

# Etude numérique des performances thermiques d'une maison individuelle équipée de fenêtres pariétodynamiques

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

<sup>1</sup> LaSIE (UMR CNRS 7356), Université de La Rochelle, Av. Crépeau, 17042 La Rochelle, Cedex 1

<sup>2</sup> Groupe Ridoret, ZI Chef de Baie, 70 rue de Québec, 17000 La Rochelle

\* (auteur correspondant : [ghislain.michaux@univ-lr.fr](mailto:ghislain.michaux@univ-lr.fr))

**Résumé** - Nous présentons les principaux résultats d'une étude numérique des performances d'une maison individuelle équipée de fenêtres pariétodynamiques pour différentes conditions (climats, orientations, types de ventilation, qualités d'isolation et d'étanchéité à l'air). Les résultats montrent notamment que les besoins de chauffage d'une maison performante sont réduits de 28 à 46 % en comparaison à des fenêtres à double vitrages classiques. En été, et tant que la température intérieure est inférieure à celle de l'extérieur, la fenêtre pariétodynamique améliore aussi les performances de l'enveloppe.

## 1. Introduction

Dans le secteur du bâtiment, les parois vitrées et le renouvellement d'air représentent aujourd'hui deux points faibles majeurs en termes de performances énergétiques des bâtiments, et cela est particulièrement vrai pour les bâtiments passifs (pertes de l'ordre de 60 % par les parois vitrées et de 20 % par la ventilation [1]).

La fenêtre pariétodynamique est l'une des technologies susceptibles d'apporter des réponses à cette problématique. En effet, cette fenêtre « ventilée » permet de réduire simultanément les déperditions de chaleur imputables aux parois vitrées et au renouvellement d'air en hiver, ainsi que les gains en été. La fenêtre pariétodynamique présente aussi l'avantage d'être adaptée à la réhabilitation et de contribuer aux confort lumineux et acoustique, ainsi qu'à la qualité de l'air intérieur.

Des études ont démontré les avantages de ce type de fenêtre, notamment en termes de performances thermiques [2-10]. La fenêtre pariétodynamique considérée ici, dont nous avons caractérisé les performances thermiques expérimentalement et numériquement préalablement à la présente étude [11-14], est présentée par la Figure 1. Son principe de fonctionnement est de faire circuler l'air neuf extérieur, nécessaire au renouvellement d'air sanitaire, entre les verres du vitrage de la fenêtre avant son introduction dans le bâtiment. L'air entrant est ainsi préchauffé en récupérant à la fois une part des déperditions de chaleur à travers le vitrage de la fenêtre ainsi qu'une part de l'énergie provenant du rayonnement solaire absorbé par ce vitrage. De plus, l'air ainsi préchauffé permet de réduire l'effet de « courant d'air froid » pour les occupants.

Un modèle bidimensionnel de type nodal, représentant le comportement thermique et aérodynamique de la fenêtre pariétodynamique, a été conçu puis intégré au code de simulation thermique dynamique du bâtiment TRNSYS©. L'objectif du modèle numérique complet ainsi développé est d'estimer les gains liés aux performances de la fenêtre pariétodynamique en termes de confort thermique et de consommations énergétiques, par comparaison à des fenêtres classiques, et ce pour différents types de bâtiment, d'usages et de climat. Nous

présentons ici les derniers résultats numériques obtenus pour une maison individuelle en considérant quatre types de climat (La Rochelle, Trappes, Metz et Marseille), différentes orientations, types de ventilation (Ventilations Mécaniques Contrôlées simple flux et double flux), ainsi que différentes qualités d'isolation et d'étanchéité à l'air de l'enveloppe. Le principal enseignement de cette étude est que, en hiver, les fenêtres pariétodynamiques permettent de réduire les besoins de chauffage de 28 à 46 % pour une maison performante en comparaison à des fenêtres à double vitrages classiques.

