

# Contribution à l'étude numérique et expérimentale de l'écoulement d'air dans une fenêtre pariétodynamique chauffante.

Salem ZEINY<sup>1</sup>, Yassine CHERIF<sup>1\*</sup>, Stéphane LASSUE<sup>1</sup>, Thierry CHARTIER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Artois, IMT Nord Europe, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France

\* yassine.cherif@univ-artois.fr

**Résumé** - Nous nous intéressons ici à une fenêtre pariétodynamique chauffante lorsque le régime dynamique de l'écoulement d'air devient turbulent. Une double démarche numérique et expérimentale a été mise en œuvre pour mettre en évidence la structure de l'écoulement principalement dans les zones de recirculation là où le fluide change de direction. Plusieurs modèles de turbulence ont été testés et comparés à des résultats expérimentaux, les résultats de cette étude montrent que le modèle de turbulence GEKO est mieux adapté à cette configuration lorsque les phénomènes de convection mixte dominant les transferts dans la fenêtre. Quant aux modèles classiques k-eps montrent une grande faiblesse pour l'estimations de différentes grandeurs physiques caractéristiques.

## Nomenclature

$\dot{Q}$	débit, kg/s ou m <sup>3</sup> /s	$\rho$	Masse volumique de l'air, kg.m <sup>-3</sup>
$T$	température, K	$\beta$	Coefficient d'expansion, K <sup>-1</sup>
$S$	surface d'échange, m <sup>2</sup>	$\mu$	Viscosité dynamique kg.m. s <sup>-1</sup>
Re	Nombre de Reynolds		
Ri	Nombre de Richardson		
$e$	épaisseur, m		
Dh	diamètre hydraulique		
V	vitesse m/s		

### Indices et exposants

*exp* expérimental

*num* numérique

*v* volumique

*m* massique

### Symboles grecs

$\alpha$  diffusivité thermique, m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>

## 1. Introduction

Le secteur des bâtiments représente en France un domaine dans lequel il existe un fort potentiel en termes de réduction des consommations d'énergies fossiles et de production de gaz à effet de serre. L'enveloppe de bâtiment figure parmi les principaux axes d'amélioration, en matière d'isolation mais aussi en gérant de manière efficace les interactions avec l'environnement. L'équipe habitat du LGCgE à Béthune travaille depuis plusieurs années sur la conception et le développement de parois multifonctionnelles, actives ou passives (murs solaires, parois ventilées diverses, etc...). Ces parois sont moins déperditives, voire même à bilan positif du fait de la récupération d'apports solaires et d'énergies fatales. Le travail présenté ici s'inscrit dans le cadre du projet « VARIETO » - ADEME NTE Nouvelles Technologies Emergentes. Le but est d'analyser le comportement d'une fenêtre pariétodynamique à triple vitrage chauffant. Celle-ci est conçue pour contribuer à la fois au chauffage, à la ventilation et à l'éclairage naturel à l'intérieur d'un bâtiment. Son principe de fonctionnement consiste à faire circuler l'air neuf provenant de l'extérieur entre des lames de verre avant son introduction dans le bâtiment. La recherche présentée dans cette communication, via des approches numériques et expérimentales, concerne plus particulièrement le comportement thermique et dynamique de

l'écoulement d'air interne lorsque la fenêtre est équipée d'un vitrage chauffant. Ce type de fenêtre doit permettre de créer un environnement intérieur plus confortable (suppression des parois froides, réduction du risque de « jet d'air froid ») et un gain en surface habitable puisque l'émetteur de chaleur est intégré à la fenêtre. Ceci aussi bien en réhabilitation qu'en construction neuve.

