

# Étude expérimentale d'une fenêtre parietodynamique de type Paziaud®

François GLORIAN, Pierre TITTELEIN, Annabelle JOULIN, Stéphane LASSUE

<sup>1</sup>Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (EA-4515), Faculté des Sciences Appliquées - Université d'Artois, Technoparc Futura 62400 Béthune, Université Lille Nord de France, 59000 Lille, France

\*(auteur correspondant : annabelle.joulin@univ-artois.fr)

**Résumé** - Le principe de la fenêtre parietodynamique repose sur la circulation de l'air neuf de ventilation entre des lames de verre avant sa pénétration dans le logement par l'intermédiaire d'une bouche d'entrée d'air située en partie haute de la fenêtre. La fenêtre étudiée dans ce travail est la fenêtre Paziaud® qui est constituée de trois vitrages formant un canal en forme de U dans lequel circule l'air. Dans cette configuration, l'air se réchauffe en récupérant une partie des déperditions thermiques du logement et aussi grâce au rayonnement solaire absorbé par le verre. Ce système fonctionne en général en convection forcée (faible vitesse) en l'associant à un extracteur d'air situé dans le logement. Un dispositif est mis en place pour évaluer expérimentalement les performances thermiques de la fenêtre Paziaud®. Cette étude doit également permettre de confronter les résultats numériques obtenus au préalable aux résultats expérimentaux. Le prototype de fenêtre Paziaud® étudié est placé entre deux cellules climatiques contrôlées. Le volume de chacune des cellules est d'environ 12 m<sup>3</sup>. La cellule chaude est munie de deux radiateurs et la cellule froide d'un climatiseur. La température opérative de chacune des cellules est mesurée au moyen d'une sonde de température sphérique (ou boule noire) disposée au centre de chacune des cellules. Les résultats de cette étude expérimentale confirment le choix des hypothèses sur lesquelles repose le modèle numérique. La fenêtre parietodynamique peut être correctement modélisée en considérant une géométrie bidimensionnelle et un écoulement laminaire.

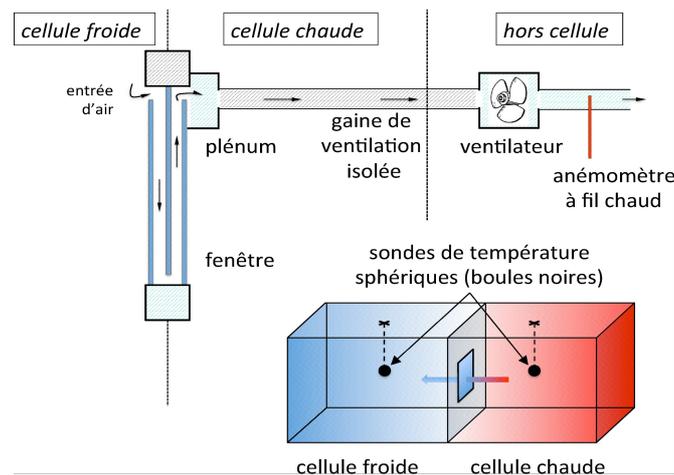


Figure 1 : Présentation générale du dispositif expérimental

## 1. Introduction

Le principe d'une fenêtre pariéto-dynamique (aussi appelée fenêtre ventilée) est de faire circuler l'air de renouvellement entre ses vitrages avant d'entrer dans un bâtiment en récupérant ainsi le flux de chaleur des déperditions thermiques. Un article récent [1] offre une étude complète (revue bibliographique, simulations numériques et travail expérimental) sur le fonctionnement type d'une fenêtre ventilée. La fenêtre étudiée ici est de type Paziaud<sup>®</sup>. Il s'agit d'une fenêtre à 3 vitrages qui a fait l'objet de plusieurs communications concernant en particulier la modélisation des échanges au sein de ses lames d'air [2], [3]. L'objectif de cet article est de présenter les résultats expérimentaux obtenus sur cette fenêtre placée dans des conditions climatiques contrôlées et leurs confrontations aux résultats issus d'un code de mécanique des fluides numérique (MFN). Ce dernier une fois validé doit permettre la mise au point d'un modèle « simplifié » mais fiable pouvant être intégré dans un logiciel de simulation thermique dynamique de bâtiment [4], [5].

