

# Etude numérique des transferts de chaleur dans une fenêtre pariétodynamique.

Rémy GREFFET<sup>1</sup>, Ghislain MICHAUX<sup>1</sup>, Patrick SALAGNAC<sup>1\*</sup>, Jean-Baptiste RIDORET<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement  
Pôle Sciences et Technologie, Av. M. Crépeau - 17042 La Rochelle Cedex 1

<sup>2</sup>SAG Ridoret, 70 rue de Québec - 17041 La Rochelle Cedex 1

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

**Résumé** - La fenêtre pariétodynamique est l'une des technologies permettant de préchauffer l'air entrant dans le bâtiment pour le renouvellement d'air intérieur. Son principe consiste à faire circuler de l'air provenant de l'extérieur entre les différents vitrages composant la fenêtre avant son introduction dans le bâtiment. Ainsi, l'air se réchauffe en récupérant à la fois les déperditions thermiques liées aux vitrages et l'énergie provenant du rayonnement solaire absorbé au sein de ces vitrages. A partir d'un modèle thermo-aéraulique, une étude a été réalisée afin d'évaluer les performances de ce type de fenêtre et ses atouts par rapport à des fenêtres conventionnelles en double et triple vitrages.

## 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 CO<sub>2</sub> (25% des émissions nationales) [1]. Ces problématiques énergétiques et environnementales ont conduit à l'émergence de nouveaux systèmes contribuant à la conception de bâtiments neufs à « énergie positive » et de bâtiments existants faiblement énergivores. A ce titre, les fenêtres pariétodynamiques sont l'une des technologies susceptibles de répondre à ces problématiques.

Les fenêtres et la ventilation contribuent fortement aux déperditions thermiques des bâtiments (de 10 à 15% pour les bâtiments neufs et de 20 à 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 cités précédemment [2].

Une solution pour limiter ces déperditions et pour profiter au maximum des apports solaires peut consister à utiliser les fenêtres pariétodynamiques. Un certain nombre d'études scientifiques ont été réalisées sur des systèmes de fenêtres similaires et ont mis en évidence les avantages de ce type de fenêtres ([3]-[10]). On distingue généralement six modes de fonctionnement des fenêtres pariétodynamiques, opérant en ventilation naturelle ou forcée. Les cinq modes de fonctionnement ayant fait l'objet de la plupart des études [10] sont illustrés par la figure 1.

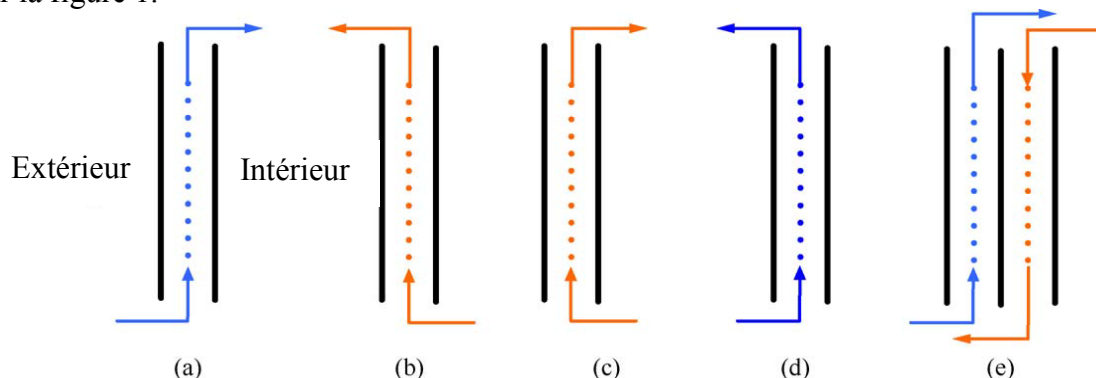


Figure 1 : Les différents modes de fonctionnement des fenêtres pariétodynamiques [10].

Comparées à des fenêtres conventionnelles, le principe de ce type de fenêtre consiste à 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). Il peut être noté que, pour certains types de fenêtre pariétodynamique, l'une ou l'autre des parois vitrées est constituée d'un double vitrage.

Le concept étudié s'apparente à la configuration Figure 1a. La fenêtre, composée d'un triple vitrage, est présentée par la figure 2.

