–1029. doi:10.1016/j.rser.2014.07.192.
- [9] A. Pappas, Z. Zhai, Numerical investigation on thermal performance and correlations of double skin façade with buoyancy-driven airflow, *Energy Build.* 40 (2008) 466–475. doi:10.1016/j.enbuild.2007.04.002.
- [10] M.A. Shameri, M.A. Alghoul, K. Sopian, M.F.M. Zain, O. Elayeb, Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 1468–1475. doi:10.1016/j.rser.2010.10.016.
- [11] G. Quesada, D. Rousse, Y. Dutil, M. Badache, S. Hallé, A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 2820–2832. doi:10.1016/j.rser.2012.01.078.
- [12] I. Cerón, E. Caamaño-Martín, F.J. Neila, “State-of-the-art” of building integrated photovoltaic products, *Renew. Energy.* 58 (2013) 127–133. doi:10.1016/j.renene.2013.02.013.
- [13] O. Zogou, H. Stapountzis, Experimental validation of an improved concept of building integrated photovoltaic panels, *Renew. Energy.* 36 (2011) 3488–3498. doi:10.1016/j.renene.2011.05.034.
- [14] D.J. Harris, N. Helwig, Solar chimney and building ventilation, *Appl. Energy.* 84 (2007) 135–146. doi:10.1016/j.apenergy.2006.07.001.
- [15] R. Khanal, C. Lei, Solar chimney-A passive strategy for natural ventilation, *Energy Build.* 43 (2011) 1811–1819. doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.035.
- [16] O. Saadatian, K. Sopian, C.H. Lim, N. Asim, M.Y. Sulaiman, Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 6340–6351. doi:10.1016/j.rser.2012.06.032.
- [17] L.H. Gunnewiek, E. Brundrett, K.G.T. Hollands, Flow distribution in unglazed transpired plate solar air heaters of large area, *Sol. Energy.* 58 (1996) 227–237. doi:10.1016/S0038-092X(96)00083-7.
- [18] M.A. Leon, S. Kumar, Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors, *Sol. Energy.* 81 (2007) 62–75. doi:10.1016/j.solener.2006.06.017.
- [19] I. Entreprise, *Manual Usuario*, Ineltec Entreprise, n.d.
- [20] F. Gloriant, P. Tittlein, A. Joulin, S. Lassue, Study Of The Performances Of A Supply-Air Window For Air Renewal Pre-Heating, *Energy Procedia.* 78 (2015) 525–530. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.727.
- [21] J. Padet, Convection thermique et massique Principes généraux, 33 (2005) 0–23. <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.insa-strasbourg.fr/base-documentaire/energies-th4/transferts-thermiques-42214210/convection-thermique-et-massique-be8205/>.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à la fondation ARCONIC et l’INSA de Strasbourg.