

Validation d'un modèle numérique de fenêtre pariétodynamique en conditions in-situ.

Rémy GREFFET^{1,2}, Ghislain MICHAUX¹, Patrick SALAGNAC^{1*}, Jean-Baptiste RIDORET²

¹Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement
Avenue Michel Crépeau – 17000 La Rochelle

* (auteur correspondant : patrick.salagnac@univ-lr.fr)

²Groupe Ridoret

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

Résumé – En France, le secteur du bâtiment représente 43 % de la consommation d'énergie. Pour réduire cette consommation, cela passe par une amélioration des performances de l'enveloppe du bâtiment. Dès lors, les fenêtres et la ventilation deviennent les points clés à améliorer en termes de déperditions. Ces deux éléments peuvent être à la fois la source d'une part importante des déperditions (80 % pour une maison passive) mais aussi source de gains solaires pour les fenêtres (37 % des apports thermiques pour une maison passive). Une solution peut venir de l'utilisation de fenêtres pariétodynamiques. Le principe de ce type de fenêtre consiste à faire circuler l'air neuf, provenant de l'extérieur, à travers les vitrages avant son introduction dans le bâtiment (Figure 1). Ainsi, l'air se réchauffe en récupérant à la fois les déperditions thermiques à travers la fenêtre et l'énergie provenant du rayonnement solaire absorbé par le vitrage. De plus, l'air étant préchauffé, on réduit le risque de « courant d'air froid » pour les occupants. Nous présentons ici des résultats expérimentaux obtenus en conditions climatiques réelles (température extérieure, flux solaire, vent...). Une fenêtre pariétodynamique ainsi qu'une fenêtre à double vitrage classique ont été instrumentées avec respectivement 57 et 17 thermocouples répartis sur le vitrage, dans les lames d'air ainsi que sur et dans le cadre. Les mesures effectuées mettent en évidence une augmentation significative de la température d'air soufflé en période nocturne pour la fenêtre pariétodynamique. Cette augmentation de température est encore plus importante en présence d'un flux solaire. La circulation d'air tend à réduire la température de la face intérieure du vitrage pariétodynamique, mais le bilan énergétique reste meilleur qu'avec une fenêtre classique. Il a aussi été observé en période nocturne que la température de la face extérieure du vitrage est très proche de la température de l'air extérieur pour la fenêtre pariétodynamique. Le cadre de celle-ci bénéficie aussi de l'effet pariétodynamique surtout en période nocturne mais dans une moindre mesure que le vitrage.

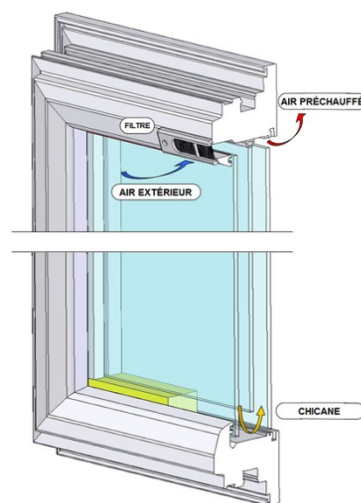


Figure 1 : Coupe d'une fenêtre pariétodynamique.

1. Introduction

En France, le secteur du bâtiment représente le premier consommateur d'énergie (43 % de l'énergie finale totale consommée) et la deuxième source d'émission de CO₂ (25 % des émissions nationales) [1]. Ces problématiques énergétiques et environnementales ont conduit à l'émergence de nouveaux systèmes tels que les fenêtres pariétodynamiques. Ces composants d'enveloppe du bâtiment permettent en effet de valoriser les apports solaires tout en réduisant les déperditions de chaleur par les fenêtres et la ventilation. Celles-ci représentent entre 10 et 15 % des déperditions pour les bâtiments neufs et entre 20 et 25 % pour les bâtiments existants. Cela est particulièrement vrai dans le cas de bâtiments passifs pour lesquels la consommation d'énergie est essentiellement due aux deux postes de déperdition précédemment cités [2].

Un certain nombre d'études scientifiques ont été réalisées sur des fenêtres pariétodynamiques et ont mis en évidence les avantages de ce type de fenêtres [3-11]. On distingue généralement six modes de fonctionnement, en ventilation naturelle ou forcée. Ceux-ci sont illustrés par les figures 1a à 1f [11].