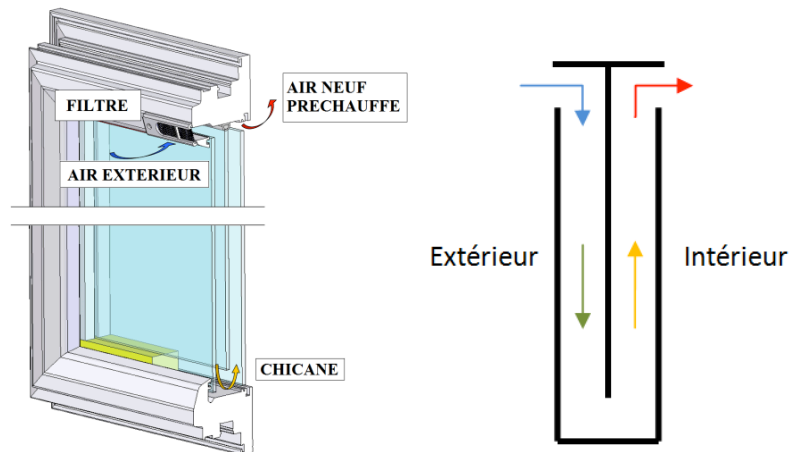


Figure 1 : Coupe de la fenêtre pariétodynamique considérée et principe de fonctionnement

## 2. Modélisation et couplage au code de simulation thermique TRNSYS

### 2.1. Modélisation de la fenêtre pariétodynamique

Un modèle bidimensionnel de type nodal représentant le comportement thermo-aéraulique d'une fenêtre pariétodynamique a été préalablement développé sous Matlab© [11], puis validé expérimentalement [12].

### 2.2. Modélisation du bâtiment

Le bâtiment considéré est la maison dont l'enveloppe est en béton plein (Isolation Thermique par l'Intérieur), avec couverture en tuiles, présente sur la plateforme expérimentale INCAS de l'INES (Bourget-Du-Lac) [15]. La maison, dont les plans sont présentés par la Figure 2, a été modélisée à l'aide du code de Simulation Thermique Dynamique (STD) TRNSYS©. L'enveloppe du bâtiment est fortement isolée thermiquement, les résistances thermiques des murs, du toit et du plancher étant respectivement de 3,3, 8,0 et 1,7  $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ , et bénéficie d'une étanchéité à l'air élevée ( $Q_{4\text{Pa\_surf}} = 0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ).

La maison est considérée occupée toute l'année et le chauffage fonctionne du 1<sup>er</sup> octobre au 20 mai. La consigne de chauffage est de 20°C en journée avec un ralenti nocturne à 16°C. La climatisation fonctionne durant la période où le chauffage est arrêté et les consignes sont de 26°C en journée et 28°C la nuit. Par ailleurs, afin de limiter les surchauffes estivales, les volets roulants des parois vitrées sont fermés de moitié durant les mois de juillet et août lorsque le vitrage est soumis au rayonnement solaire direct.

Deux cas de simulations ont été définis. Un premier cas, pris comme référence, pour lequel toutes les menuiseries sont composées d'un double vitrage classique (4/16/4 FE argon). Pour le deuxième cas, les menuiseries des pièces principales munies d'entrées d'air (portes-fenêtres) sont remplacées par des vantaux pariétodynamiques (4/15/4/15/4 FE), repérés en rouge sur la

Figure 2. Sur cette figure sont aussi représentés les transferts aérauliques entre zones et les valeurs de débits indiquées correspondent au cas d'une Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) de type auto-réglable pour laquelle les débits d'air neuf sont définis selon l'arrêté de 1982. Dans ce cas, le débit total d'air extrait est de  $180 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  en occupation (de 9 h à 17 h en semaine et tout le week-end) et de  $90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  en période d'inoccupation (le reste du temps). Il est à noter que ce système de ventilation ainsi qu'une VMC simple flux hygro-réglable de type B ont été testés (voir Section 3.4), mais que nous considérons par défaut que le bâtiment est équipé d'une VMC simple flux hygro-réglable de type A. Les débits d'air des systèmes de VMC hygro-réglables sont définis par leurs avis techniques respectifs.