## 2. Présentation du dispositif expérimental

Le prototype de fenêtre étudié est placé entre deux cellules aux ambiances climatiques contrôlées. Le volume de chaque cellule est d'environ 12 m<sup>3</sup>. La cellule chaude est équipée de deux radiateurs et la cellule froide est climatisée. La température dans chacune des cellules est mesurée au moyen d'une sonde de température résultante disposée au centre de chacune des cellules. Les températures d'air sont connues à l'entrée et à la sortie de fenêtre. Notons que dans le cadre de cette étude, nous ne faisons pas de distinction entre température ambiante et radiante moyenne, les parois isolées des cellules ayant des températures de surface très proches de la température de l'air. La température d'air et la température résultante mesurée ont des valeurs très proches, avec des écarts de l'ordre de quelques 1/10 K correspondant à la précision attendue sur les mesures de températures.

Pour mesurer et contrôler le débit d'air circulant dans la fenêtre, est installé un « plénum » convergent au niveau de la sortie d'air. Il permet aussi d'éviter les perturbations liées à l'environnement de la cellule et de concentrer progressivement le flux d'air vers une conduite en PVC de section circulaire (diamètre 120 mm et de longueur > 1m50 (longueur d'établissement du régime d'écoulement laminaire))[6]. Un ventilateur permet de faire varier le débit d'air au sein de la fenêtre. Un anémomètre associé à un capteur de température est placé en amont du ventilateur et permet d'obtenir la valeur de ce débit.

La fenêtre expérimentale Paziaud<sup>®</sup> est instrumentée à l'aide de thermocouples et de fluxmètres à gradient tangentiel [7] (Figure 1). Des capteurs sont placés à l'extérieur et dans la fenêtre selon des plans horizontaux à trois niveaux de hauteur différents. Les thermocouples utilisés sont de type T, de diamètre 0,1 mm ils permettent la mesure locale des températures de surface des parois vitrées et des températures d'air. Les thermocouples utilisés pour la mesure des températures d'air sont maintenus au centre de chacune des cavités à l'aide d'un fil de nylon fin tendu selon la verticale. Des thermocouples ont aussi été installés au niveau de l'entrée ( $T_0$ ) et de la sortie d'air de la fenêtre ( $T_{200}$ ) ainsi qu'au niveau de la jonction entre les deux lames d'air en partie basse ( $T_{100}$ ). Les fluxmètres utilisés sont de type « à gradients tangentiels », leur sensibilité, de l'ordre de 10  $\mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^2$  a été obtenue par étalonnage avec une précision de +/- 3%. Leur épaisseur est de 0,2 mm [7], il est ainsi possible de disposer des fluxmètres dans les lames d'air sans que la mesure ne devienne trop intrusive. Chaque fluxmètre disposé horizontalement recouvre une surface de 40 cm<sup>2</sup> (2 cm x 20 cm). La largeur de la fenêtre étant de 60 cm, les effets de bord sont négligeables.