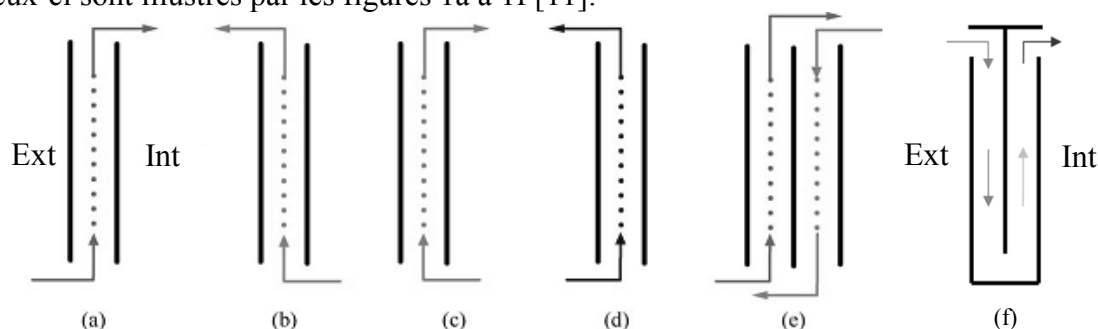


Figure 1 : Les différents modes de fonctionnement des fenêtres pariétodynamiques [11].

Le principe des fenêtres pariétodynamiques est de faire circuler de l'air entre les vitrages où l'énergie solaire est piégée (effet de serre) puis restituée à l'ambiance intérieure d'une habitation ou à l'environnement extérieur en fonction du mode de fonctionnement désiré (chauffage passif en hiver ou rafraîchissement passif en été). La fenêtre considérée dans la présente étude est constituée d'un triple vitrage avec un unique flux d'air comme illustré par la figure 1f. Notons que ce dernier type de fenêtre a déjà fait l'objet d'études numériques et que ces dernières n'ont considéré que le vitrage (sans le cadre) [10,12].

De l'air, provenant de l'extérieur, entre dans la fenêtre à travers une ouverture située dans la partie supérieure de celle-ci, sur sa face extérieure. L'air s'écoule vers le bas entre les deux premiers vitrages, puis entre le deuxième et le troisième vitrage avant de pénétrer dans la pièce à travers une ouverture située dans la partie supérieure de la fenêtre (face intérieure). En fonctionnement hivernal, l'air se réchauffe en récupérant à la fois les déperditions thermiques liées aux vitrages et l'énergie provenant du rayonnement solaire absorbé par les vitrages. De plus, comparativement à une fenêtre équipée d'une bouche d'entrée d'air conventionnelle, l'air ainsi préchauffé réduit le risque de « courant d'air froid » pour les occupants.

Dans cette étude, un dispositif expérimental, présenté dans la première partie, a permis d'étudier le comportement thermo-aéraulique d'une fenêtre pariétodynamique. L'objectif étant d'évaluer les performances de ce type de fenêtre par comparaison à une fenêtre double vitrage classique, des résultats de mesure de température en conditions réelles et pour les deux types de fenêtre simultanément sont ensuite présentés. Une dernière partie compare les deux types de fenêtre en termes de flux de chaleur transmis.

2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué de deux cellules identiques de 6 m² (volume de 15 m³). Ces cellules ont été construites dans un hangar situé 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 (Fig. 2). Les murs, les plafonds ainsi que les portes sont 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 le local technique.

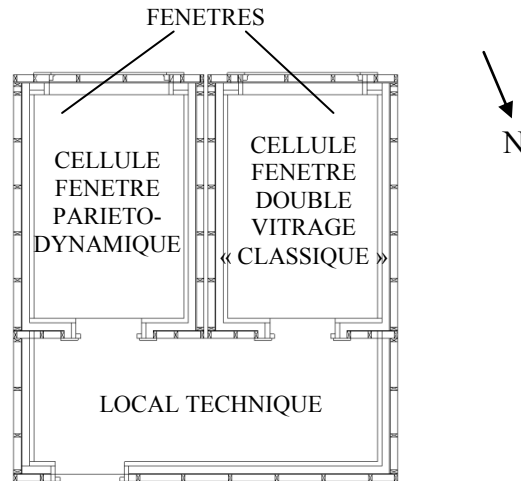


Figure 2 : Schéma des cellules expérimentales.