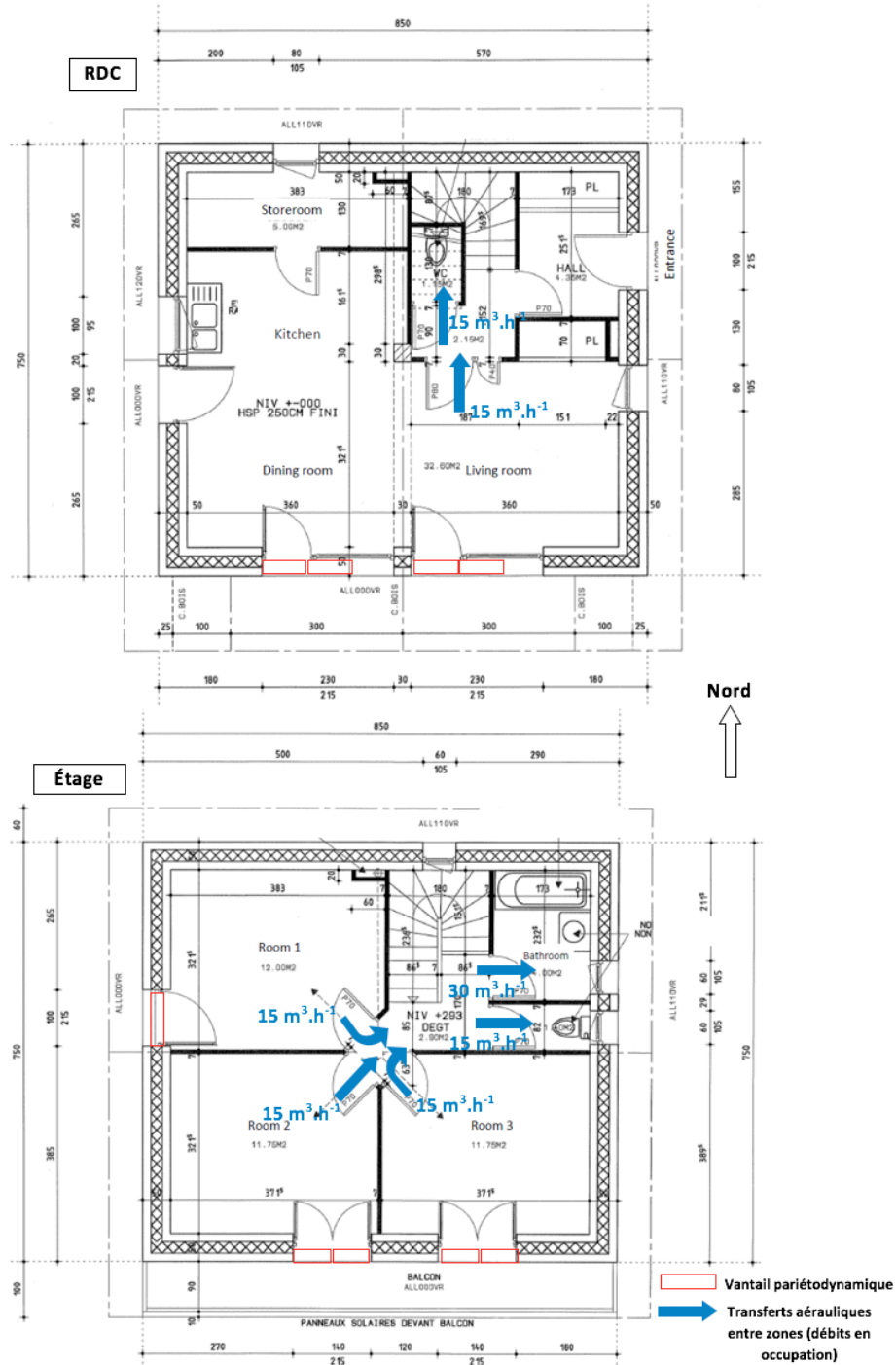


Figure 2 : Plans du bâtiment, transferts aérauliques et localisation des vantaux pariétodynamiques

### 2.3. Couplage thermo-aéraulique de la fenêtre pariétodynamique

Le couplage thermo-aéraulique a été réalisé par l'intermédiaire d'un module de TRNSYS qui pilote le logiciel Matlab. Le Tableau 1 précise les entrées et sorties du modèle numérique de la fenêtre pariétodynamique qui ont été couplées au modèle de bâtiment.

| Variable d'entrée                    | Variable de sortie                              |
|--------------------------------------|---|
| Température air extérieur            | Température de la face intérieure de la fenêtre |
| Température radiative extérieure     | Température de l'air soufflé                    |
| Température d'air intérieur          | Humidité relative de l'air soufflé              |
| Température radiative intérieure     | Flux CLO directement transmis                   |
| Densité de flux CLO incident         |   |
| Vitesse du vent                      |   |
| Azimut du soleil                     |   |
| Élévation du soleil                  |   |
| Orientation de la fenêtre            |   |
| Humidité relative de l'air extérieur |   |
| Débit traversant l'ouvrant           |   |

Tableau 1 : Entrées et sorties du modèle numérique de la fenêtre couplées au code de STD

Afin d'intégrer les fenêtres pariétodynamiques au modèle du bâtiment, celles-ci ont été assimilées à des parois à température imposée, intégrées aux murs extérieurs. Cette température imposée est celle donnée par la première variable de sortie du modèle (Tableau 1). Pour prendre en compte le préchauffage de l'air entrant, nous définissons la température et l'humidité relative de l'air neuf des zones concernées par les deuxième et troisième variables de sortie. Enfin, nous répartissons le flux solaire CLO directement transmis (quatrième variable de sortie) de façon à ce qu'il soit absorbé en parts égales entre le sol et les murs faisant face aux fenêtres.