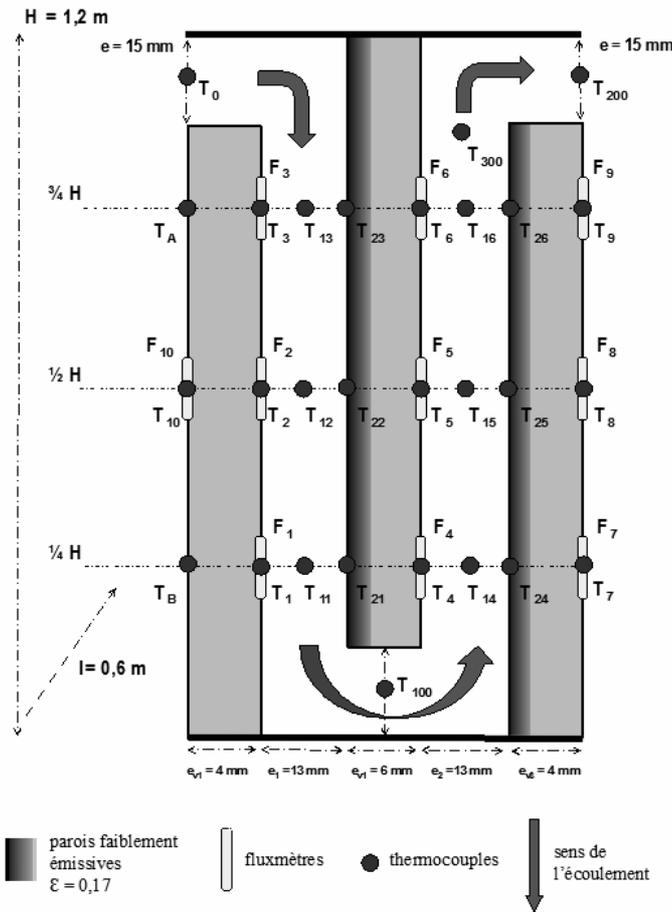


Figure 1 : Géométrie et instrumentation de la fenêtre Paziaud®

Les fluxmètres sont collés sur le verre. La couche de colle est sans bulle d'air (visible par transparence) et d'épaisseur négligeable. Aucun fluxmètre n'a été collé sur les faces faiblement émissives des vitrages ( $\varepsilon = 0,17$ , valeur fournie par le fabricant et confirmée dans la base de données du logiciel Window®). L'acquisition des données est réalisée avec un multimètre Keithley 2700 muni d'une interface IEEE488 permettant sa connexion à un ordinateur. Une acquisition est réalisée toutes les 30 secondes pour l'ensemble des capteurs.

### 3. Résultats expérimentaux

Les essais expérimentaux présentés ici sont réalisés pour deux valeurs différentes de débit d'air. Pendant les mesures, le climatiseur de la cellule froide n'est pas utilisé car il génère au sein de la cellule, des mouvements d'air indésirables. La température de la cellule froide est d'environ 20°C. Quant à la température de la cellule chaude, elle est maintenue à environ 40°C de façon à obtenir une différence de température de 20°C entre les deux cellules. Durant les essais, la température de l'environnement extérieur aux cellules est stable d'environ 16°C.

Lorsque le dispositif est en régime stationnaire, nous avons tout d'abord constaté que les variations sur les mesures de température sont faibles et inférieures à 0,12°C que ce soit pour les thermocouples placés sur les surfaces vitrées ou situés dans l'écoulement d'air. Concernant les mesures de flux, hormis les fluxmètres F<sub>8</sub> et F<sub>9</sub>, les variations constatées sont de l'ordre de 1 W.m<sup>-2</sup>. Pour les fluxmètres situés sur la vitre en contact avec la cellule froide, les flux sont faibles, ce qui aboutit à des fluctuations de +/-10% pour ces capteurs en particulier.