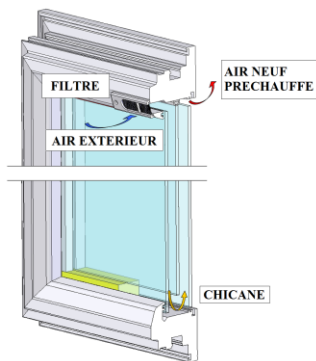


Figure 2 : Principe de la fenêtre étudiée.

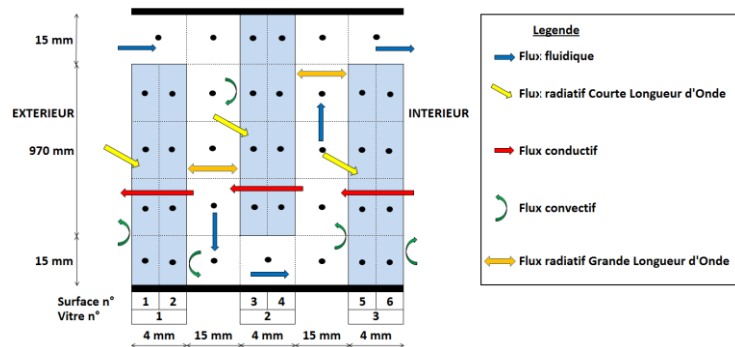


Figure 3 : Transferts thermoaérauliques modélisés au sein de la fenêtre.

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 externe. 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 au sein de ces 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 modèle bidimensionnel de type nodal représentant le comportement thermo-aéraulique d'une fenêtre pariétodynamique est développé dans le but d'évaluer les performances de ce type de fenêtre. Une analyse de sensibilité est ensuite menée, en faisant varier différents paramètres (flux solaire, débit d'air, température de l'air extérieur...), afin d'identifier les paramètres les plus influents. Une dernière partie compare les performances obtenues avec ce type de fenêtre par rapport à des fenêtres conventionnelles en double et triple vitrages.

## 2. Modélisation

Le modèle bidimensionnel développé est présenté par la figure 3. Une approche nodale a été utilisée pour modéliser les transferts de chaleur et de masse au sein de la fenêtre. Dans ce modèle, les transferts de chaleur par les huisseries n'ont pas été pris en compte. Les différents transferts modélisés au sein de la fenêtre sont de nature conductive dans le verre, convective au sein des lames d'air et radiative. Les échanges radiatifs considérés sont d'une part les apports solaires de courtes longueurs d'ondes (CLO) absorbés par les verres et, d'autre part, les échanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes (GLO) entre les surfaces de vitrage ainsi qu'avec les environnements intérieur et extérieur. Les transferts radiatifs ont été linéarisés et les surfaces considérées sont assimilées à des corps gris.

## 2.1. Modèle numérique

La figure 3 présente la discrétisation spatiales de la fenêtre en 37 volumes isothermes. Pour chacun de ces volumes, un bilan thermique a été écrit et a permis d'aboutir au système d'équations différentielles ordinaires suivant :

$$C\dot{\vec{T}} = A\vec{T} + \vec{B} \quad (1)$$

avec C, la matrice des capacités thermiques volumiques ; A, la matrice des conductances thermiques ; B, le vecteur regroupant les sollicitations thermiques et T, le vecteur des températures inconnues. Un schéma implicite a été utilisé pour la résolution temporelle.

## 2.2. Paramètres de simulation

Un cas de référence a été défini afin d'évaluer l'impact de différents paramètres (conditions extérieures...) sur les performances de la fenêtre pariétodynamique. Les données de ce cas de référence sont précisées dans le tableau 1.

Paramètres	Valeur	Unités
Largeur du vitrage	1,00	m
Hauteur du vitrage	1,00	m
Température d'air extérieur	5,0	°C
Température d'air intérieur	20,0	°C
Densité de flux solaire normal	200	W.m <sup>-2</sup>
Coefficient d'échange superficiel extérieur	16,0	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
Coefficient d'échange superficiel intérieur	3,6	W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>
Débit volumique d'air	15,0	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
Emissivité GLO (verre clair)	0,89	-
Emissivité GLO (faces traitées)	0,15	-
Coefficient de transmission CLO (verre 1)	0,91	-
Coefficient de transmission CLO (verres 2 et 3)	0,70	-

Tableau 1 : Paramètres géométriques et physiques du cas de référence.

