

Etude expérimentale du comportement thermique d'une fenêtre pariétodynamique. Comparaison à celui d'une fenêtre classique à double vitrage.

Ghislain MICHAUX^{1*}, Rémy GREFFET^{1,2}, Patrick SALAGNAC¹, Jean-Baptiste RIDORET²

¹ LaSIE, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement, Université de La Rochelle
Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle, Cedex 1

² Groupe Ridoret

ZI Chef de Baie, 70 rue de Québec, 17000 La Rochelle

*(auteur correspondant : ghislain.michaux@univ-lr.fr)

Résumé - Nous présentons les principaux résultats d'une étude paramétrique expérimentale réalisée pour différentes conditions climatiques et de fonctionnement d'une fenêtre pariétodynamique. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus avec une fenêtre classique à double vitrage. Les principaux enseignements sont que la température superficielle interne du vitrage de la fenêtre pariétodynamique ainsi que la température de l'air soufflé par cette dernière (préchauffage) sont essentiellement influencées par la température extérieure, le débit d'air neuf traversant la fenêtre et le rayonnement solaire. Il en ressort que la fenêtre classique permet de réduire l'effet de paroi froide mais que ses performances thermiques se dégradent davantage que celles de la fenêtre pariétodynamique avec la diminution de la température extérieure et l'augmentation du flux solaire incident.

1. Introduction

La fenêtre pariétodynamique est l'une des technologies susceptibles de répondre à la problématique énergétique des bâtiments et d'en réduire l'impact environnemental. Cette fenêtre « ventilée » permet en effet de réduire les déperditions de chaleur imputables aux parois vitrées et au renouvellement d'air. Ceux-ci sont aujourd'hui les deux points faibles en terme de performance énergétique des bâtiments. Cela est particulièrement vrai pour les bâtiments passifs pour lesquels les déperditions de chaleur sont de l'ordre de 60 % à travers les parois vitrées et de 20 % par la ventilation [1]. La fenêtre pariétodynamique présente aussi l'avantage d'être adaptée à la réhabilitation et de contribuer au confort lumineux, acoustique et à la qualité de l'air intérieur.

Un certain nombre d'études sur les fenêtres pariétodynamiques ont été menées [2-10], mettant en évidence les avantages de ce type de fenêtre, ainsi que ses performances thermiques. La fenêtre pariétodynamique considérée ici, dont nous avons caractérisé les performances thermiques expérimentalement et numériquement [11, 12], est présentée par la Figure 1. Son principe de fonctionnement est de faire circuler l'air neuf provenant de l'extérieur entre les verres du vitrage de la fenêtre avant son introduction dans le bâtiment, nécessaire au renouvellement d'air sanitaire. Cette circulation d'air est forcée, imposée par le système d'extraction d'air (VMC). L'air entrant est ainsi préchauffé puisqu'il récupère à la fois une part des déperditions de chaleur à travers la fenêtre ainsi qu'une part de l'énergie provenant du rayonnement solaire et absorbée par le vitrage. De plus, l'air ainsi préchauffé et soufflé dans le bâtiment permet de réduire l'effet de « courant d'air froid » pour les occupants.

Nous présentons ici des résultats expérimentaux issus d'une campagne de mesures in situ ayant été réalisée pendant plus de deux ans. A cet effet, deux cellules d'essais ont été instrumentées, l'une équipée d'une fenêtre pariétodynamique, et l'autre d'une fenêtre classique à double vitrage. L'ensemble des résultats de mesure ainsi collectés, pour

différentes conditions climatiques (température extérieure, température radiante d'environnement, ensoleillement et vitesse de vent) et pour différentes conditions de fonctionnement (débit d'air entrant) a permis de mener une étude paramétrique du comportement thermique de la fenêtre pariétodynamique. Les principaux résultats de cette étude sont ici présentés puis comparés à ceux obtenus, dans les mêmes conditions, avec une fenêtre classique à double vitrage, permettant ainsi de disposer d'une base de comparaison pour l'analyse des résultats.