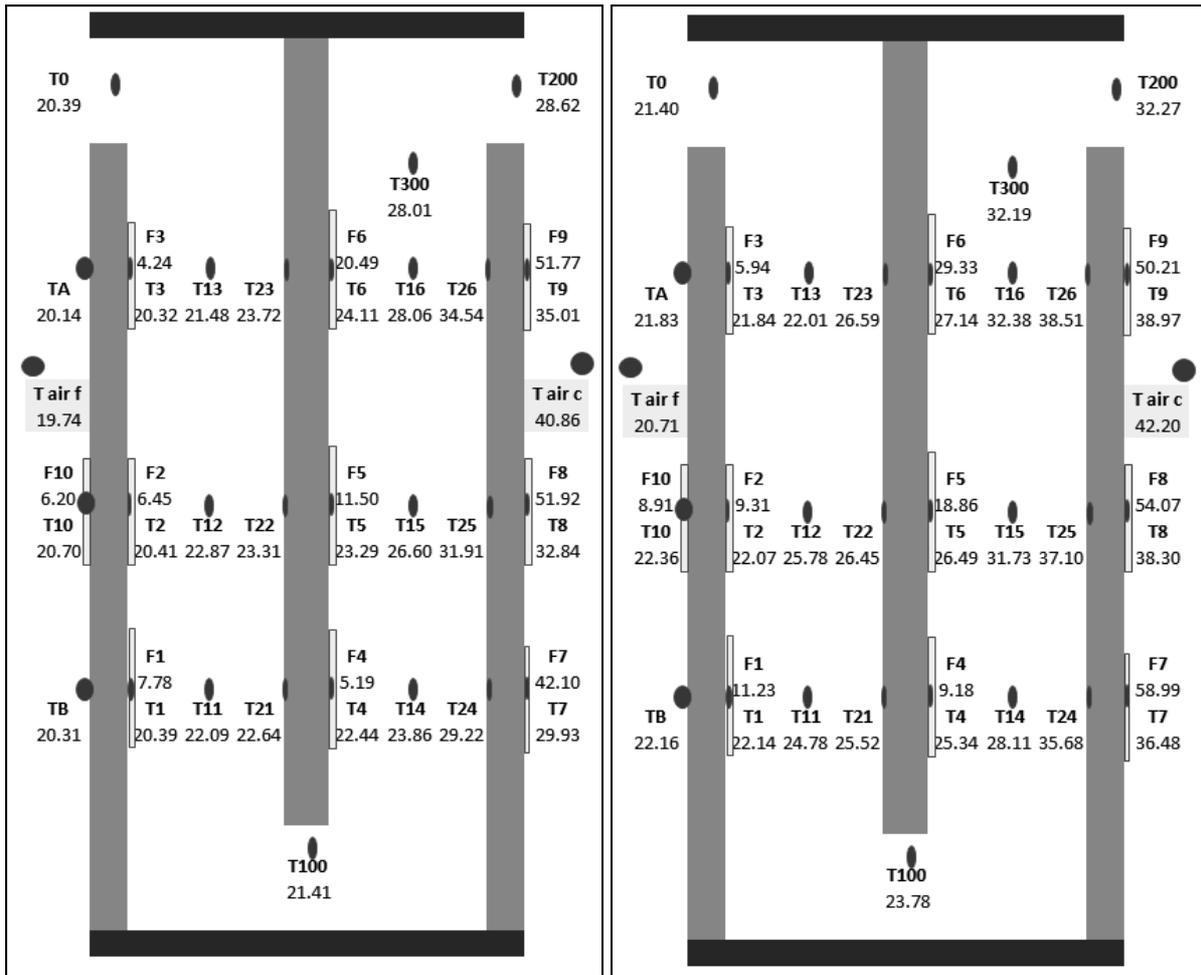


Figure 2 : Résultats expérimentaux (flux en  $W.m^{-2}$  et température en  $^{\circ}C$ ) ; débit d'air de  $12,5 m^3.h^{-1}$   
Gauche : sans brassage cellule chaude ; Droite : brassage cellule chaude avec ventilateur

Les résultats (Figure 2) sont obtenus sur la base de valeurs moyennes calculées sur 120 points de mesure relevés à intervalles de temps réguliers (1 heure d'enregistrement au pas de 30 secondes). Les phénomènes identifiés lors des simulations numériques [5] sont confirmés par les essais expérimentaux :

- L'air récupère peu de chaleur dans la première cavité. L'évolution de la température d'air se caractérise par une augmentation au niveau de la partie haute de la fenêtre et par une diminution en partie basse. Ce phénomène est de moins en moins sensible à mesure que le débit d'air augmente.
- Le préchauffage de l'air a surtout lieu dans la deuxième lame d'air.
- La différence des températures des parois dans la première lame d'air est faible.
- A mesure que le débit augmente, on constate une diminution de la température d'air en sortie de fenêtre, une augmentation du flux entre la cellule chaude et la fenêtre et une diminution du flux entre la fenêtre et la cellule froide.
- Lorsque le débit d'air est de  $12,5 m^3.h^{-1}$ , une légère diminution de la température d'air peut être constatée au niveau de la partie haute de la seconde lame d'air. Ce phénomène n'est pas observé dans les essais menés à des débits plus élevés.