2.1. Régulation et acquisition

La température de l'air intérieur de chaque cellule a été maintenue à 30°C (minimum) 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 qui est piloté par une centrale d'acquisition-commande Agilent 34980A. Cette centrale d'acquisition 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

La fenêtre pariétodynamique est équipée de 22 thermocouples sur les verres, 10 dans les lames d'air et 5 au soufflage, côté intérieur. La menuiserie (cadre) de la fenêtre est aussi instrumentée avec 19 thermocouples placés au cœur du cadre en bois et sur les faces intérieures et extérieures (Fig. 3a). Afin de limiter les effets du rayonnement solaire sur les thermocouples, ceux-ci sont fins : le diamètre des conducteurs est de 79 μm pour une soudure chaude d'un diamètre de 150 à 200 μm . Les thermocouples sur les faces du vitrage et du cadre sont fixés à l'aide d'une colle conductrice thermiquement et translucide. La fenêtre double vitrage classique (de type 4/16/4 avec traitement faible émissivité et remplissage argon) est munie de 3 thermocouples sur la face extérieure du vitrage et 3 sur la face intérieure. La menuiserie de la fenêtre est aussi instrumentée avec 11 thermocouples dans le cadre et en surface (extérieur et intérieur) (Fig. 3b). Trois thermocouples (diamètre de conducteur de 300 μm) sont placés au centre de chaque cellule à 20, 105 et 180 cm de hauteur. La température de l'air intérieur est obtenue par moyenne des valeurs indiquées par ces thermocouples et est utilisée pour piloter le convecteur de chaque cellule.

Tous les capteurs de température ont été préalablement étalonnés dans un bain thermostaté en utilisant une sonde Pt100 comme sonde de référence ayant une incertitude 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 0 à 90°C .

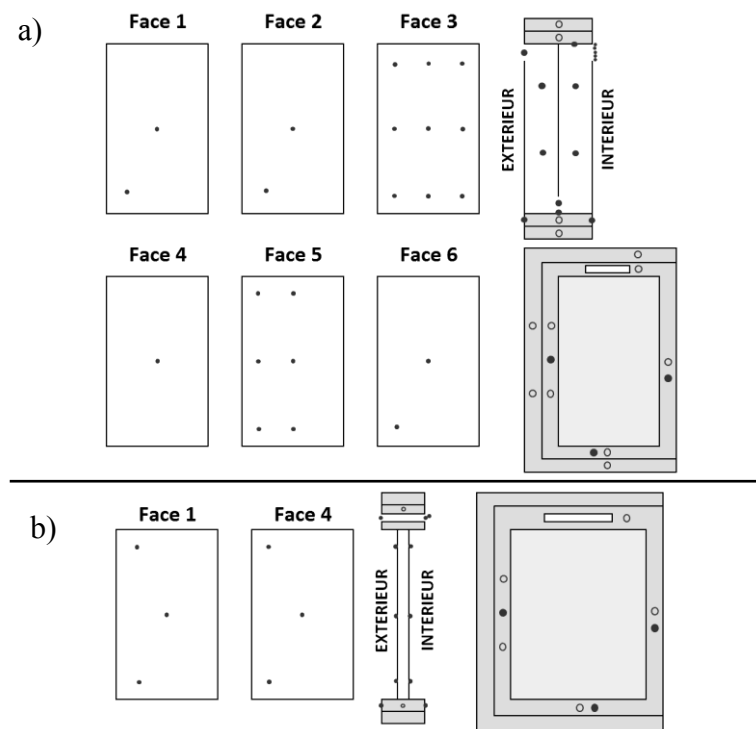


Figure 3 : Positions des thermocouples sur les fenêtres.
a) fenêtre pariétodynamique. b) fenêtre classique.

Le débit d'air extrait de chaque cellule est 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 pouvoir 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. Il a été noté, lors d'un essai à porte soufflante, que les cellules sont peu perméables à l'air. Par conséquent, l'essentiel de l'air neuf passe par la fenêtre pariétodynamique. Pour cette étude le débit traversant cette dernière a été fixé à une valeur constante de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour des vitrages de surface $0,97 \times 0,62 \text{ m}^2$.

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 est traduit sous la forme d'une température radiante moyenne d'environnement (Tenv) dans notre étude. Par ailleurs, une sonde Pt100 ainsi qu'un capteur capacitif mesurent respectivement la température et l'humidité relative de l'air extérieur.