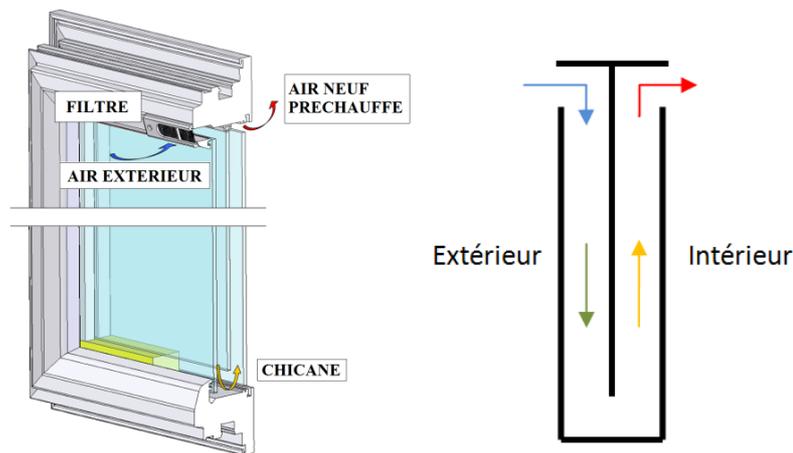


Figure 1 : Coupe de la fenêtre considérée (source : Groupe Ridoret) et principe de la circulation d'air au sein de celle-ci.

2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est constitué de deux cellules identiques de 6 m^2 de surface au sol (volume de 15 m^3). Ces cellules ont été aménagées dans un hangar situé sur le site du Groupe Ridoret à La Rochelle (France). Seule une face de chaque cellule est exposée aux conditions climatiques extérieures et est équipée d'une fenêtre au nu intérieur du mur (Figure 2). Les vitrages des fenêtres ont une surface de $0,97 \times 0,62 \text{ m}^2$. Les murs, les plafonds ainsi que les portes ont été isolés thermiquement grâce à 160 mm de polystyrène et 100 mm pour le sol. Afin de ne pas perturber thermiquement les cellules, les systèmes d'acquisition des données et de commande ont été placés dans un local technique adjacent.

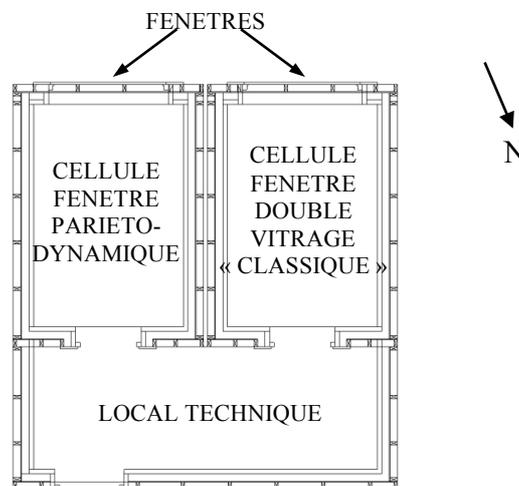


Figure 2 : Schéma des cellules expérimentales (coupe horizontale).

2.1. Régulation et acquisition

La température de l'air intérieur de chaque cellule a été maintenue à 30°C au dessus de la température de l'air extérieur en utilisant un convecteur électrique (régulation avec un intervalle de température de $\pm 0,1^\circ\text{C}$). Ce convecteur électrique est contrôlé par un gradateur à angle de phase piloté par une centrale d'acquisition-commande Agilent 34980A. Celle-ci est équipée de trois multiplexeurs de 40 voies avec compensation en température. La centrale est commandée à partir d'un ordinateur (logiciel Labview) et les ventilateurs d'extraction de 90 mm de diamètre par une alimentation à tension continue à double sortie.

2.2. Capteurs

Des thermocouples ont été fixés, à l'aide d'une colle conductrice thermiquement et translucide, sur les faces des vitrages de la fenêtre pariétodynamique (Figure 3a). Celles-ci sont numérotées de 1 (face intérieure) à 6 (face extérieure). Des thermocouples ont également été positionnés au soufflage (au sein de la grille d'entrée d'air de la fenêtre), dans les lames d'air à l'aide de cales en liège et dans le cadre. Les thermocouples sont fins (diamètre de conducteurs de 79 μm pour une soudure chaude de 150 à 200 μm de diamètre) afin de limiter les effets du rayonnement solaire sur ces derniers. Les faces extérieure (face 1) et intérieure (face 4) du vitrage de la fenêtre classique (4/16/4 avec traitement faible émissivité et remplissage argon) ont également été instrumentées (Figure 3b). Enfin, 3 thermocouples (diamètre de conducteur de 300 μm) ont été placés au centre de chaque cellule à 20, 105 et 180 cm du sol. La température de l'air intérieur, notamment utilisée pour piloter les convecteurs des cellules, a alors été définie comme la moyenne des valeurs ainsi mesurées.