Si dans l'ensemble les résultats sont satisfaisants, il existe néanmoins certaines incohérences que l'on observe pour les essais :

Le thermocouple  $T_{10}$  indique une température supérieure d'environ  $0,3^{\circ}\text{C}$  à celle du thermocouple  $T_2$  laissant supposer que le flux au centre du premier vitrage rentre dans la lame d'air. Ceci n'est pas cohérent et n'est pas confirmé par la mesure du fluxmètre  $F_2$ . On constate le même phénomène pour les thermocouples ( $T_{22}; T_5$ ) et ( $T_{21}; T_4$ ).

Si nous nous intéressons aux flux traversant le troisième vitrage, on se rend compte que les flux calculés à partir de la résistance thermique du verre et des températures par les thermocouples sont anormalement élevés (de l'ordre de  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) et ne correspondent pas aux valeurs fournies par les fluxmètres dont les mesures (entre  $50\text{-}66 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) sont sans aucun doute plus proches de la réalité. Compte tenu des faibles écarts de température et de la « grande » conductivité thermique du verre, l'incertitude est telle qu'il n'apparaît pas raisonnable de calculer des flux à partir des mesures de température. En cela les fluxmètres sont un outil très appréciable.

Au niveau des flux entre la cellule chaude et la fenêtre, il apparaît anormal d'obtenir une densité de flux moins importante en bas de fenêtre qu'en partie haute. Des mesures supplémentaires ont été réalisées et ont permis d'identifier une importante stratification en température d'air au sein de la cellule chaude. Pour une température ambiante moyenne de  $40,2^{\circ}\text{C}$ , nous avons constaté une différence de  $10^{\circ}\text{C}$  selon la hauteur entre le bas de la fenêtre ( $34^{\circ}\text{C}$ ) et le plénum ( $44^{\circ}\text{C}$ ).

Un ventilateur a été installé permettant de brasser légèrement l'air et d'obtenir une température plus homogène au sein de la cellule chaude. L'écart de température constaté entre le haut et le bas de la fenêtre est alors de  $1,5^{\circ}\text{C}$ , mais il faut prendre en compte le fait que le coefficient d'échange convectif entre la cellule et la fenêtre est modifié. En se basant sur un calcul moyen à partir des données expérimentales de flux et de températures, on obtient pour ce coefficient de convection, une valeur d'environ  $3,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  en l'absence de ventilateur et de  $8,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  en présence du ventilateur. Le coefficient d'échange radiatif, de l'ordre de  $6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$  est obtenu par linéarisation des transferts entre surfaces grises: le vitrage et les parois de l'enceinte. Pour définir les conditions aux limites des simulations, dans chacun des cas considérés, ce coefficient sera calculé précisément à partir des températures moyennes obtenues sur la période de mesure correspondant aux hypothèses de simulation.

Un nouvel essai est réalisé pour un débit de  $12,5 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  (Figure 2 à droite). Concernant les flux entre la cellule chaude et la fenêtre, on constate qu'ils sont plus grands en bas de la fenêtre qu'en haut. Par ailleurs, les flux mis en jeu sont plus importants que ceux de l'essai réalisé pour un même débit sans brassage (Figure 2 à gauche).

En conclusion, les résultats bruts de ces premiers essais expérimentaux sont globalement satisfaisants et prometteurs. La principale incohérence a été identifiée et corrigée. Les essais confirment l'existence des principaux phénomènes identifiés par simulation numérique.