Tous les autres paramètres géométriques sont définis sur la figure 3. Le premier verre est clair, les deux autres ont subi un traitement de surface les rendant faiblement émissifs dans le domaine des grandes longueurs d'ondes (surfaces 3 et 5). Dans le cas du double vitrage, la face 3 a subi un traitement et dans le cas du triple vitrage, les faces traitées sont les faces 3 et 5. Le gaz de remplissage utilisé est de l'argon.

En ce qui concerne l'environnement extérieur, la température de la voûte céleste est supposée être égale à celle de l'air extérieur, tandis que pour l'environnement intérieur, les températures de parois sont supposées être égales à celle de l'air intérieur. Pour les échanges convectifs internes à la fenêtre pariétodynamique, une étude préliminaire réalisée à partir du logiciel en éléments finis Comsol Multiphysics® a permis d'évaluer les coefficients d'échanges convectifs en fonction du débit d'air pour chaque face du vitrage.

## 3. Résultats et discussions

### 3.1. Etude pour des conditions aux limites stationnaires

La figure 4 présente les différents flux de chaleur entrant et sortant du vitrage. Par convention, les transferts de chaleur du vitrage vers l'environnement (pertes pour la fenêtre) seront comptés négativement, tandis que les apports pour la fenêtre seront comptés positivement.

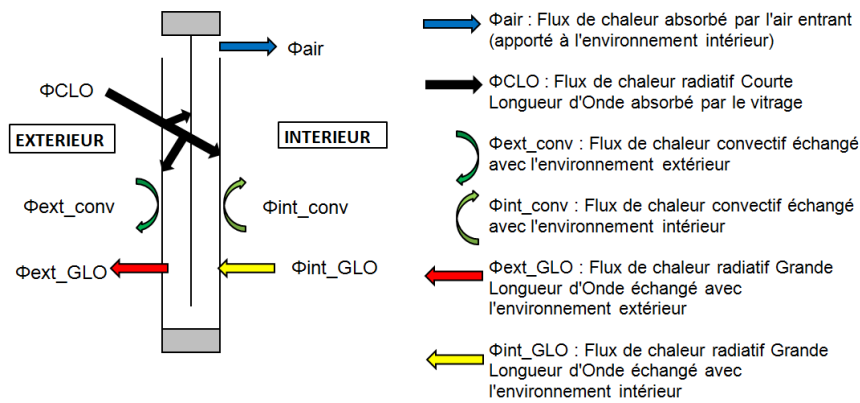


Figure 4 : Flux de chaleur considérés dans le bilan thermique sur la fenêtre.

Une première étude a consisté à évaluer l'impact du rayonnement solaire absorbé par la fenêtre et du débit d'air circulant dans cette fenêtre.

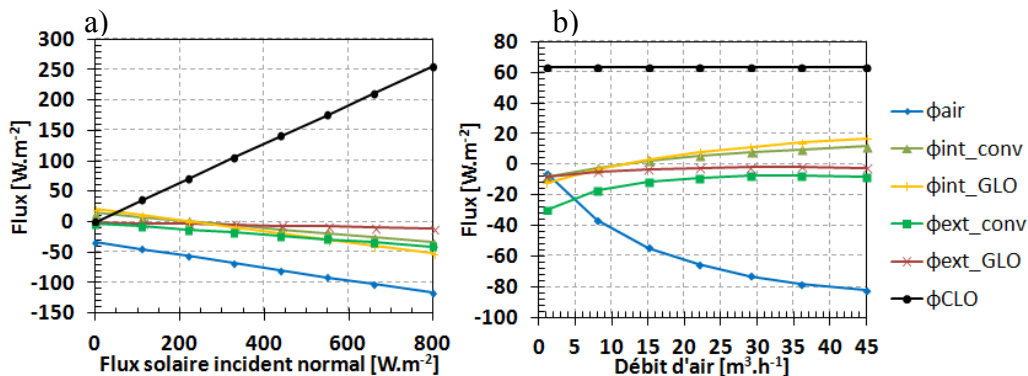


Figure 5 : a) Flux de chaleur en fonction du flux solaire normal incident, b) Flux de chaleur en fonction du débit d'air.

