

Contribution expérimentale à la caractérisation d'une fenêtre pariétodynamique chauffante

¹ Manfiotto David, Lassue Stéphane, Zalewski Laurent, Tittlein Pierre, Cherif Yassine, Herin Philippe, Chartier Thierry et Zeiny Salem

¹ Univ. Artois, Univ. Lille, Institut Mines-Télécom, Junia, ULR 4515 – LGCgE, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, F-62400 BETHUNE,

[*stephane.lassue@univ-artois.fr](mailto:stephane.lassue@univ-artois.fr)

RESUME. Aujourd'hui, personne ne conteste que l'enveloppe des bâtiments joue un rôle majeur en terme de consommation d'énergie et de production de gaz à effet de serre. Jusqu'à présent, les réglementations thermiques successives ont surtout eu pour effet, un renforcement de l'isolation thermique et une amélioration de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe. En découle parfois, des problèmes de condensation sur les parois et une mauvaise qualité de l'air. Notre projet consiste à analyser les apports d'une paroi vitrée, ventilée et chauffante qui doit contribuer à la fois à l'aération, au chauffage du bâtiment et à la récupération d'énergie solaire et fatale. Nos travaux interviennent dans le cadre d'un projet ADEME NTE-VARIETO. Cette communication propose de partager nos premiers résultats, les difficultés qui se présentent au niveau de l'évaluation des performances in-situ et à la définition des indicateurs de performance.

MOTS-CLÉS : fenêtre ventilée multifonctionnelle, performance énergétique, indicateurs.

ABSTRACT. Today, everyone agree with the idea that building envelop participate a lot in energy consumption and greenhouse gas production. Regulations permitted to improve insulation, airtightness and reduce renewal air ratio. Overconsumption problems in comparison to estimates are often observed as well as condensation on walls and degradation of air quality. Our project consist to analyze benefits of glazed, ventilated and heated window that contribute to aeration, heating of building, to recovery of solar energy and heat losses. This work is part of the ADEME-VARIETO project. In this communication, we wish to share with scientific community our first experimentation results, difficulties about experimental evaluation of performances and also performance indicators. We shall attach great importance to different heat sources (solar, electric and heat losses) and particular kind of convective exchanges in air layer that bring to define several performance indicators.

KEYWORDS : ventilated multifunctional window, energetic performance, indicators

1. INTRODUCTION

Le projet ADEME NTE – VARIETO est mené dans le cadre d'une collaboration entre deux laboratoires universitaires, le LGCgE Béthune et le LASIE La Rochelle et avec une entreprise de menuiserie (Ets RIDORET). L'objectif est de mettre en œuvre un certain nombre d'expérimentations de laboratoire et in-situ pour obtenir les éléments de caractérisation des performances d'une fenêtre pariétodynamique. Cette fenêtre de type Paziaud (1983) est relativement bien connue. Le principe de fonctionnement consiste à organiser un transfert de flux d'air au travers de la fenêtre en le faisant circuler entre trois vitrages formant un canal en U. Dans cette configuration la circulation d'air est assurée par

la mise en dépression du bâtiment sous l'effet d'une ventilation mécanique contrôlée ou éventuellement naturelle assistée. L'air qui circule dans la fenêtre est l'air neuf de ventilation, l'intérêt étant qu'il entre plus ou moins préchauffé dans le bâtiment. Le préchauffage est réalisé par convection en récupérant une partie des déperditions thermiques et un peu de l'énergie solaire incidente absorbée par les vitrages. Ces dernières années, les travaux de Gloriant et al 2013 et 2014 et Greffet 2016 ont permis des avancées significatives dans l'étude de ces fenêtres et ont également permis le passage à l'industrialisation par le biais d'avis techniques et d'un titre V de la réglementation thermique des bâtiments. Dans le projet VARIETO le vitrage intérieur est remplacé par un vitrage chauffant alimenté en énergie électrique. Cette disposition doit permettre de proposer un élément de l'enveloppe du bâtiment qui est aussi un émetteur de chaleur. La contribution au chauffage s'effectue par l'apport d'air chaud (air neuf chauffé dans la fenêtre) et par rayonnement et convection en surface intérieure, le vitrage chauffant pouvant atteindre une température de surface de l'ordre de 45°C, (maximum choisi pour la protection des occupants). Dans ce projet, le LGCgE a la charge de trois expérimentations. La première concerne la mise en œuvre d'une fenêtre en façade sud d'un bâtiment de la FSA de Béthune (objet de cette communication), la deuxième doit permettre de mieux cerner les phénomènes d'échanges thermiques par convection les lames d'air de la fenêtre (évaluation des coefficients d'échanges thermiques) et la troisième est prévue pour examiner les conditions d'écoulement dans les lames d'air par Vélocimétrie par Image de Particules).