#### **4. Confrontation des résultats expérimentaux aux résultats numériques**

Une simulation numérique bidimensionnelle en régime permanent de la convection forcée laminaire est réalisée à l'aide du code commercial Fluent. Les propriétés thermophysiques du fluide sont supposées dépendantes de la température et sont calées sur les préconisations de la norme 15 099<sup>1</sup>. Les propriétés du fluide sont calculées à l'aide de fonctions polynomiales et la loi des fluides parfaits incompressibles est utilisée pour modéliser les variations de la masse volumique. Un maillage structuré non-uniforme, optimisé avec 79 216 nœuds et raffiné près des surfaces de verre et au niveau des entrée et sortie, a été utilisé. Le détail précis de ce modèle numérique est disponible dans [4-5]. Une comparaison entre les résultats issus du dispositif expérimental et ceux issus du modèle MFN est effectuée. Pour cela, certaines

hypothèses de base des simulations, doivent être adaptées aux conditions expérimentales. Les simulations correspondant aux essais sans brassage d'air sont ainsi réalisées selon les critères suivants :

Les conditions aux limites, au niveau des vitres 1 et 3, sont de type Fourier. Pour la température de référence, on choisit d'imposer un profil de façon à prendre en compte la stratification de la température d'air dans la cellule chaude. A cette paroi, le coefficient d'échange convectif est fixé à  $3,6 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$  (valeur normalisée<sup>1</sup>). Concernant les échanges par rayonnement sur cette paroi, en absence de mesure des températures des différentes parois de l'enceinte on considère que la température moyenne des surfaces de la cellule est égale à la température résultante mesurée (écart possible de quelques  $1/10 \text{ K}$  au maximum). La température ambiante correspondant à la cellule froide, est supposée constante sur toute la hauteur de fenêtre et égale à la valeur donnée par la mesure. Le coefficient de convection est fixé à  $3,6 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ . La température de l'air à l'entrée de la fenêtre est la valeur mesurée expérimentalement. Le rayonnement dans les espaces entre les vitrages dans la fenêtre est simulé à l'aide du modèle des ordonnées discrètes.

Concernant les hypothèses de simulation correspondant au troisième essai (avec brassage d'air dans la cellule chaude), nous supposons constante la température de référence propre à la condition à la limite convective pour la vitre 3. Le coefficient de convection est fixé à  $8,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ . Les profils de température issus du modèle MFN semblent relativement bien correspondre aux données expérimentales (Figure 3). Les différences sont minimales pour les températures de parois. Concernant les températures d'air, les résultats sont satisfaisants avec des différences de plus en plus sensibles à mesure que le débit d'air augmente. La mesure des températures dans les cavités est délicate car ce sont des mesures locales tandis que pour les simulations, on considère la température de mélange. Par ailleurs, nous ne pouvons garantir que les thermocouples aient été placés exactement au milieu des cavités. La comparaison des résultats pour un débit de  $12,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ , avec et sans brassage de l'air, confirme l'existence du phénomène de stratification de la température d'air dans la cellule chaude et démontre que nous avons su correctement le prendre en compte dans nos simulations.

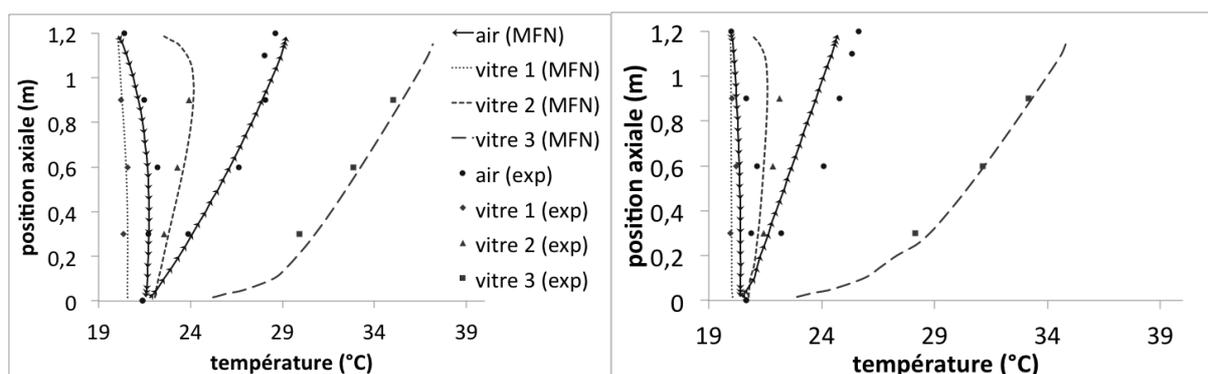


Figure 3 : Comparaison données expérimentales et numériques sur l'évolution des températures de parois et d'air en fonction de la hauteur (débit de  $12,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$  à gauche, de  $31 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$  à droite)