Les simulations ont été effectuées avec un pas de calcul d'une heure. Les résultats sont présentés sur une année complète, mais les simulations ont été exécutées en commençant deux mois avant le début de l'année de façon à s'assurer que le bâtiment soit en régime établi dès le 1<sup>er</sup> janvier.

## 3. Etude des performances de la fenêtre intégrée au bâtiment

Nous présentons ici des premiers résultats de simulations, en termes de besoins de chauffage et de climatisation, obtenus pour le bâtiment équipé de fenêtres pariétodynamiques (FD) et pour différentes conditions tels que le climat et l'orientation de ces fenêtres. Les résultats sont systématiquement comparés à ceux obtenus dans le cas de référence (menuiseries composées d'un double vitrage classique, DV).

### 3.1. Besoins de chauffage et de climatisation pour différents climats

La Figure 3 montre que, quelle que soit la ville considérée, et donc le climat, la fenêtre pariétodynamique permet de réduire de manière significative les besoins de chauffage, en particulier pour les climats tempérés (Marseille et La Rochelle). Pour les climats continentaux plus rigoureux (Metz et Trappes), le gain demeure néanmoins de l'ordre de 30 %. Ceci s'explique par le fait que, dans ce cas, le préchauffage assuré par la fenêtre pariétodynamique est principalement dû à la récupération des déperditions thermiques et moins à celle des apports solaires absorbés par les vitrages. Par contre, on note que les besoins de climatisation

sont augmentés lors de l'utilisation des fenêtres pariétodynamiques. En effet, en période estivale et lorsque l'air extérieur est relativement frais (typiquement la nuit), celles-ci préchauffent l'air entrant en récupérant une part des déperditions thermiques provenant de l'intérieur du bâtiment (air plus chaud dans ce cas). La solution envisagée afin de répondre à cette problématique serait de court-circuiter la fenêtre afin de faire entrer directement l'air comme dans le cas de référence (menuiseries équipées d'entrées d'air classiques). Enfin, il peut être noté un gain sur les besoins de climatisation à Marseille. En effet, pour ce climat, l'amplitude de température jour/nuit est moins marquée et, par conséquent, la fenêtre pariétodynamique préchauffe moins l'air entrant (température extérieure plus élevée).

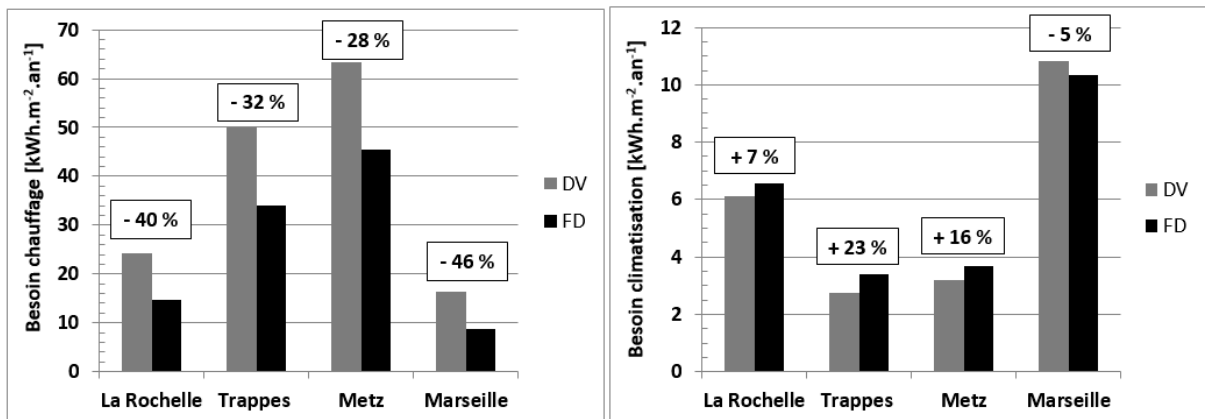


Figure 3 : Besoins annuels de chauffage et de climatisation pour les cas de référence (DV) et avec fenêtre pariétodynamique (FD) et pour différents climats