2. EXPERIMENTATION : FENETRE EN FAÇADE SUD D'UN BATIMENT DE LA FACULTE A BETHUNE

La fenêtre instrumentée (photographie figure 1) est située en façade sud d'un des bâtiments de la Faculté de Béthune. L'objectif est de faire des mesures in-situ en relevant les conditions climatiques extérieures (température d'air, ensoleillement, rayonnement IR, vitesse du vent), les flux thermiques traversant les vitrages et les températures de surfaces et températures d'air dans la fenêtre. Dans cette communication, nous nous intéresserons plus particulièrement aux nuits hivernales. Ce sont les périodes pour lesquelles l'interprétation des mesures est la plus simple. En effet, lorsque la fenêtre est exposée au rayonnement solaire, les mesures de flux thermiques et de températures de surface sont difficilement exploitables.



Figure 1 : Fenêtre instrumentée en façade sud d'un bâtiment de la faculté à Béthune

Un pyranomètre et un anémomètre complètent le dispositif à l'extérieur. La figure 2 présente le schéma d'implantation des thermocouples et fluxmètres à gradients tangentiels. Les fluxmètres, de

dimension 2cm*20cm, ont été recouverts d'un revêtement adhésif blanc (voir figure 1) ayant une émissivité très proche de celle des vitrages. La couleur blanche a été choisie pour limiter l'absorption de rayonnement solaire en journée. Des thermocouples de diamètre 0,1 mm de type T sont collés sur les vitrages et recouvert d'une pastille adhésive d'aluminium conductrice et d'un adhésif en Kapton® sur une surface de quelques mm². Les mesures de températures d'air dans la fenêtre sont réalisées à l'aide de thermocouples de type T de diamètre 0,05 mm. Un des vitrages a une de ses faces recouvertes d'un revêtement faiblement émissif (face 3 sur la figure 2). Un thermocouple (T₃) recouvert d'un revêtement réfléchissant a été collé sur cette surface.