<sup>1</sup> ISO-15099, « Thermal performance of windows, doors and shading devices - detailed calculations », Technical report, 2003

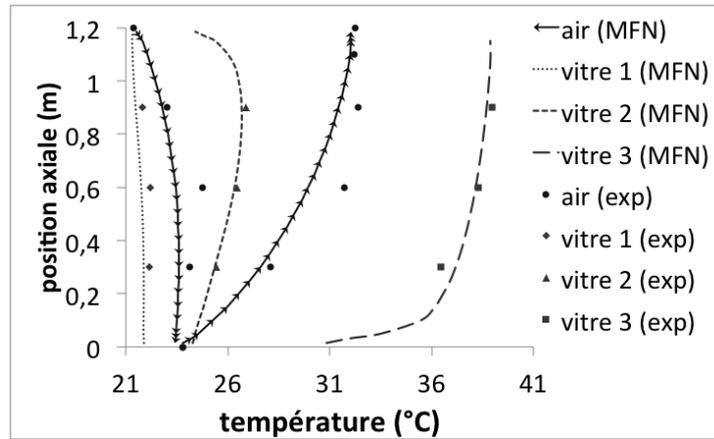


Figure 4 : Comparaison données expérimentales et numériques sur l'évolution des températures de parois et d'air en fonction de la hauteur (débit  $12,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  avec brassage d'air dans la cellule chaude)

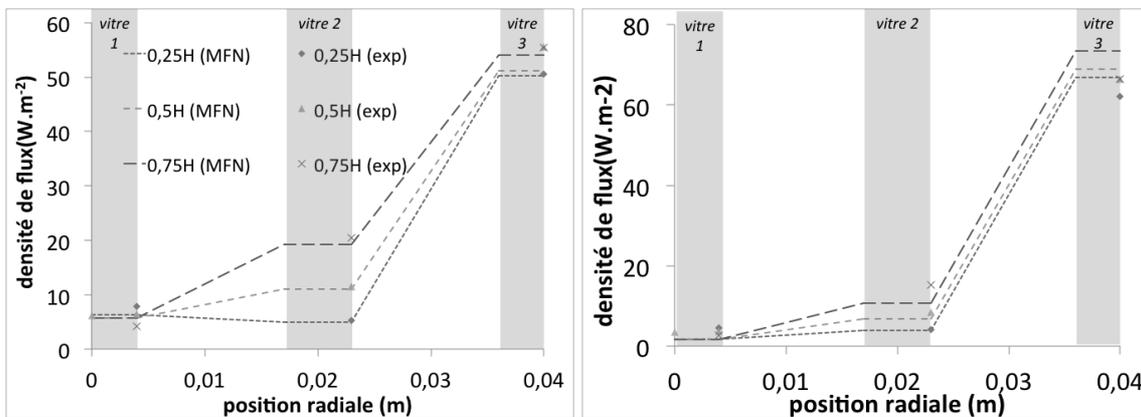


Figure 5 : Comparaison données expérimentales et numériques sur l'évolution des flux de chaleur en fonction de la hauteur et du vitrage (débit  $12,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  à gauche et de  $31 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  à droite)

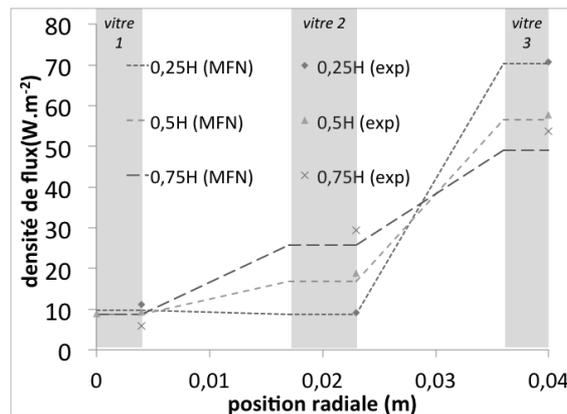


Figure 6 : Comparaison données expérimentales et numériques sur l'évolution des flux de chaleur en fonction de la hauteur et du vitrage (débit  $12,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et brassage de l'air dans la cellule chaude)