### 3.2. Effet de l'orientation des parois vitrées

Par défaut, la majorité des vitrages pariétodynamiques sont orientés au Sud (Figure 2). La Figure 4 montre que, pour un climat donné (La Rochelle), l'orientation a aussi un effet significatif sur les besoins de chauffage qui sont réduits de 21 % (exposition Nord) à 40 % (exposition Sud). Cette différence s'explique par le fait qu'au Sud, outre la récupération sur les déperditions thermiques, la fenêtre pariétodynamique valorise aussi les apports solaires (récupération d'une part de la chaleur absorbée par les vitrages).

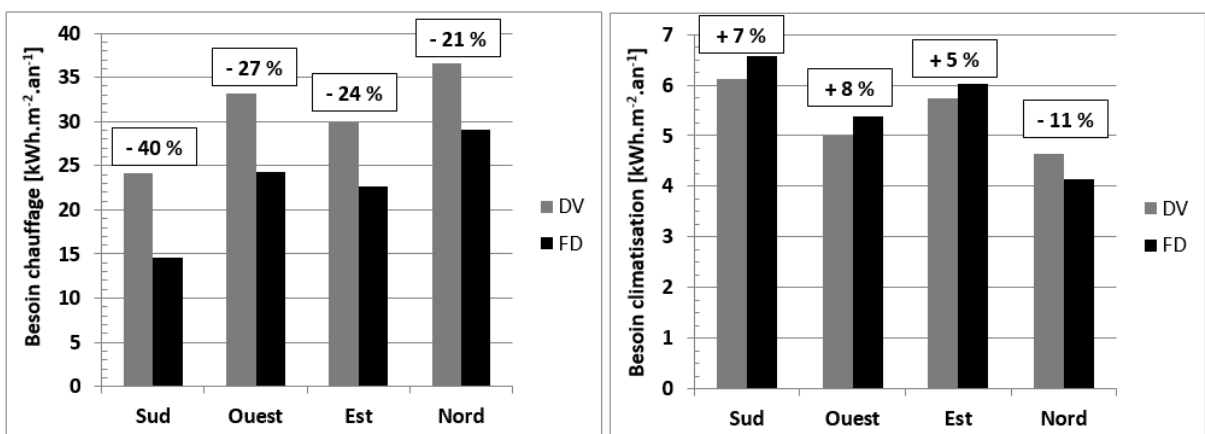


Figure 4 : Besoins annuels de chauffage et de climatisation pour les cas de référence (DV) et avec fenêtre pariétodynamique (FD) et pour différentes orientations des parois vitrées

Comme précédemment, on observe aussi que les besoins de climatisation sont augmentés, excepté lorsque les parois vitrées sont exposées au Nord. Dans ce cas, le préchauffage de l'air

est moindre, dû à l'absence d'apports solaires directs sur les vitrages. Par conséquent, outre la stratégie de court-circuit de la fenêtre pariétodynamique précédemment évoqué, ce dernier résultat met en évidence la nécessité de recourir à des protections solaires efficaces et adaptées.

### 3.3. Effet de la qualité de l'enveloppe

Nous nous intéressons ici à l'effet d'une dégradation de la qualité de l'enveloppe sur les apports de la fenêtre pariétodynamique, toujours par rapport au cas de fenêtres classiques DV. Nous considérons donc, pour un climat donné (La Rochelle) et l'orientation du bâtiment précisée par la Figure 2, trois qualités d'enveloppe : (i) bonne (cas de référence) ; (ii) moyenne (niveau d'isolation réduit de 40 % et coefficient de perméabilité à l'air  $Q_{4Pa\_surf} = 1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ) ; (iii) mauvaise (niveau d'isolation réduit de 80 % et coefficient de perméabilité à l'air  $Q_{4Pa\_surf} = 3,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ). La Figure 5 met en évidence que les bénéfices apportés par la fenêtre pariétodynamique en termes de besoins de chauffage sont d'autant plus élevés que l'est la qualité de l'enveloppe. Ceci s'explique notamment par le fait que plus l'enveloppe est étanche, plus le débit d'air circulant dans la fenêtre sera important et le préchauffage tout autant [14]. Par contre, l'inverse est observé en termes de besoins de climatisation. En effet, plus le bâtiment est isolé et plus la température intérieure sera fréquemment supérieure à celle de l'extérieur en saison estivale, sous l'effet des apports solaires et dû aux faibles débits de fuites associés aux défauts d'étanchéité. Par conséquent, et comme évoqué précédemment, il est nécessaire de recourir à des protections solaires efficaces et adaptées, surtout dans le cas d'un bâtiment bénéficiant d'une enveloppe performante.