3. Résultats et discussions

L'ensemble des résultats présentés ici ont été obtenus sur une période de 24 heures, correspondant à la journée du 20 novembre 2014. La figure 4 présente les conditions environnementales de cette journée. Afin de mettre en évidence les différences de température

et de flux à travers les deux types de fenêtre, la différence de température entre l'air intérieur (T_{int}) et l'air extérieur (T_{ext}) a été fixée à 30°C . L'écart de température est donc constant tout au long de la journée. On peut remarquer que le flux solaire incident est élevé ($708 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ en moyenne sur la période 14h00-16h00) grâce à une faible nébulosité ce jour. Ceci explique que la température radiante de l'environnement (T_{env}) soit plus faible que celle de l'air extérieur.

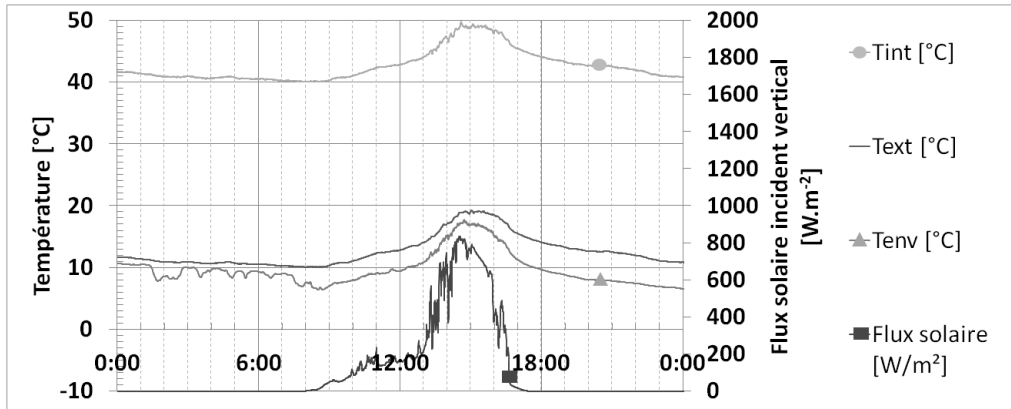


Figure 4 : Conditions environnementales de la journée du 20/11/2014.

La figure 5a présente les mesures de température sur la face 6 (côté intérieur) de la fenêtre pariétodynamique ($T_{face6 \text{ DYN}}$) ainsi que de la fenêtre double vitrage classique ($T_{face4 \text{ CLASS}}$). La température d'air soufflé dans la cellule par la fenêtre pariétodynamique est aussi indiquée (T_{souff}). On peut remarquer que la nuit la température de surface du double vitrage est identique à la température du cadre de la fenêtre classique ($T_{cadre \text{ int CLASS}}$). Ceci s'explique par les valeurs proches de coefficient de transmission thermique ($U_g = 1,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ et $U_f = 1,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). A l'inverse, en période ensoleillée la température du cadre est inférieure à celle du vitrage du fait du faible coefficient d'absorption solaire du cadre et de l'inertie de celui-ci. Ceci est illustré sur la figure 5a par le décalage du maximum de la courbe $T_{cadre \text{ int CLASS}}$.