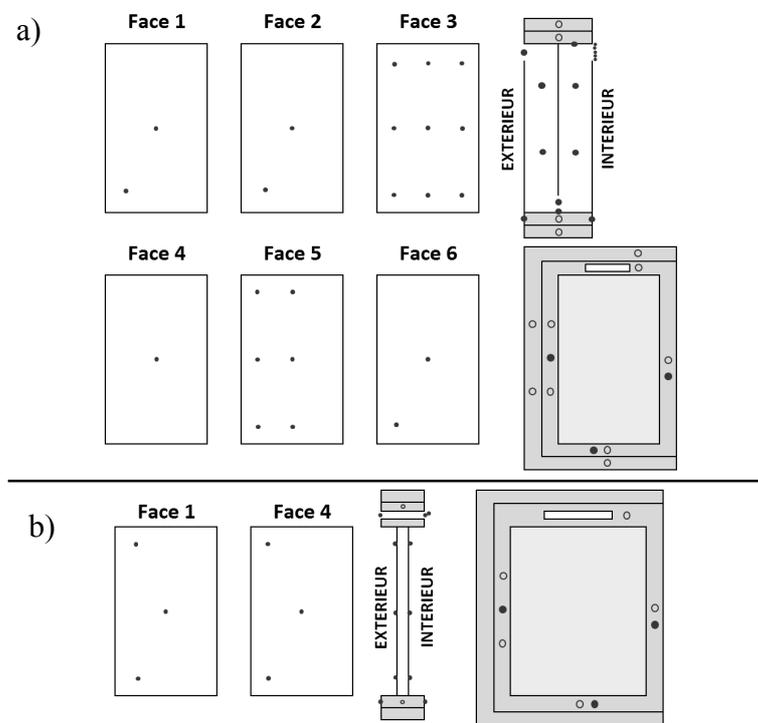


Figure 3 : Positions des thermocouples sur les fenêtres.
a) fenêtre pariétodynamique. b) fenêtre classique.

Tous les capteurs de température ont été préalablement étalonnés dans un bain thermostaté en utilisant une sonde Pt100 comme sonde de référence dont l'incertitude est de $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Après le processus de calibration, la lecture de 40 mesures successives a été vérifiée par

comparaison à la valeur donnée par la sonde de référence. Tous les capteurs ont une déviation maximale de $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$ par rapport à la sonde de référence et un écart-type inférieur à $0,02^{\circ}\text{C}$ sur la plage de température $0-90^{\circ}\text{C}$.

Le débit d'air extrait de chaque cellule a été déduit de la vitesse d'air mesurée à l'aide d'anémomètres à fil chaud placés au centre de chaque conduit d'extraction. La fenêtre pariétodynamique a été préalablement testée sur un banc d'essai afin de permettre de déduire de la valeur de la pression différentielle entre la façade de la cellule et l'intérieur, mesurée par un micro-manomètre différentiel, celle du débit d'air traversant la fenêtre pariétodynamique.

Concernant les conditions extérieures, un pyranomètre et un pyrgéomètre ont été placés verticalement sur la façade du hangar pour mesurer le flux solaire incident sur la fenêtre ainsi que le flux de grandes longueurs d'ondes (GLO) échangé entre l'environnement extérieur et les fenêtres. Ce flux GLO mesuré a été utilisé pour déterminer la température radiante moyenne d'environnement. Par ailleurs, la température et l'humidité relative de l'air extérieur ont été respectivement mesurées à l'aide d'une sonde Pt100 et d'un capteur capacitif.