## 2. Problème physique

Parmi les études réalisées dans le passé sur les fenêtres pariétodynamique dites « classiques » on trouve par exemple celles de Powell [1], Boehm et al [2] Korkala et al [3] et Paziaud [4]. D'une façon générale, les auteurs ont mis en évidence le rôle important que joue la fenêtre pariétodynamique dans la réduction des consommations énergétiques du bâtiment. Le préchauffage d'air neuf diminue de façon non négligeable les déperditions thermiques à travers la fenêtre sans dégrader le confort thermique dans la pièce. Dans ce type de fenêtre, l'écoulement d'air est généré uniquement par une différence de pression entre les entrées et sorties d'air, Dans le cas de la fenêtre chauffante le phénomène est un peu différent du fait de la présence d'une source de chaleur. Plusieurs phénomènes sont à prendre en compte :

- Un tirage thermique : phénomène qui dépend de la différence de température entre les milieux intérieur et extérieur, des apports solaires et de la puissance injectée dans la fenêtre.
- Une dépression générée par un organe mécanique (extracteur) : on considère en général une légère dépression comprise entre 4 Pa et 30 Pa pour un tel système.
- Les effets de pression du vent sur les façades.

Une étude réalisée par le CSTB [5, 6] sur une fenêtre pariétodynamique classique a montré que pour une différence de pression inférieure à 30 Pa, le fait de faire circuler l'air entre les vitrages d'une fenêtre n'engendrait pas de pertes de charge supplémentaires par rapport à une entrée d'air conventionnelle. Par ailleurs, des essais menés par le cabinet Paziaud SA dans divers logements rénovés ont révélé que les débits mesurés dans les fenêtres pariétodynamiques « classiques » sont compris entre 8 et 15 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> et qu'ils sont relativement constants dans le temps des lors qu'une VMC est présente. Ceci incite à penser que la convection dans la fenêtre est forcée ou mixte. Les vitesses d'air restent faibles mais dans le cas d'une fenêtre chauffante les choses se compliquent un peu. Pour connaître l'influence des effets de pesanteur et la nature de la convection, on utilise habituellement le nombre de Richardson Ri. Si ce nombre est très inférieur à 1, la convection est forcée. Ce critère est remis en cause par Padet [7] qui considèrent que seul le coefficient de poussée thermique Ri.Re est représentatif de la nature de la convection :

$$R_i \cdot R_e = \frac{\rho \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D_h^2}{\mu \cdot V} = 14400 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot e^3 \cdot l}{\mu \cdot \dot{Q}_v} \text{ avec } \dot{Q}_v \text{ exprimé en m}^3/\text{h} \quad (1)$$

En convection mixte dans un canal délimité par deux surfaces planes, le profil de vitesse est influencé par la différence de température entre les deux parois. Cette différence sera importante pour la fenêtre chauffante. Le profil aura tendance à s'incliner vers la paroi chaude et un écoulement à contre-courant peut se former. Selon Padet [7], un écoulement descendant se forme près de la paroi froide lorsque le coefficient de poussée thermique Re.Ri atteint 288. Pour un débit d'air constant, les effets de pesanteur sont de plus en plus importants à mesure que l'épaisseur de la cavité augmente. En effet, si le nombre de Reynolds est constant, l'augmentation de l'épaisseur e de la cavité s'accompagne d'une diminution de la vitesse V en conduite et d'une augmentation des effets de pesanteur (augmentation du nombre de Richardson). Dans le coefficient de poussée thermique, l'épaisseur e de la cavité est à la puissance 3 et paraît être le paramètre le plus influent sur la nature de la convection. Ainsi, si

l'on veut éviter ce phénomène d'écoulement de retour, il est important de maintenir une épaisseur de cavité faible. Dans le cas de la fenêtre chauffante, nous avons considéré que la convection est forcée, le profil de vitesse est supposé, au départ, parabolique et symétrique par rapport à l'axe central de la cavité. Le caractère laminaire ou turbulent de l'écoulement dépend du nombre de Reynolds qui varie en fonction du débit.