Les figures 5a et 5b montrent respectivement l'évolution des différentes densités de flux en fonction de la densité du flux solaire incident et du débit d'air. On peut noter, sur la figure 5a, que la densité du flux solaire incident a un effet significatif sur la quantité de chaleur ( $\Phi_{air}$ ) apportée par l'air à l'environnement intérieur. On passe ainsi en valeur absolue de  $33 \text{ W.m}^{-2}$  sans ensoleillement à  $116 \text{ W.m}^{-2}$  pour un apport solaire de  $800 \text{ W.m}^{-2}$ . La figure 5b montre l'impact du débit d'air sur les échanges. Comme précédemment, on constate que l'augmentation du débit d'air a un effet important sur la quantité de chaleur véhiculée par l'air, notamment pour des débits inférieurs à  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ . Pour des valeurs de débits plus élevées, on observe un comportement asymptotique. Pour les faibles débits ( $< 5 \text{ m}^3/\text{h}$ ), les déperditions par convection sur la face externe du vitrage sont prépondérantes, mais s'atténuent rapidement lorsque le débit augmente. En ce qui concerne les échanges superficiels interne et externe, on s'aperçoit que l'augmentation du débit intensifie les transferts internes (au-delà de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ) tout en réduisant les transferts externes. En dessous de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , la fenêtre cède de la chaleur à l'environnement intérieur puis au-delà de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , les échanges s'inversent. Ces différentes observations s'expliquent par le refroidissement global du vitrage lorsque l'on augmente le débit d'air (les écarts de température avec l'environnement extérieur diminuent tandis qu'ils augmentent avec l'environnement intérieur).

Les figures 6a et 6b présentent l'impact des conditions extérieures (vitesse et température d'air) sur les densités de flux de chaleur échangés.

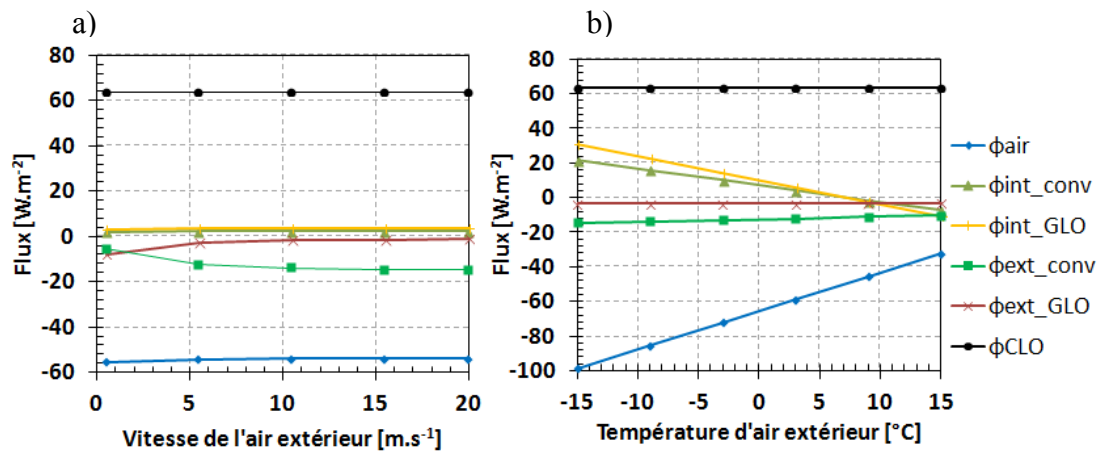


Figure 6 : a) Flux de chaleur en fonction de la vitesse d'air extérieur, b) Flux de chaleur en fonction de la température d'air extérieur.

A partir de 5 m/s, on observe que la vitesse de l'air extérieur n'a plus aucun effet sur les échanges (figure 6a).

L'effet de la température extérieure est présenté sur la figure 6b. Lorsque la température extérieure augmente, le flux de chaleur véhiculé par l'air entrant diminue (en valeur absolue).

### 3.2. Etude pour des conditions aux limites dynamiques

Une étude spécifique a été réalisée afin d'évaluer les performances thermoaérauliques d'une fenêtre pariétodynamique pour une journée d'hiver type et pour un climat océanique (La Rochelle). Sur la figure 7, sont présentées les conditions météorologiques de la journée considérée (température extérieure, vitesse du vent et flux solaire global incident pour une surface orientée plein sud).