3. Résultats et discussions

Afin d'étudier le comportement de la fenêtre pariétodynamique, et de le comparer à celui de la fenêtre à double vitrage classique de référence, nous avons mené une étude paramétrique pour les deux types de fenêtre dans l'objectif d'évaluer l'influence de différents paramètres sur les températures superficielles interne et externe du vitrage, ainsi que celle de l'air neuf entrant dans la cellule. Les paramètres d'influence considérés lors de cette étude sont la température extérieure, la température radiante d'environnement, l'ensoleillement, la vitesse du vent et le débit d'air entrant. Parmi l'ensemble des résultats ainsi obtenus, sont présentés ci-après ceux qui mettent en évidence des effets significatifs de ces paramètres ainsi qu'une différence notable de comportement entre les deux types de fenêtres.

Sur l'ensemble des graphiques figurant dans cette partie, chaque point correspond à une période « nuit » (2h à 7h30 du matin) ou « jour » (le reste de la journée) et est issu de mesures effectuées en quasi-continu sur environ 28 mois. La période « nuit » commence longtemps après le coucher du soleil de manière à nous assurer que les matériaux des fenêtres aient déstocké l'essentiel de la chaleur accumulée durant la journée. Une sélection des mesures a été opérée de manière à ne retenir que les périodes correspondant aux conditions de référence précisées par le Tableau 1, et pour lesquelles seul le paramètre considéré varie.

Différence entre la température de l'air intérieur et celle de l'air extérieur	$24^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{air,int}} - T_{\text{air,ext}} \leq 26^{\circ}\text{C}$
Différence entre la température de l'air extérieur et la température radiante moyenne d'environnement	$-1^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{air,ext}} - T_{\text{rad,ext}} \leq 1^{\circ}\text{C}$
Densité du flux solaire incident	$300 \text{ W.m}^{-2} \leq \varphi \leq 350 \text{ W.m}^{-2}$
Vitesse du vent	$0,7 \text{ m.s}^{-1} \leq V_{\text{vent}} \leq 1,3 \text{ m.s}^{-1}$
Débit d'air	$20 \text{ m}^3.\text{h}^{-1} \leq \text{Débit d'air} \leq 25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$

Tableau 1 : Conditions de référence de l'étude paramétrique expérimentale.

3.1. Influence de la température de l'air extérieur

La Figure 4 présente l'influence de la température de l'air extérieur sur la température de la face intérieure, i.e. la face 6 de la fenêtre pariétodynamique (FD) et la face 4 de la fenêtre à double vitrage (DV). Les droites obtenues par régression linéaire pour chaque série de points apparaissent en traits pointillés. On peut observer que, pour un faible écart entre les

températures intérieure et extérieure, la température de la face intérieure de la fenêtre FD est proche de celle de la fenêtre DV. En revanche, que ce soit de jour ou de nuit, l'écart se creuse à mesure que la température de l'air extérieur diminue. Par conséquent, l'effet de paroi froide est plus important pour la fenêtre FD.

Les écarts entre les deux fenêtres sont plus marqués sur la Figure 5 qui présente l'influence de la température de l'air extérieur sur la température de leurs faces extérieures (face 1). En effet, et contrairement à la fenêtre DV, la température intérieure n'a que peu d'influence sur la température de la face extérieure de la fenêtre FD. Dû à la circulation d'air neuf, celle-ci demeure proche de la température de l'air extérieur, de jour et de nuit, ce qui a pour effet de limiter les émissions de chaleur par convection vers l'extérieur, et donc les déperditions.

On peut aussi noter que l'ensoleillement n'a un effet notable que sur la fenêtre DV, avec une température de vitrage nettement plus élevée de jour que de nuit, ce qui traduit le fait que les apports solaires sont en grande partie transmis à l'air neuf circulant dans la fenêtre FD.

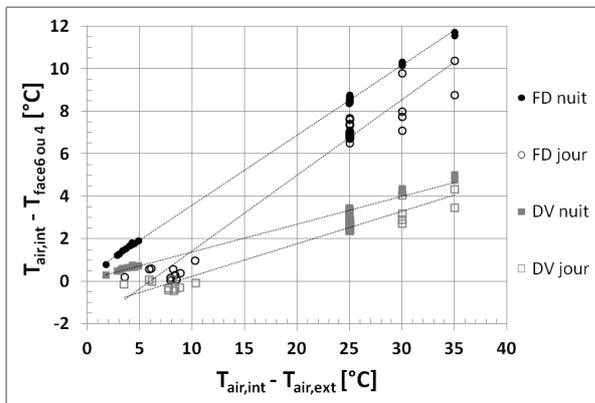


Figure 4 : Température de la face intérieure en fonction de la température d'air extérieur.