### 3. Configuration expérimentale et modèle physique

Les figures (1-a ; 1-b) présentent la fenêtre chauffante lors de son instrumentation et sa mise en place dans les cellules climatiques. Cette fenêtre à vitrage chauffant est formée par une menuiserie en bois prévue pour un démontage complet des vitrages. Les ouvertures pour l'entrée et la sortie d'air sont des espaces rectangulaires entre le sommet des vitrages intérieur et extérieur et la menuiserie, sur toute la largeur de la fenêtre, ce qui permet ici une approche 2D. Dans le bas de la fenêtre, l'air passe sous le vitrage central soutenu par deux petites cales latérales. L'écoulement est donc réalisé dans un canal en U formé par les trois vitres. La fenêtre est équipée de thermocouples de type T et de fluxmètres à gradient tangentiel (Fig. 1-a ; 1-b). Ces capteurs sont placés à l'extérieur et dans la fenêtre selon des plans horizontaux traversant la baie, à plusieurs niveaux de hauteur. La fenêtre est placée entre deux enceintes climatisées.

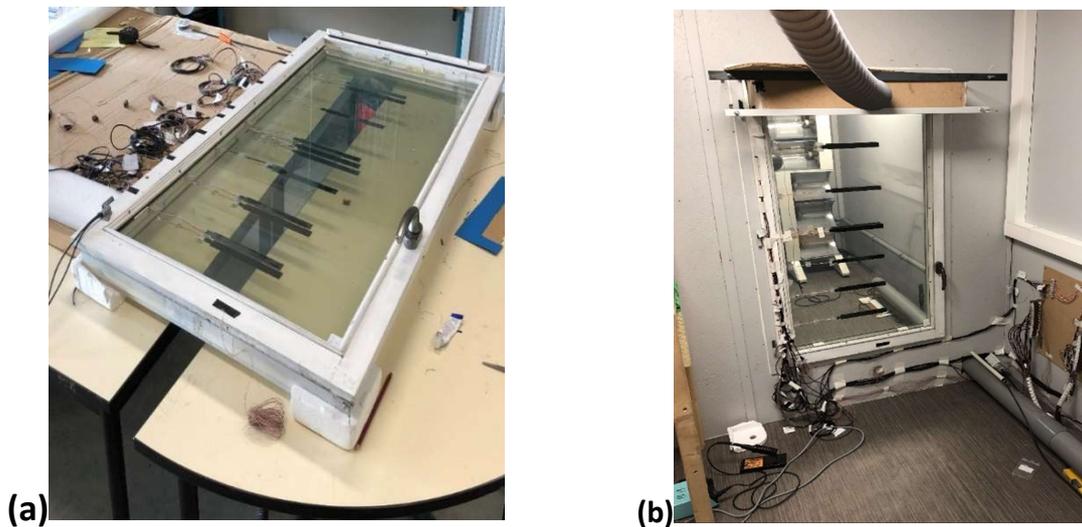


Figure. 1. Description et mise en place de l'expérimentation

Les figures (2-a ; 2-b ; 2-c) présentent les caractéristiques de la fenêtre chauffante, les faces des trois vitres sont repérées de (1 à 6) de l'extérieur vers l'intérieur. Du point de vue numérique, nous avons réalisé sept variantes de maillage de densités différentes pour nous assurer de l'indépendance des résultats. Cette densité varie de (10000 à 235000). La configuration de la fenêtre a été générée avec l'outil DesignModler<sup>®</sup>. Ce module offre plusieurs possibilités pour la création de la géométrie et la définition préalable des conditions aux frontières du modèle. Dans les sept variantes de maillages étudiées nous avons considéré un maillage structuré de mailles quadratiques, c'est-à-dire que dans les deux lames d'air de la fenêtre, les mailles sont uniformes suivant la direction de l'écoulement tandis que latéralement, elles sont resserrées près des parois. Les figures 2-b et 2-c présentent l'architecture du maillage généré pour une densité de 73000 cellules. Dans les zones où l'écoulement change de direction (à l'entrée, en bas de la fenêtre et à la sortie), le maillage est organisé et resserré spécifiquement en fonction de la géométrie des parois.