En ce qui concerne les densités de flux, on constate une bonne adéquation entre les simulations et les expérimentations (Figure 5 et 6). Les différences les plus importantes correspondent aux flux traversant la vitre 3 et s'accroissent à mesure que le débit d'air augmente. Ces différences peuvent être dues à une imprécision de mesure des fluxmètres ou à une limite du modèle MFN. L'influence sur les flux de chaleur de la stratification de la température d'air dans la cellule chaude, est bien représentée dans les simulations.

## 5. Conclusion et perspectives

Les résultats de cette étude expérimentale confirment les hypothèses sur lesquelles repose le modèle MFN. La fenêtre pariéto-dynamique peut être correctement modélisée dans sa partie courante semi-transparente et ventilée en considérant une géométrie bidimensionnelle et un écoulement laminaire. Par ailleurs, les flux de chaleur issus des menuiseries n'ont pas été identifiés comme prépondérants mais seront à étudier dans le cadre de simulations tridimensionnelles.

En perspective de cette étude expérimentale, il s'agit tout d'abord d'exploiter le dispositif tel qu'il existe actuellement de façon à obtenir une base de données plus conséquente en faisant notamment varier le débit d'air ainsi que la différence de températures entre les deux cellules. Il paraît également intéressant d'obtenir des résultats pour des températures ambiantes plus proches de la réalité et nécessaire de trouver une solution pour limiter la stratification de l'air dans la cellule chaude sans être obligé de brasser l'air à l'aide d'un ventilateur de façon à conserver un coefficient de convection proche de  $3,6 \text{ W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ . Pour finir, il s'agira de réaliser une étude sur l'influence du rayonnement solaire soit en utilisant des lampes à sodium ou en plaçant la fenêtre en façade d'un bâtiment. Les problèmes de mesures seront alors différents du fait de l'influence du rayonnement Courtes Longueurs d'Ondes sur les thermocouples et de l'opacité des fluxmètres.

Par la suite, dans une étude plus approfondie, une nouvelle instrumentation de la fenêtre peut être envisagée de façon à identifier l'influence des menuiseries (instrumentation des menuiseries) et celle des effets de bords (géométrie tridimensionnelle).

### Références

- [1] M. Bhamjee, A. Nurick, et D. M. Madyira, « An experimentally validated mathematical and CFD model of a supply air window: Forced and natural flow », *Energy Build.*, vol. 57, p. 289- 301, févr. 2013.
- [2] F. Gloriant, A. Joulin, P. Tittlein, et S. Lassue, « Échanges convectifs entre deux parois planes, verticales, soumises à des conditions de type Fourier », in *SFT 2013*, Gérardmer (France), 2013.
- [3] F. Gloriant, P. Tittlein, A. Joulin, et S. Lassue, « Convection forcée laminaire de l'air entre deux parois proches soumises à des conditions de Fourier », in *actes du Congrès Français de Thermique 2014*, Lyon, 2014.
- [4] F. Gloriant, P. Tittlein, A. Joulin, et S. Lassue, « Modelling supply-air window in a building simulation code », in *Building Simulation 2013*, Chambéry (France), 2013.
- [5] F. Gloriant, « Caractérisation et modélisation d'une fenêtre pariéto-dynamique à trois vitrages », Thèse de doctorat, Université d'Artois, Béthune, 2014.
- [6] CSTB, « Rapport d'essais n°35078 », 1995.
- [7] D. Leclercq et P. They, « Apparatus for simultaneous temperature and heat flow measurement under transient conditions », *Rev. of Scient. Instrum.*, vol. 54, p. 374- 380, 1983.