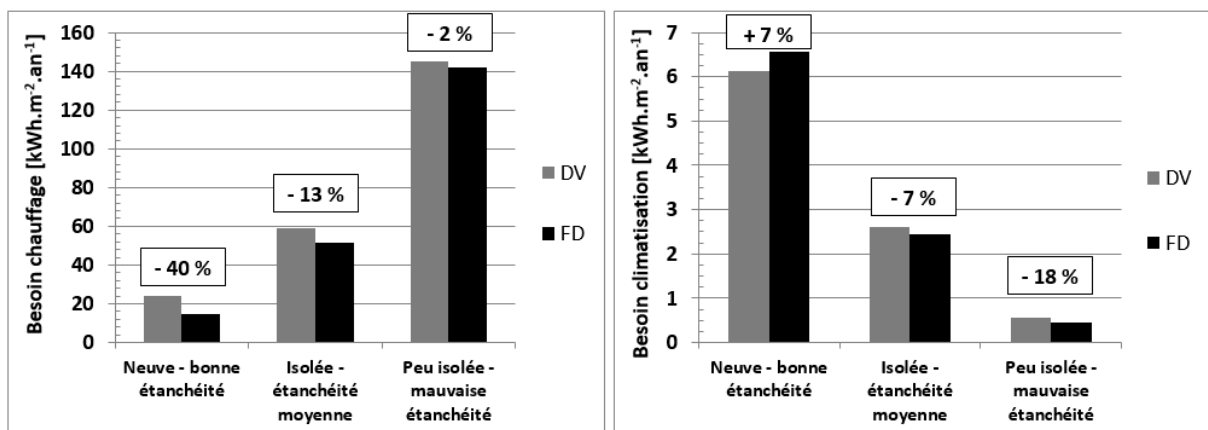


Figure 5 : Besoins annuels de chauffage et de climatisation pour les cas de référence (DV) et avec fenêtre pariétodynamique (FD) et pour différentes qualités d'enveloppe (isolation, étanchéité)

### 3.4. Effet du système de ventilation et comparaison à une VMC double flux

Enfin, l'association fenêtre pariétodynamique / VMC simple flux hygro-réglable de type A (SF hygro A) a été comparée pour un climat donné (La Rochelle), des parois vitrées orientées majoritairement au Sud et une enveloppe performante, à d'autres associations précisées sur la Figure 6. Des simulations ont donc été réalisées, pour les deux types de fenêtre (DV et FD), en considérant des VMC auto-réglables et hygro-réglables de type B (SF auto et hygro B) mais aussi, dans le cas des fenêtres classiques, des VMC double-flux (DF) auto ou hygro-réglables avec des valeurs d'efficacité globale du système de ventilation de 40, 60 et 90 %. La Figure 6 met en évidence que, en auto ou hygro-réglable, l'association fenêtres pariétodynamiques / VMC SF permet de réduire les besoins de chauffage par rapport à l'association fenêtres DV classiques / VMC DF. Ceci est intéressant notamment des points de

vue technique et économique, la première association étant moins coûteuse et plus aisée à mettre en œuvre que la seconde. Par contre, les besoins de climatisation sont plus importants dans les cas avec fenêtre pariétodynamique. En effet, comme vu précédemment, il y a un risque de préchauffage estival aux moments de la journée où il fait plus frais à l'extérieur qu'à l'intérieur du bâtiment ou dû aux apports solaires mal gérés (protections solaires). A noter qu'en été, pour les cas avec VMC DF, l'échangeur est court-circuité afin d'éviter des surconsommations de climatisation, ce qui explique que les besoins de climatisation plafonnent à 5,5 et 6,2 kWh.m<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup> respectivement.