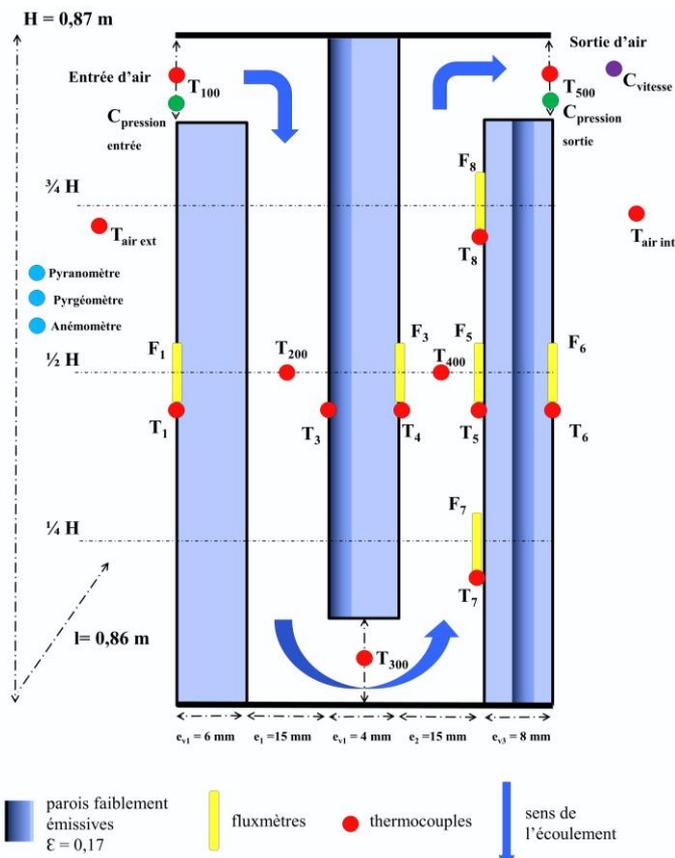


Figure 2 : schéma du dispositif expérimental mis en place

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1. Fenêtre pariétodynamique

Les graphiques 3, 4, 5 et 6 nous donnent les mesures effectuées pour une nuit sans activation de la résistance chauffante. On se trouve alors dans le cas d'un vitrage pariétodynamique classique. La vitesse moyenne de l'air mesurée au niveau de l'extraction est de $0,83 \text{ m/s}$ dans une conduite cylindrique de diamètre 100 mm ce qui correspond à un débit de $23,45 \text{ m}^3/\text{h}$. Ce débit est intermédiaire entre les valeurs communes de $15 \text{ m}^3/\text{h}$ et $30 \text{ m}^3/\text{h}$ au niveau des bouches d'entrée d'air des menuiseries classiques.

Sur le graphique 3 on observe que pour la journée bien ensoleillée le flux global vertical mesuré par le pyranomètre atteint au maximum les 1000 W/m^2 . Ceci est due au fait que, sous la fenêtre une toiture de couleur blanche réfléchit une part du rayonnement global qu'elle reçoit. La température extérieure est localement perturbée par l'ensoleillement.. Le thermocouple T_{100} qui mesure la température d'air à

l'entrée de la fenêtre donne lui aussi des résultats quasi-identiques (Figure 5). La température de l'air extérieur mesurée très localement n'est donc pas celle qui serait mesurée sous abri par une station météo. Mais elle correspond bien à celle de l'air qui entre dans la fenêtre et probablement celle de l'air à proximité de la surface vitrée. Ce point est particulièrement important à souligner.