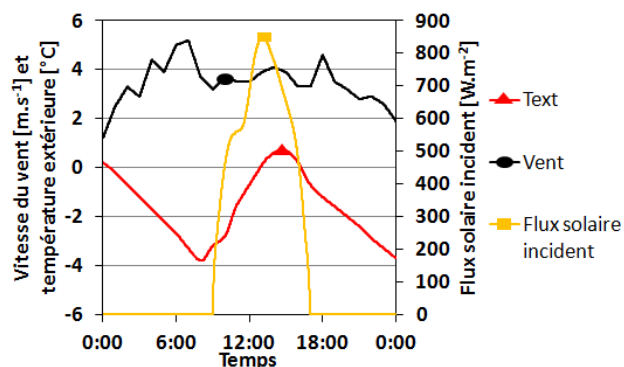


Figure 7 : Conditions météorologiques de la journée d'hiver considérée.

Les figures 8a et 8b présentent les flux échangés au sein de la fenêtre pariétodynamique, exposée plein sud.

Au cours de la période non ensoleillée (17h - 9h), nous pouvons constater que la fenêtre cède de la chaleur à l'air circulant entre les vitrages (figure 8a). En effet, pendant cette période, l'air récupère une partie de l'énergie qui normalement est perdue par la fenêtre du fait de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (environ  $50 \text{ W.m}^{-2}$ ). Les déperditions thermiques par le vitrage sont ainsi limitées.

Au cours de la période ensoleillée (9h - 17h), l'air circulant entre les verres récupère d'une part les pertes thermiques liées à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur et d'autre part, une partie du flux solaire absorbé par les verres. Le flux maximum récupéré

( $130 \text{ W.m}^{-2}$ ) est atteint à 14h, représentant 2,6 fois la puissance récupérée en période non ensoleillée.

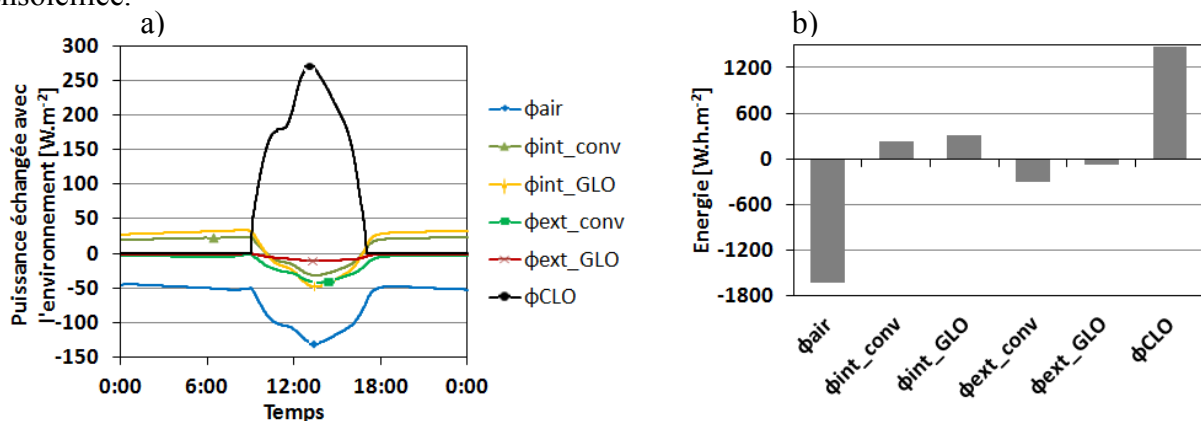


Figure 8 : a) Flux de chaleur échangés avec l'environnement pour la journée type d'hiver, b) Gain et pertes d'énergie de la fenêtre pour la journée type d'hiver.

Sur la figure 8b, on peut constater que sur la journée l'énergie fournie à l'air entrant, et donc à l'environnement intérieur, est du même ordre de grandeur que l'énergie solaire CLO absorbée par les vitrages. De plus, il apparaît clairement que ces deux modes de transfert sont prépondérants : les valeurs d'énergie échangée par les autres modes de transfert sont beaucoup plus faibles.

Il peut aussi être noté que bien que le traitement des surfaces 2 et 3 (à faible émissivité) réduise la transparence de la fenêtre, il permet en contrepartie d'accroître la quantité de chaleur absorbée par le vitrage et donc de potentiellement augmenter le flux de chaleur véhiculé par l'air entrant.