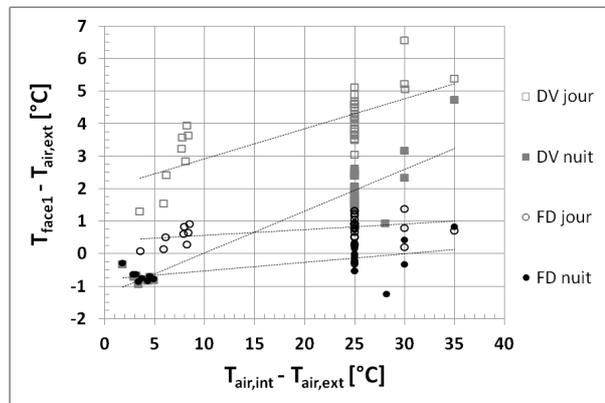


Figure 5 : Température de la face extérieure en fonction de la température d'air intérieur.

3.2. Influence de la température radiante moyenne d'environnement

L'influence de la température radiante moyenne d'environnement est illustrée par les Figures 6 et 7 qui présentent respectivement l'évolution de la température de la face extérieure de vitrage et celle de la température de l'air soufflé (fenêtre FD). Aucun effet significatif n'a été observé sur la température des faces intérieures.

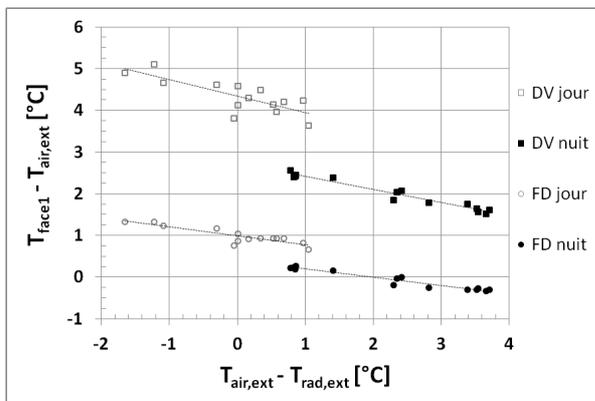


Figure 6 : Température de la face extérieure en fonction de la température radiante extérieure.

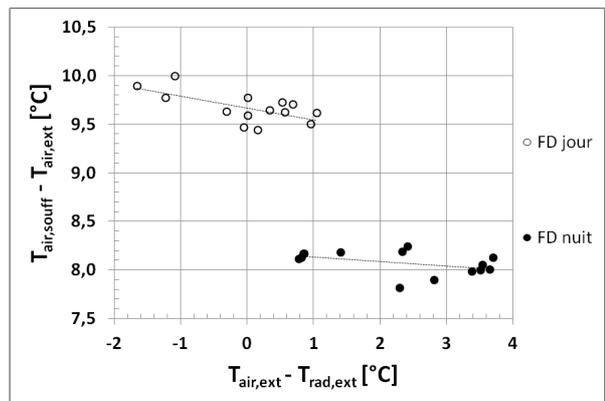


Figure 7 : Température de l'air soufflé en fonction de la température radiante extérieure.

On peut noter sur la Figure 6 que la température radiante extérieure influence peu, et de manière similaire, celle de la face externe des deux types de vitrage. Par contre, les valeurs de température du vitrage FD sont nettement plus faibles que celles du vitrage DV, que ce soit de jour ou de nuit. Ceci traduit de nouveau l'effet de la circulation d'air neuf à travers la fenêtre FD qui induit un refroidissement du vitrage extérieur, et donc une réduction de l'écart avec la température radiante extérieure. Les émissions de chaleur par rayonnement vers l'extérieur, et donc les déperditions, sont par conséquent réduites avec la fenêtre FD.