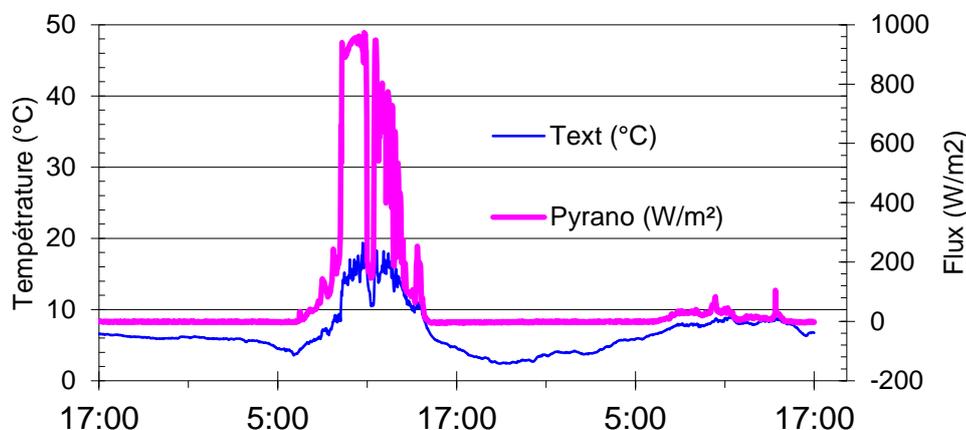


Figure 3 : Ensoleillement et Température extérieure du 16/11 au 18/11

Sur la figure 4 on pourra observer l'évolution des températures de surface de vitrages pour ces deux journées. On note ici encore que le rayonnement solaire est fortement perturbateur des mesures. Par contre la nuit et également par temps couvert les mesures sont très intéressantes. On voit clairement l'augmentation des températures de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment. Ces résultats sont complémentaires des relevés de températures de l'air (Figure 5) qui traverse la fenêtre. La température T_{500} est mesurée dans un plénum à la sortie de la fenêtre. Ici encore la perturbation solaire est telle que les résultats de mesures fluxmétriques sont difficilement exploitables en journée. Néanmoins les surfaces blanches des fluxmètres sont très petites devant celles des vitrages et l'échauffement de l'air par effet pariétodynamique est sensible. Il est de l'ordre de 6 à 8 °C en période nocturne ou couverte. Il monte au maximum à 14°C quand il y a du soleil. Enfin, la figure 6 représente l'évolution des flux pour la même période. Ici encore la période ensoleillée n'est pas exploitable. Il est intéressant de noter que les flux F1 (vitrage extérieur) et F4 (vitrage intermédiaire) sont très proches et relativement faibles. Ceci confirme que la lame d'air extérieure est peu active en termes de récupération de chaleur, comme il l'a été relevé dans des simulations lors de précédents travaux Gloriant (2014). Les écarts de température de surface entre les deux faces pour les deux vitrages sont équivalents et très faibles, (à la limite de la précision de la mesure). Dans la deuxième lame d'air, l'augmentation de la température d'air en allant du bas vers le haut fait que $F7 > F6 > F8$. Les flux F5 et F6 mesurés à mi-hauteur de part et d'autre de la vitre intérieure sont très proches. F6 est légèrement plus faible que F5.

A partir des densités de flux et des températures, nous pouvons estimer le U_g de la fenêtre avec et sans activation du vitrage chauffant. Pour cela, nous allons prendre en compte les mesures de flux thermiques en paroi 1. Au cœur de la nuit du 17 au 18/11 le flux F1 est égal à environ 10,8 W/m² en moyenne. On note que F6 est un peu plus bruité, conséquence des échanges par convection naturelle avec l'air du local alors que le fluxmètre F5 est en contact avec un flux d'air laminaire en convection forcée à basse vitesse. La température moyenne dans le local pour la même période est de 19,5°C et la température extérieure d'environ 6°C. En période nocturne nous pensons qu'elle est fiable. Ce qui nous donne un U_g « expérimental » de l'ordre de 0,8 W/m²°C pour une fenêtre pariétodynamique simple. Le U_g devrait être plus faible pour une fenêtre pariétodynamique classique que pour un triple vitrage

performant - Gloriant 2014, Greffet 2016. C'est un résultat qui soulève des questions. Cette valeur est en effet assez élevée, éloignée des valeurs théoriques plus faibles obtenues en modélisation (Gloriant et al 2013). En réalité, la température extérieure à prendre en compte expérimentalement est différente car le rayonnement IR mesuré par un pyrogéomètre donne une température d'environnement de -7°C pour la même période). Cette température et la vitesse du vent ($2,5\text{ m/s}$), ont tendance à modifier la valeur de la densité de flux perdue. Les températures extérieures mesurées étant souvent assimilées à des températures d'air pour les calculs de déperditions thermiques ces résultats sont significatifs d'une imprécision difficile à lever mais généralement acceptée.