Par la suite, une étude comparative des performances de la fenêtre pariétodynamique et de fenêtres conventionnelles en double et triple vitrages a été réalisée. La figure 9a présente l'évolution au cours de la journée type d'hiver de la densité de flux de chaleur entrant dans la pièce pour les trois types de fenêtre (VD : pariétodynamique ; DV : double vitrage ; TV : triple vitrage). Les valeurs positives correspondent à des gains pour l'environnement intérieur et les valeurs négatives aux déperditions thermiques vers l'environnement extérieur. Pour les fenêtres DV et TV, les entrées d'air ayant le même débit que la fenêtre VD sont prises en compte. Au cours de la période non ensoleillée (17h - 9h), les performances des trois fenêtres sont relativement proches, avec néanmoins un léger avantage pour la fenêtre pariétodynamique (déperditions thermiques plus faibles). Durant la période ensoleillée, la fenêtre en double vitrage est sensiblement plus performante que la fenêtre pariétodynamique. Constituée de 2 vitrages, la fenêtre DV laisse en effet passer plus de rayonnement solaire que les fenêtres VD et TV qui sont elles constituées de 3 vitrages. L'écart de performance observé entre ces deux dernières s'explique par le préchauffage de l'air à travers les vitrages de la fenêtre VD qui lui confère un avantage assez net par rapport à la fenêtre TV.

La figure 9b présente l'évolution au cours de la journée type d'hiver des températures superficielles internes pour les trois types de fenêtre considérés. Y sont aussi représentées la température de l'air préchauffé sortant de la fenêtre pariétodynamique ( $T_{\text{souff}}$ ) et la température de l'air extérieur ( $T_{\text{ext}}$ ).

Pour la fenêtre pariétodynamique VD, la température superficielle interne reste au-dessus de  $13,3^{\circ}\text{C}$ , valeur atteinte juste avant le lever du soleil, ce qui permet de limiter les risques de condensation. A ce même moment, les températures des double et triple vitrages sont respectivement de  $16,2^{\circ}\text{C}$  et  $17,9^{\circ}\text{C}$ .

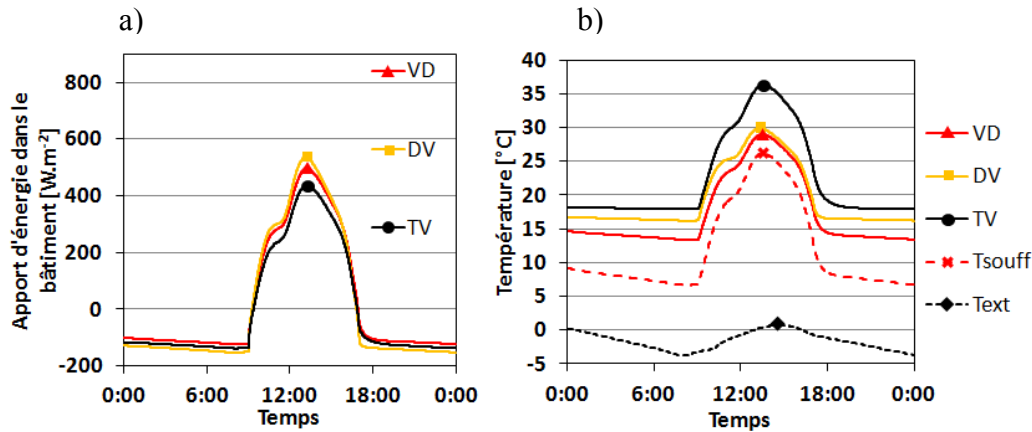


Figure 9 : a) Densités de flux entrants dans la pièce, ventilation incluse, b) Températures des surfaces intérieures des vitrages et de l'air sortant de la fenêtre VD.

En ce qui concerne maintenant la température de l'air entrant dans la pièce, elle varie entre -4 et 1°C au cours de la journée pour les fenêtres conventionnelles DV et TV (égale à la température extérieure). Par contre, dans le cas de la fenêtre pariétodynamique, l'air entrant dans la pièce ne descend pas en dessous de 7°C et peut atteindre 26°C en milieu de journée, alors que la température de l'air extérieur Text est au maximum de 1°C.