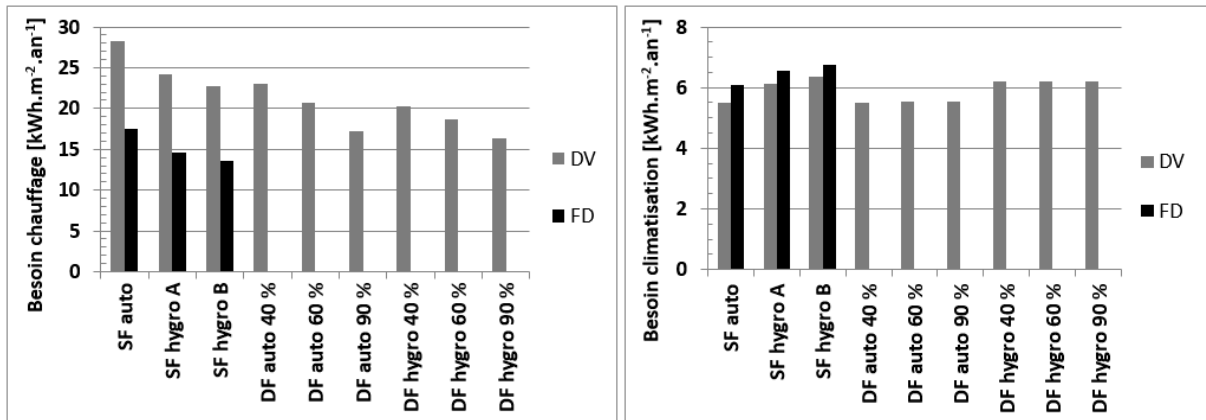


Figure 6 : Besoins annuels de chauffage et de climatisation pour les cas de référence (DV) et avec fenêtre pariétodynamique (FD) et pour différents systèmes de ventilation

#### 4. Conclusion

Afin d'étudier les gains apportés par la fenêtre pariétodynamique au bâtiment, des simulations numériques ont été réalisées en couplant un modèle de fenêtre développé au préalable au code de simulation thermique dynamique TRNSYS©. Celles-ci ont été conduites pour un même bâtiment (maison individuelle) mais pour différents climats, différentes expositions et qualités d'enveloppe, ainsi que pour différents types de système de ventilation.

Les résultats mettent en évidence que, par rapport à une fenêtre classique à double vitrage, l'utilisation de la fenêtre pariétodynamique permet de réduire significativement les besoins de chauffage, surtout pour des climats tempérés (réduction de 46 % à Marseille). Par ailleurs, l'orientation des parois vitrées affecte aussi cette réduction des besoins de chauffage. L'orientation Sud est d'autant plus favorable à la fenêtre pariétodynamique que celle-ci permet de valoriser le rayonnement solaire absorbé par ses vitrages. Il est aussi noté que la réduction des besoins de chauffage est d'autant plus marquée que l'enveloppe du bâtiment est performante en termes d'isolation thermique et d'étanchéité à l'air. Enfin, il a été mis en évidence qu'en ventilation auto ou hygro-réglable, l'association fenêtres pariétodynamiques / VMC simple flux permet de réduire les besoins de chauffage par rapport à l'association fenêtres classiques à double vitrage / VMC double flux.

Par contre, ces premiers résultats de simulations ont confirmé le fait que la fenêtre pariétodynamique peut devenir pénalisante en termes de besoins de climatisation si elle n'est pas correctement protégée des apports solaires en été et si un système de court-circuit aéraulique de la fenêtre n'est pas prévu. Ces observations constituent des perspectives d'améliorations de la fenêtre pariétodynamique, avec une attention particulière qui sera portée à la problématique du confort d'été dans le cas de bâtiments non climatisés. Par ailleurs, il s'agira d'étudier le potentiel d'intégration de cette « fenêtre ventilée » à d'autres types de

locaux (et donc d'autres usages et contraintes), tels que des appartements, des chambres d'hôpitaux et d'hôtels, des bureaux, ou encore des classes d'écoles.

## 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)
- [13] R. Greffet, Etudes expérimentale et numérique des performances énergétiques d'une fenêtre pariétodynamique, *Mémoire de Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle* (2016)
- [14] G. Michaux, R. Greffet, P. Salagnac, J.-B. Ridoret, Etude expérimentale du comportement thermique d'une fenêtre pariétodynamique. Comparaison à celui d'une fenêtre classique à double vitrage, *Congrès de la Société Française de Thermique, Toulouse* (2016)
- [15] C. Spitz, Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments, *Mémoire de Thèse de Doctorat, Université de Grenoble* (2006)