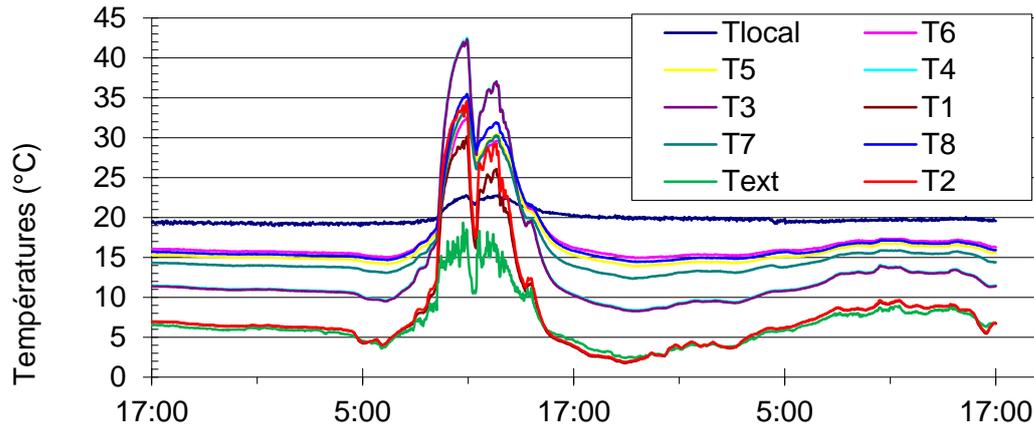


Figure 4 : Températures ambiantes et de surfaces – 16 et 17/11 2019

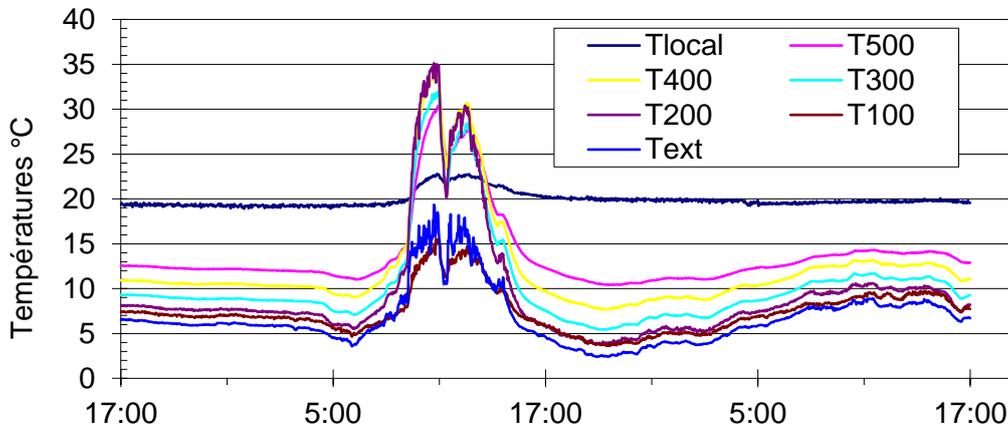


Figure 5 : Températures d'air – 16 et 17/11 2019

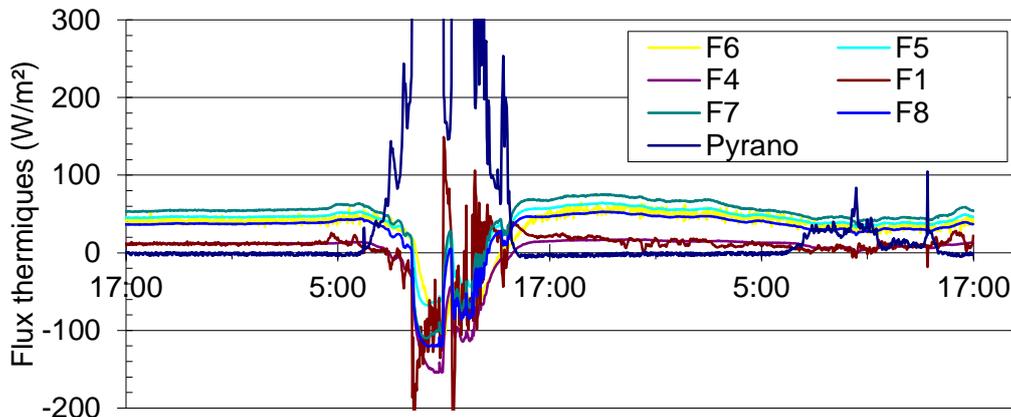


Figure 6 : Flux thermiques – 16 et 17/11 2019

3.2. FENETRE PARIETODYNAMIQUE CHAUFFANTE

Dans une deuxième phase, nous présenterons ici des mesures réalisées une nuit en décembre 2019. Le débit volumique d'air reste inchangé. La vitre chauffante est activée et le signal du pyranomètre est nul en cette période nocturne. A la figure 7 on notera que le flux F6 devient négatif (selon le sens conventionnel que nous avons choisi, un flux de valeur positive est orienté de l'intérieur vers l'extérieur). Le flux s'inverse ici car le vitrage intérieur chauffant est actif. Celui-ci est un feuilleté de 8 mm (deux vitrages de 4mm).