Les bilans énergétiques sur la journée type d'hiver et pour les trois types de fenêtre considérés sont présentés par la figure 10. Les valeurs positives correspondent à des gains pour l'environnement intérieur et les valeurs négatives aux déperditions thermiques vers l'environnement extérieur. Les bilans énergétiques sont effectués sur deux périodes : la période ensoleillée (appelée « jour ») et la période non ensoleillée (appelée « nuit »). Ces résultats mettent évidence un comportement différent de la fenêtre pariétodynamique VD par rapport aux fenêtres conventionnelles en double DV et triple TV vitrages. En effet, la fenêtre pariétodynamique présente un bilan nul en terme de besoins de chauffage de l'air entrant ( $\Phi_{h\_air}$ ) le jour et des besoins limités la nuit (987 W.h), comparativement aux fenêtres DV et TV.

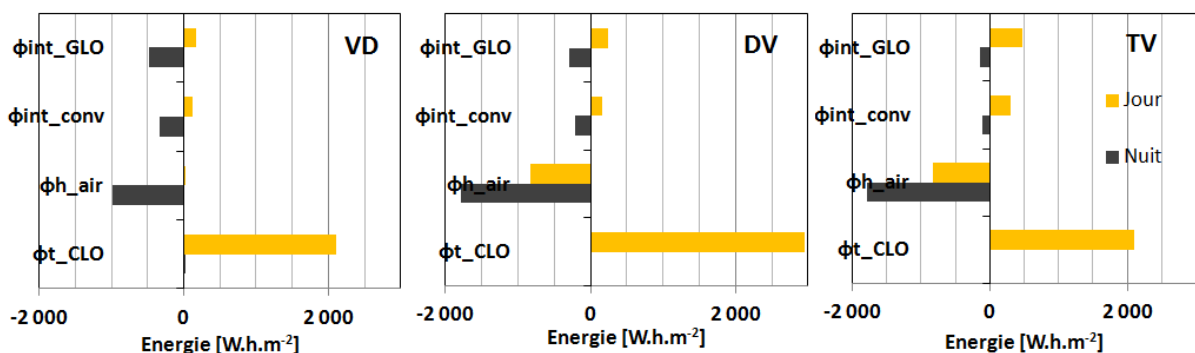


Figure 10 : Energies échangées durant une journée d'hiver (jour et nuit).

En ce qui concerne les apports solaires  $\Phi_{t\_CLO}$ , nous retrouvons que les gains le jour sont plus élevés pour la fenêtre DV, puisqu'elle compte une vitre de moins que les fenêtres VD et TV. Pour ces dernières, les valeurs de ces apports solaires sont très proches.

Les apports et pertes d'énergie consécutifs aux autres modes de transferts de chaleur (convection et rayonnement GLO) ne varient pas de manière très significative d'un type de fenêtre à un autre. De jour, les apports sont très proches entre les fenêtres VD et DV. Par contre, de nuit, la fenêtre pariétodynamique étant refroidie par l'air entrant, les déperditions

par convection et rayonnement GLO sont deux fois plus élevées qu'avec la fenêtre DV. Pour ces deux modes de transfert de chaleur, la fenêtre TV est la plus performante (gains plus élevés le jour et déperditions réduites la nuit).

D'un point de vue plus global, la fenêtre fournissant le plus d'énergie à l'environnement intérieur est la fenêtre pariétodynamique, suivie de la fenêtre DV et la TV, avec respectivement 593, 251 et 16 W.h d'énergie fournie.

Finalement, il peut être noté que l'exposition considérée dans cette étude, plein sud, est favorable aux double et triple vitrages puisque les gains qu'ils apportent à l'environnement intérieur résident essentiellement dans le rayonnement solaire direct.

## 4. Conclusion

La fenêtre de type pariétodynamique permet de récupérer une partie de l'énergie perdue par les fenêtres conventionnelles et de préchauffer l'air hygiénique lors du passage de celui-ci entre les vitrages. Le débit d'air, la température extérieure et le flux solaire incident jouent un rôle important dans les échanges de chaleur entre le vitrage et l'environnement alors que la vitesse de l'air extérieur a peu d'influence. Du point de vue de la pièce, l'air préchauffé représente un gain de chaleur plus élevé que les pertes par vitrage lors d'une journée d'hiver ensoleillée mais froide. La perte de confort lié à l'effet « partiel » de paroi froide est compensée par le préchauffage de l'air l'extérieur. A terme, ce modèle sera intégré dans un code de simulation thermique dynamique de bâtiment afin d'estimer les gains liés aux performances de ces fenêtres en termes de confort thermique et de consommations énergétiques.

## 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] 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.