La température radiante extérieure ayant peu d'impact sur les températures des faces intérieure et extérieure, on observe sur la Figure 7 que la température de l'air soufflé par la fenêtre FD est elle aussi peu influencée par les échanges radiatifs GLO extérieurs. On note néanmoins que cet effet est plus marqué le jour que la nuit, le réchauffement du vitrage par les apports solaires augmentant les échanges de chaleur avec l'environnement extérieur.

3.3. Influence de l'ensoleillement

Nous nous intéressons ici à l'effet du rayonnement solaire. A noter que nous avons observé que l'influence de la vitesse du vent sur la température des faces des vitrages des deux types de fenêtre ainsi que sur la température de soufflage est peu perceptible.

La Figure 8 présente les évolutions de la température de la face intérieure des vitrages en fonction de la densité de flux solaire incident. Ces évolutions sont similaires, mais nous observons de nouveau l'effet de la circulation d'air à travers la fenêtre FD : quel que soit l'ensoleillement, la face interne du vitrage DV (face 4) est toujours plus chaude que celle du vitrage FD (face 6), d'où un effet de paroi froide moindre.

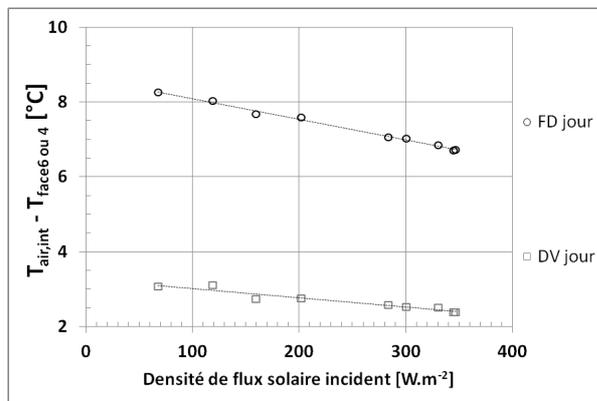


Figure 8 : Température de la face intérieure en fonction de la densité de flux solaire.

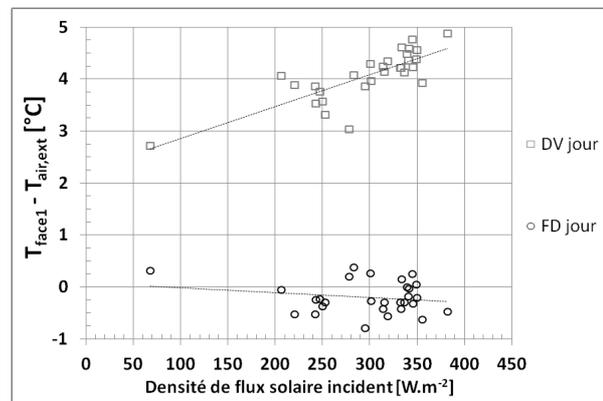


Figure 9 : Température de la face extérieure en fonction de la densité de flux solaire.

On observe sur la Figure 9 que, contrairement à la température de la face intérieure, celle de la face extérieure du vitrage FD est peu sensible à la densité du flux solaire. Ceci traduit le fait que le vitrage FD permet de récupérer en quasi-totalité le flux solaire absorbé par le vitrage et réémis vers l'extérieur. A l'inverse, la face 1 du vitrage DV s'échauffe et ainsi augmente le flux émis vers l'extérieur à mesure que le flux solaire incident croît.

La Figure 10 présente l'élévation de la température de l'air soufflé en fonction de la densité de flux solaire incident. Cette augmentation du préchauffage de l'air neuf traversant la fenêtre FD est dû à la récupération par l'air du flux solaire absorbé par le vitrage et permet de contrebalancer l'effet de paroi froide constaté précédemment sur les Figures 4 et 8.

3.4. Influence du débit d'air neuf entrant

On observe sur la Figure 11 que le débit d'air neuf par l'entrée d'air classique équipant la fenêtre DV n'a évidemment que peu d'influence sur la température de la face extérieure (face 1) du vitrage de cette dernière. Bien que les niveaux de température soient plus faibles, on remarque que le débit d'air entrant et traversant la fenêtre FD n'a aussi que peu d'effet sur la température de la face extérieure du vitrage de cette dernière.