Au cœur de ce vitrage un dépôt d'oxydes métalliques constitue une résistance électrique plane et chauffante. Les conditions nocturnes sont très stables. On rappelle que le débit d'air est de l'ordre de 23,45 m³/h. Comme dans le cas « sans chauffage », les températures augmentent entre la paroi 1 et la paroi 6. On observe bien une diminution significative de la valeur du flux quand on va de l'intérieur vers l'extérieur. La différence correspond en grande partie à l'énergie récupérée par l'air qui vient de l'extérieur aux alentours de 9°C et qui est soufflé dans la pièce à environ 22°C. Une puissance d'environ 386 W/m² est injectée dans la résistance chauffante. Le flux thermique moyen F5 mesuré est de 195 W/m² (figure 7). Le flux F6 est en moyenne (et en valeur absolue), de 203 W/m². La somme des deux flux dépasse légèrement les 386 W/m² fournis au vitrage chauffant. Cette puissance fournie est une moyenne répartie sur toute la surface du vitrage alors que les mesures réalisées par les fluxmètres sont locales (au centre de la fenêtre). Les fluxmètres sont ici sensibles à la fois à la dissipation de l'énergie électrique fournie mais également aux conditions d'échange différentes avec l'ambiance intérieure du local et l'écoulement d'air en provenance de l'extérieur qui traverse la fenêtre. Comme dans l'essai précédent, on constate (figure 8) que les différences de températures entre les deux faces d'une même vitre sont très faibles (au maximum 1,3 °C pour le vitrage chauffant). La température moyenne de la surface du vitrage chauffant est alors aux alentours de 37°C transformant le vitrage en radiateur/convecteur. Un flux d'air neuf à 22°C en moyenne (T500 – figure 10) est soufflé dans le local (alors que la température de l'air extérieure est de l'ordre de 9,5°C en moyenne. Le gain au niveau du préchauffage d'air neuf est donc d'environ 12,5°C. Ici le gain d'énergie par l'air est relativement équivalent si l'on considère les deux lames d'air. (T300-T100 ~5,2°C) et T500-T300 ~6,7°C, ce qui ne correspond pas aux résultats attendus. La température T300 mesurée à proximité du cadre de la menuiserie et au niveau du changement de direction du flux d'air est sans doute perturbée. Les mesures futures par PIV nous éclaireront peut-être à ce sujet.