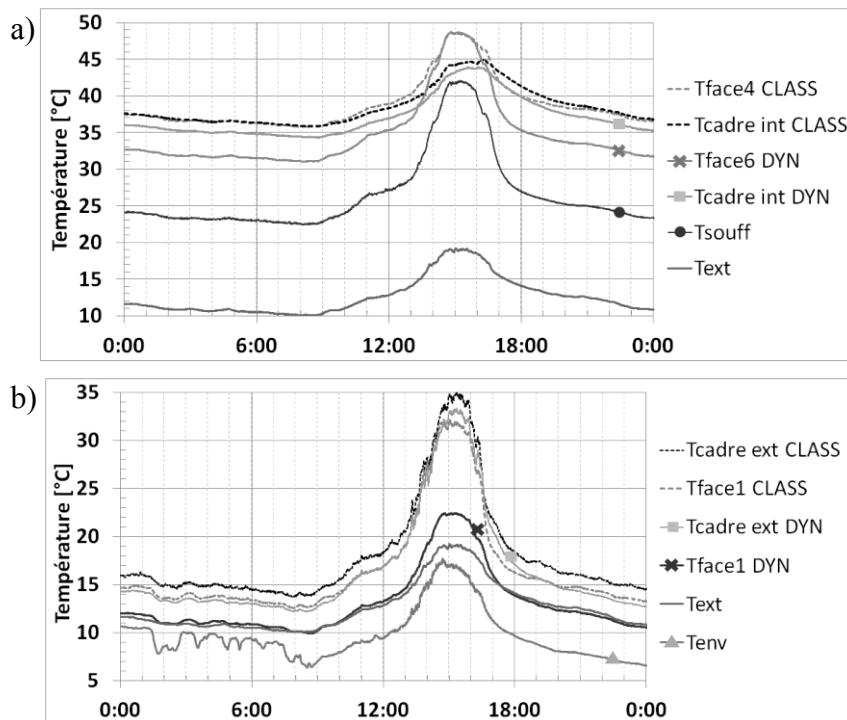


Figure 5 : a) Températures d'air soufflé et de surfaces intérieures des fenêtres (faces 6 et cadres), b) Températures des surfaces extérieures des fenêtres (faces 1 et cadres).

La fenêtre pariétodynamique a un comportement différent : la nuit la température du vitrage est inférieure de 3,3°C par rapport à celle du cadre à cause de la circulation de l'air. Le cadre de la fenêtre pariétodynamique a une température inférieure de 1,5°C par rapport à celle du cadre de la fenêtre classique. Toutefois, les températures de surface intérieure de la fenêtre pariétodynamique restent suffisamment élevées pour limiter le risque de condensation superficielle. La circulation de l'air neuf entre les verres de la fenêtre pariétodynamique permet de le préchauffer de manière significative (+12,4°C la nuit) durant la nuit grâce à la récupération des déperditions. En journée, la récupération du rayonnement solaire absorbé augmente aussi significativement la température de l'air soufflé (+23,0°C au maximum).

La figure 5b est similaire à la figure précédente mais représente les températures des faces extérieures des deux fenêtres (face 1 des vitrages et face extérieure des cadres). La température radiante d'environnement (T_{env}) est aussi tracée. La nuit, la température du vitrage pariétodynamique est très proche de la température de l'air extérieur. Ceci se traduit par une déperdition de chaleur vers l'extérieur minimale. La variation de températures du double vitrage et des deux cadres entre les périodes ensoleillée et non ensoleillée est très importante mais elle est plus faible pour la face 1 du vitrage pariétodynamique. L'air frais circulant dans celui-ci permet de refroidir le premier verre et ainsi diminuer le flux solaire absorbé par le vitrage et réémis vers l'extérieur.

La figure 6 présente les températures moyennes des fenêtres mesurées sur la période nocturne de 2h00 à 7h00. La partie basse du graphique précise les températures mesurées au cœur et en surface des montants latéraux et centraux du cadre des fenêtres. On peut constater que la température de la face extérieure du vitrage pariétodynamique (11,0°C) est très proche de celle de l'air et bien inférieure à celle du double vitrage (13,4°C au centre). La circulation de l'air dans le vitrage pariétodynamique engendre aussi une température de surface intérieure plus faible que celle du double vitrage (31,7°C contre 36,5°C). La conséquence directe est que l'air neuf entrant est préchauffé avec la fenêtre pariétodynamique (23,1°C) alors qu'il entre quasiment à la température de l'air extérieur pour la fenêtre classique (un léger échauffement de l'ordre d'1,5°C est mesuré lors de la traversée du cadre).

Au niveau des cadres, on constate que l'effet pariétodynamique est aussi perceptible. Les traverses basses ont respectivement des températures de surface extérieure de 12,6 et 14,0°C pour les fenêtres pariétodynamique et classique. Du côté intérieur, ces températures sont de 31,6 et 34,9°C. L'effet pariétodynamique est aussi perceptible au niveau des montants mais dans une moindre mesure. Ceci pourrait s'expliquer par un coefficient d'échange convectif interne aux lames d'air plus important entre l'air et la traverse basse du cadre qu'entre l'air et les montants latéraux.