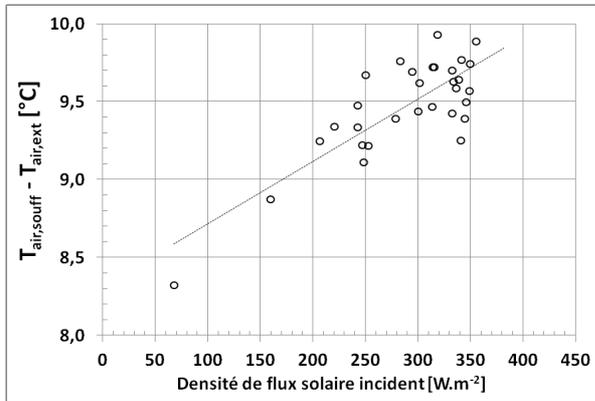


Figure 10 : Température de l'air soufflé en fonction de la densité de flux solaire.

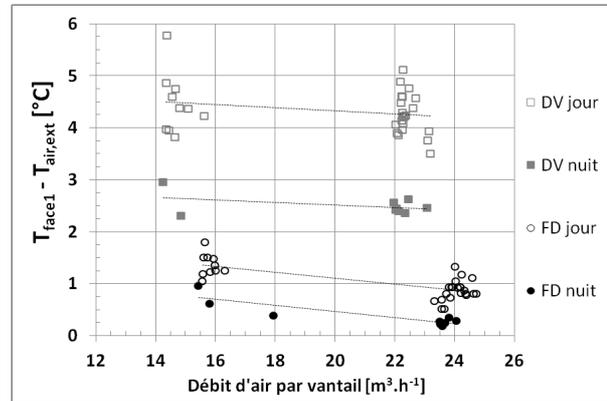


Figure 11 : Température de la face extérieure en fonction du débit d'air par vantail.

La Figure 12 présente l'évolution de la température de la face intérieure des vitrages en fonction du débit d'air par vantail. Les résultats sont ici présentés pour plusieurs valeurs de l'écart de température entre l'air intérieur et l'air extérieur. Naturellement, la face intérieure du vitrage DV (face 4) n'est que peu influencée par le débit d'air traversant l'ouvrant quel que soit l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur. Par contre, pour le vitrage FD, plus le débit d'air neuf est important, plus la face intérieure (face 6) est refroidie, et ce d'autant plus que l'écart entre les températures intérieure et extérieure est élevé. Ainsi, la température de la face intérieure du vitrage FD est d'autant plus sensible au débit d'air que l'écart de température est élevé entre l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur.

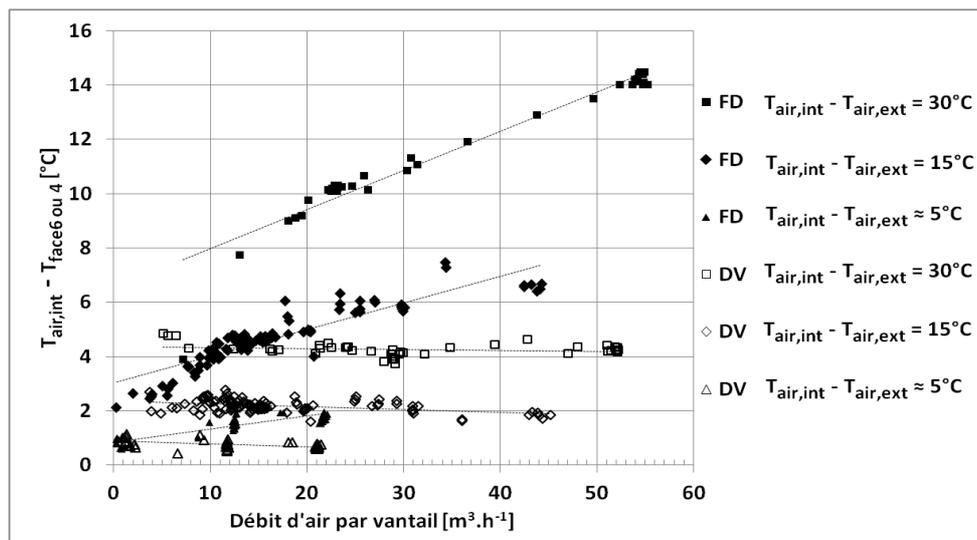


Figure 12 : Température de la face intérieure en fonction du débit d'air par vantail et de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur.