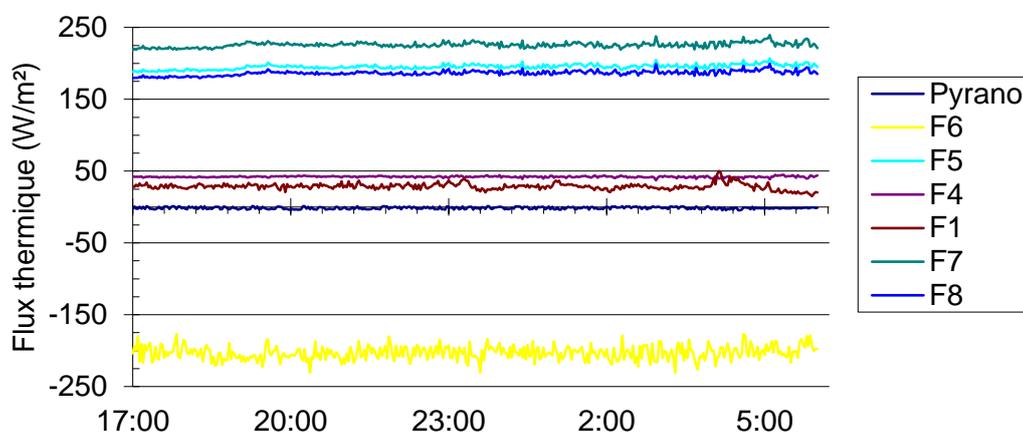


Figure 7 : Flux thermiques entre le 07/12 à 17h et le 08/12 à 6h

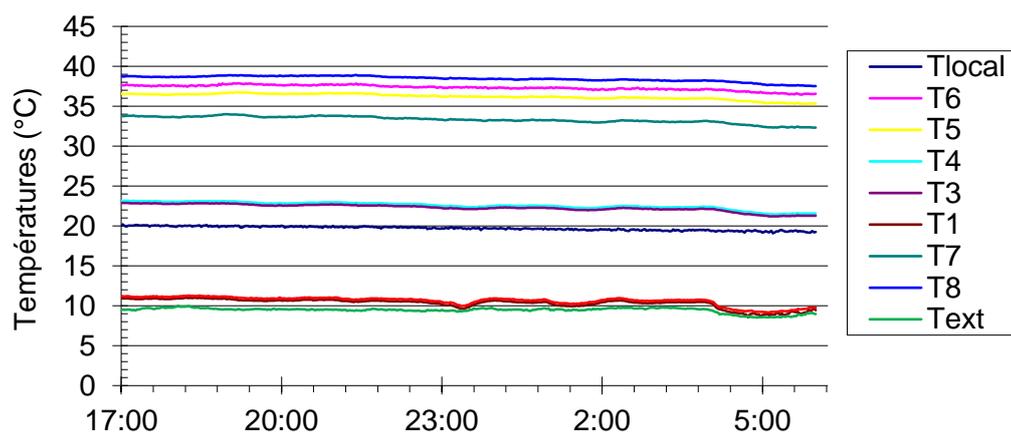


Figure 8 : Températures de surface des parois vitrées entre le 7/12 à 17h et le 8/12 à 6h

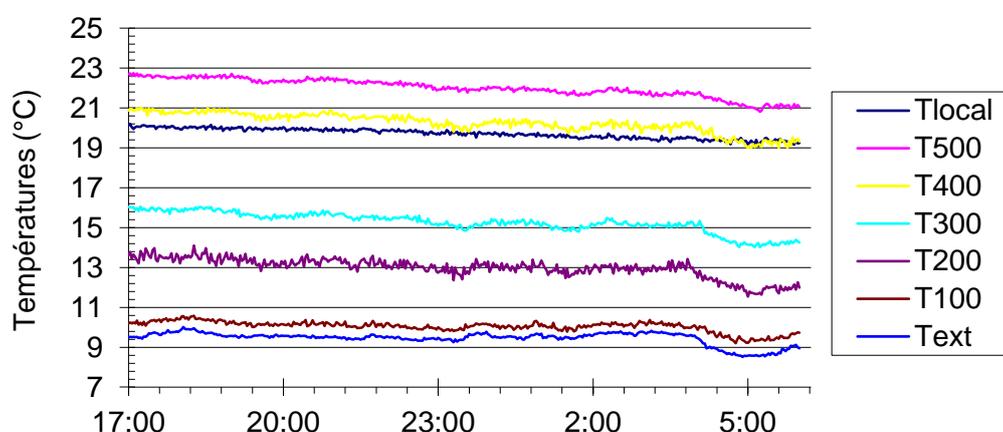


Figure 9 : Températures d'air circulant dans la fenêtre entre le 07/12 à 17h et le 08/12 à 6h

La couche faiblement émissive du vitrage central se trouvant sur la face 3 (coté extérieur), elle n'empêche pas l'absorption des transferts d'énergie par rayonnement en provenance du vitrage chauffant. Le vitrage central transmet alors de la chaleur dans les deux lames d'air. On peut imaginer que le retournement de cette vitre avec revêtement faiblement émissif vers l'intérieur aurait pour effet un échauffement plus important de la vitre chauffante et un déséquilibre des transferts convectifs entre les deux lames d'air. La question se pose de la meilleure efficacité entre les deux options. Les premiers résultats expérimentaux présentés ici permettent de mettre en évidence le rôle de préchauffeur d'air neuf joué par la fenêtre et le rôle d'émetteur de chaleur quand le vitrage intérieur est chauffant. La figure 7 nous donne un flux de sortie (F1), en valeur absolue, de 26 W/m^2 . La figure 6 indique une température intérieure de $19.5 \text{ }^\circ\text{C}$ et une température extérieure de $9.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Au final, nous avons ici un U_g de $2,6 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$. Ceci laisse à penser qu'une partie non-négligeable de la puissance injectée est envoyée vers l'extérieur. Mais cette valeur est purement indicative. En effet, dans le cas où le vitrage est chauffant, de nouveaux indicateurs de performance sont à proposer.