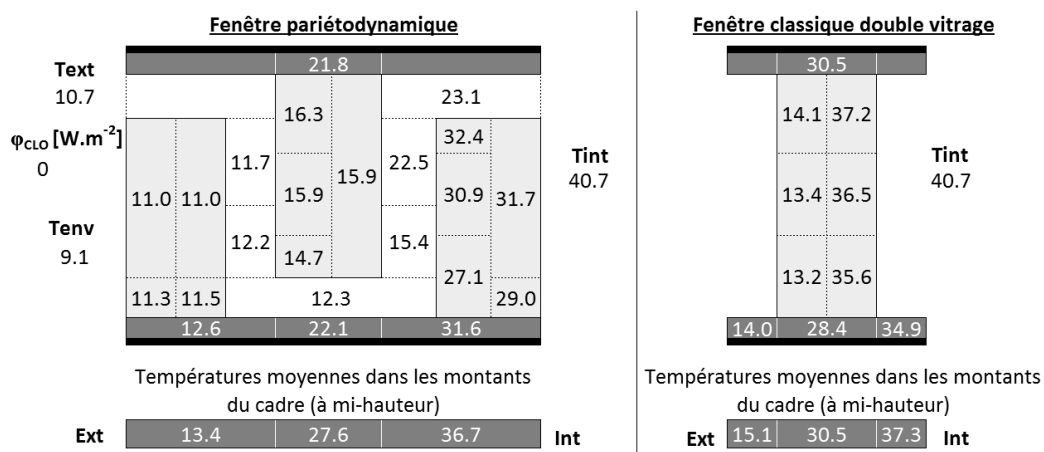


Figure 6 : Températures des fenêtres de nuit (moyennes 2h00 – 7h00).

La figure 7 présente les températures moyennes des fenêtres mesurées sur la période diurne de 14h00 à 16h00. Avec une densité de flux solaire incident de 708 W.m^{-2} , on constate les mêmes phénomènes que pour la période nocturne. Cependant, le verre central et le verre intérieur de la fenêtre pariétodynamique ont une température élevée car ces verres possèdent une couche faible émissivité qui les rend beaucoup plus absorbants ($\alpha_e = 0,19$) que le premier verre extra-clair ($\alpha_e = 0,01$). Par rapport à la fenêtre classique, le facteur solaire de la fenêtre pariétodynamique est accru car la température de surface extérieure de celle-ci est proche de la température d'air extérieur, que ce soit pour le vitrage ou le cadre. Ainsi, l'air neuf est fortement préchauffé : en incluant l'énergie solaire absorbée par l'air entrant, le rendement sur l'air est de 0,73 sur cette période pour un débit de $15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

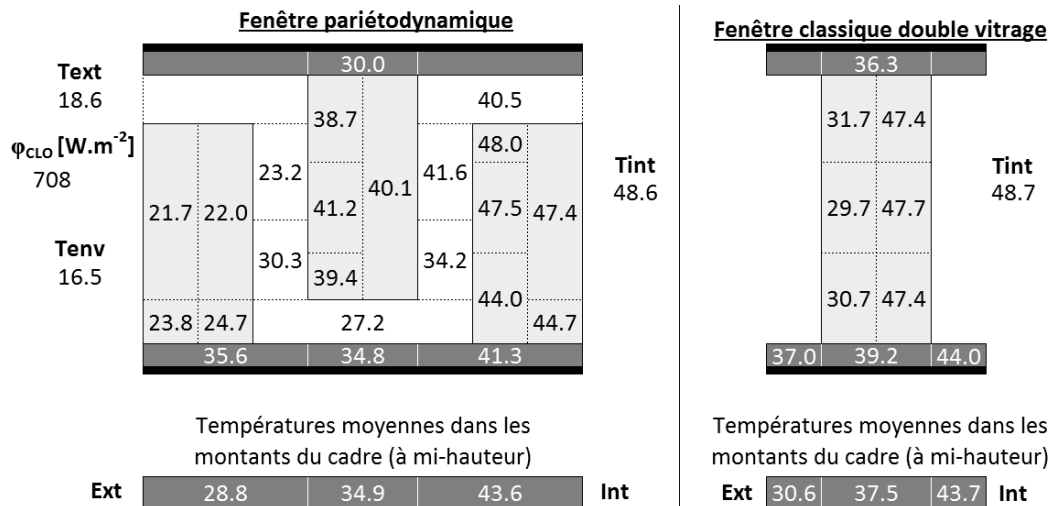


Figure 7 : Températures des fenêtres de jour avec ensoleillement (moyennes 14h00 – 16h00).