4. Conclusion

Nous avons présenté les principaux résultats d'une étude paramétrique expérimentale du comportement thermique d'une fenêtre pariétodynamique pour différentes conditions climatiques et de fonctionnement. Ces résultats sont confrontés à ceux obtenus, dans les mêmes conditions, avec une fenêtre classique à double vitrage prise comme référence.

Les principaux enseignements issus de cette étude paramétrique sont que la température superficielle externe du vitrage de la fenêtre pariétodynamique est peu influencée par les paramètres considérés, alors que la température superficielle interne et celle de l'air soufflé varient fortement en fonction de la température extérieure et du débit d'air entrant. Le rayonnement solaire, qui affecte aussi la température de l'air soufflé, a un impact significatif sur la température superficielle interne de la fenêtre pariétodynamique, d'où un effet de paroi froide plus marqué que dans le cas d'une fenêtre classique à double vitrage. Néanmoins, ce désavantage est contrebalancé par le préchauffage de l'air neuf entrant puis soufflé par la fenêtre pariétodynamique. De plus, les résultats ont permis de mettre en évidence que, contrairement à la fenêtre pariétodynamique, les performances thermiques de la fenêtre classique à double vitrage se dégradent davantage avec la diminution de la température extérieure et l'augmentation du flux solaire incident.

Références

- [1] W. Feist, J. Schnieders, Energy efficiency – a key to sustainable housing, *The European Physical Journal - Special Topics*, 176, 1 (2009), 141-153.
- [2] J. S. Carlos, H. Corvacho, P. D. Silva, J.P. Castro-Gomes, Modelling and simulation of a ventilated double window, *Applied Thermal Engineering*, 31 (2011), 93–102.
- [3] T.T. Chow, Z. Lin, K.F. Fong, L.S. Chan, M.M. He, Thermal performance of natural airflow window in subtropical and temperate climate zones – a comparative study, *Energy Conversion and Management*, 50 (2009), 1884– 1890.
- [4] J.R. Gosselin, Q. Chen, A computational method for calculating heat transfer and airflow through a dual-airflow window, *Energy and Buildings*, 40 (2008), 452–458.
- [5] J.R. Gosselin, Q. Chen, A dual airflow window for indoor air quality improvement and energy conservation in buildings, *HVAC&R Research*, 14 (2008), 359-372.
- [6] M.E. McEvoy, R.G. Southall, P.H. Baker, Test cell evaluation of supply air windows to characterise their optimum performance and its verification by use of modeling techniques, *Energy and Buildings*, 35 (2003), 1009–1020.
- [7] D. Appelfeld, S. Svendsen, Experimental analysis of energy performance of a ventilated window for heat recovery under controlled conditions, *Energy and Buildings*, 43, 11 (2011), 3200-3207.
- [8] J. S. Carlos, H. Corvacho, P. D. Silva, J. P. Castro-Gomes, Real climate experimental study of two double window systems with preheating of ventilation air, *Energy and Buildings*, 42, 6 (2010), 928-934.
- [9] M.-H. Kim, W.-J. Yang, An optimum design on the triple-glazed exhaust airflow window, *International journal of energy research*, 26, 4 (2002), 355-364.
- [10] J. Wei, J. Zhao, Q. Chen, Energy performance of a dual airflow window under different climates, *Energy and Buildings*, 42 (2010), 111–122.
- [11] R. Greffet, G. Michaux, P. Salagnac, J.-B. Ridoret, Etude numérique des transferts de chaleur dans une fenêtre pariétodynamique, *Congrès de la Société Française de Thermique, Gerardmer* (2013)
- [12] R. Greffet, G. Michaux, P. Salagnac, J.-B. Ridoret, Validation d'un modèle numérique de fenêtre pariétodynamique en conditions in situ, *Congrès de la Société Française de Thermique, La Rochelle* (2015)