4. Indicateurs de performance

Pour caractériser les performances de cette fenêtre, c'est-à-dire évaluer à quel point elle est isolante, l'énergie qu'elle apporte et celle qui est consommée, il est nécessaire de définir des indicateurs de

performances par soufflage et la chaleur perdue par l'intérieur de l'habitat (exposant « off » ou « on » selon que la vitre est chauffante ou non) (Kurnitski et al 2004, Kaboré 2018)

$$\text{flux thermique entrant dans l'espace intérieur} \quad F_{int}^{on} = F_{souff} + F_{int} \quad (W/m^2) \quad (1)$$

$$\text{coefficient de transmission surfacique} \quad U_g = \frac{F_{ext}^{on}}{T_{int} - T_{ext}} \quad (W/m^2 \cdot C) \quad (2)$$

$$\text{efficacité de la fenêtre} \quad E_w = \frac{F_{ext}^{off} + F_{int}^{on}}{P} \quad (3)$$

$$\text{efficacité du film chauffant} \quad E_{film} = \frac{F_{int}^{on}}{P} \quad (4)$$

. Les équations 1, 2, 3 et 4 définissent les indicateurs de performances. A partir des mesures de flux thermiques, de températures et de puissance réalisées, nous pouvons évaluer les performances énergétiques de la fenêtre. Un coefficient classiquement noté g (ISO 15099) sera utilisé en présence de rayonnement solaire.

$$\text{calcul du coefficient g} \quad g = \frac{F_{transmis} + (F_{éch} - F_{int})^{sol} - F_{ext}}{F_{sol}} \quad (5)$$

5. CONCLUSION

Dans cette communication nous avons présenté les premiers résultats d'une expérimentation visant à mieux comprendre le fonctionnement d'une fenêtre pariétodynamique et établir des indicateurs de performances. Ces résultats montrent bien l'intérêt de la fenêtre en termes de préchauffage d'air neuf de ventilation. Cependant le calcul du coefficient U_g donne des valeurs apparemment trop élevées, elles sont supérieures à celle d'un triple vitrage normal. Dans le cas de l'ajout d'un vitrage chauffant, les premiers résultats sont intéressants mais à confirmer dans le détail. L'analyse des résultats demande à être poursuivie.

Bibliographie

- Paziaud Jacques., 1983. *Fenêtre à isolation dynamique par circulation d'air*. 8205279. 30 septembre 1983.
- Gloriant Francois et al, 2014. *Modeling a triple-glazed supply-air window*. Building and Environment. 2014. DOI 10.1016/j.buildenv.2014.10.017. Volume 84, January 2015, Pages 1-9
- Gloriant Francois et al, 2013. *Modelling supply-air window in a building simulation code*, 13th Conference of the IBPSA. Chambéry, France : août 2013. p. 16-22.
- Gloriant François., 2014. *Caractérisation et modélisation d'une fenêtre pariéto-dynamique à trois vitrages*. Université d'Artois.
- Greffet Remy (mars 2016). *Etudes expérimentales et numériques des performances énergétiques d'une fenêtre pariétodynamique*. Thèse de doctorat CIFRE - Université de la Rochelle.
- Kurnitski et al. (2002). *Efficiency of electrically heated windows*, Helsinki University of Technology, HVAC-Laboratory, Finland: the 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate.
- Kurnitski et al. (2004). *Efficiency of electrically heated window*. Energy and Building, pp. 1003-1010.
- Moreau Alain et Caron Sylvain (2008). *La fenêtre chauffante pour le chauffage périphérique des locaux*. Colloque annuel de l'AGPI, (p. 48). Québec.
- Kaboré Mehdi, Rapport d'avancement - projet NTE-ADEME – Varieto - *Analyse de sensibilité et études paramétriques d'une fenêtre pariétodynamique intégrant un film chauffant*. (2018). Paris
- ISO-15099. 2003. *“Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices - Detailed Calculations”*. Technical report.