La figure 8 permet de visualiser les flux thermiques entrants et sortants des deux fenêtres sur les périodes nocturne et diurne. En période nocturne, on peut noter que si l'on fait le bilan des flux de chaque côté de la fenêtre pariétodynamique il n'y a pas égalité. Des écarts sur les flux peuvent être dus aux incertitudes de mesures de température de surface du côté intérieur où la température de l'air est relativement élevée comparée à celle du vitrage. En période nocturne, les flux côté intérieur sont doublés sur la partie vitrage et augmentés de 44 % sur la partie cadre par rapport à la fenêtre classique dans les mêmes conditions. En contrepartie, les flux vers l'extérieur sont fortement réduits : divisés pratiquement par quatre pour le vitrage et réduits de 33 % au niveau du cadre. La différence entre les flux intérieurs et extérieurs pour la fenêtre pariétodynamique est récupérée par l'air entrant (63,6 W).

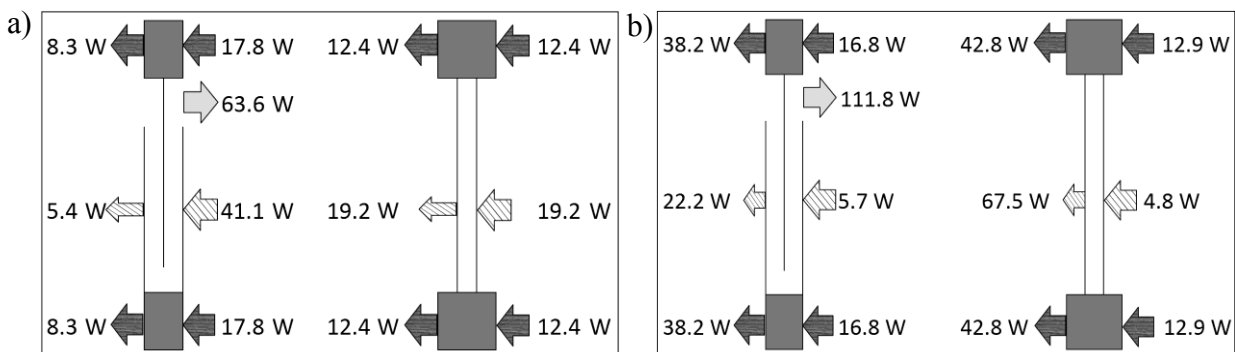


Figure 8 : Flux de chaleur entrant et sortant de la fenêtre pariétodynamique et classique.
a) période nocturne. b) période diurne.

En période diurne on constate les mêmes phénomènes qu'en période nocturne. On peut remarquer que le flux intérieur au niveau des deux vitrages est réduit par rapport à la période

nocturne grâce au réchauffement de la face intérieure de ceux-ci. Enfin, concernant la fenêtre pariétodynamique, le flux extérieur au niveau du cadre est pratiquement identique à la fenêtre classique (-11 %). Ceci s'explique d'une part parce que l'effet pariétodynamique est plus faible pour le cadre que pour le vitrage et d'autre part parce que contrairement au vitrage où l'absorption solaire est volumique et maximale côté intérieur, l'absorption solaire par le cadre se fait uniquement sur la surface extérieure. Ainsi, la chaleur absorbée par le cadre est difficilement transférée vers l'intérieur.

4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons mis en évidence par des mesures expérimentales en conditions réelles les différences de comportement thermique entre une fenêtre pariétodynamique à deux lames d'air et une fenêtre double vitrage classique. Ces différences interviennent essentiellement au niveau des températures de surface intérieure et extérieure des vitrages. Ainsi, les flux entrants et sortants de la fenêtre pariétodynamique sont très différents de ceux de la fenêtre classique grâce à l'air circulant dans la fenêtre qui récupère une partie des déperditions thermiques et des apports solaires. Dans une moindre mesure, le cadre de la fenêtre subit aussi l'effet pariétodynamique. La récupération de chaleur sur le cadre est cependant plus importante en période nocturne qu'en période diurne.

Références

- [1] ADEME, *Energie et climat édition 2010, les chiffres clés* (2010)
- [2] W. Feist, J. Schnieders, Energy efficiency – a key to sustainable housing, *The European Physical Journal - Special Topics*, 176, 1 (2009), 141-153.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] J. Wei, J. Zhao, Q. Chen, Energy performance of a dual airflow window under different climates, *Energy and Buildings*, 42 (2010), 111–122.
- [12] F. Gloriant, P. Tittlein, A. Joulin, S. Lassue, Modeling a triple-glazed supply-air window, *Building and Environment*, 84 (2015), 1-9.