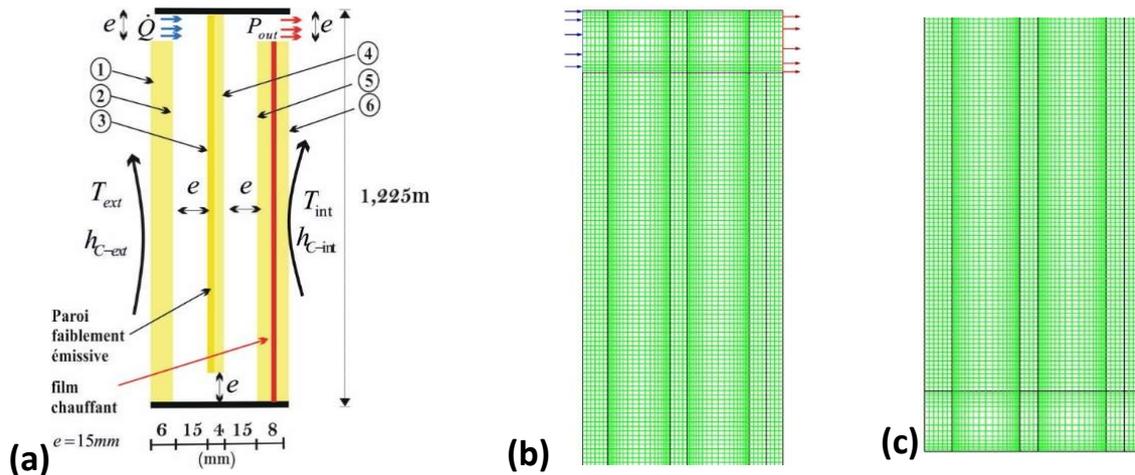


Figure. 2. *Modèle physique de la fenêtre ventilée avec film chauffant*

#### 4. Caractéristiques physique et dynamique de l'écoulement dans la fenêtre

Nous nous intéressons ici plus particulièrement au cas où l'écoulement du fluide est turbulent et en régime permanent. Il est gouverné par les équations de la mécanique des fluides en convection forcée. Les propriétés thermophysiques du fluide sont dépendantes de la température et sont calculées selon les préconisations de la norme ISO-15099 [8]. (fonctions polynomiales). Pour les conditions aux limites nous avons appliqué les conditions mentionnées fig.2-c, un débit massique en entrée de la fenêtre  $Q = 62 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  et une condition de pression en sortie  $P=0$ . De même, pour les deux vitres en contact avec les ambiances nous avons appliqué des conditions de Fourier ( $T_{ext}=278\text{K}$  ;  $h_{c\_ext}=10\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  ;  $T_{in}=297\text{K}$  ;  $h_{c\_int}=5\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ), également, une puissance injectée dans la vitre chauffante de l'ordre de  $475 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Les équations de conservation du problème ne sont pas rappelées ici car elles sont classiques. Elles sont résolues numériquement en utilisant le code de calcul Fluent<sup>®</sup> pour une configuration bidimensionnelle "2D". Elles sont discrétisées sur l'ensemble de la grille. L'algorithme SIMPLE de Patankar et Spalding [9] est employé pour résoudre le couplage entre pression et vitesse. Une solution numérique est supposée converger lorsque les résidus pour les diverses grandeurs physiques deviennent plus petits que  $10^{-8}$ . L'indépendance de cette solution aux différents maillages a été vérifiée pour s'assurer de la précision de nos résultats. Le modèle classique de rayonnement aux ordonnées discrètes (DO) a été utilisé pour résoudre le transfert radiatif de grandes longueurs d'ondes. Notons que pour l'ensemble de l'étude, les rayonnements de courtes longueurs d'ondes ne sont pas pris en compte.

Pour étudier finement la dynamique des transferts dans la fenêtre et approfondir notre compréhension de la structure de l'écoulement, nous avons réalisé plusieurs tests numériques de différents modèles de turbulence disponibles dans fluent et qui peuvent répondre favorablement à notre étude. Nous avons supposé que l'écoulement d'air en régime permanent était incompressible et turbulent. En particulier, cette hypothèse a été faite après s'être assuré que le nombre de Mach en entrée était inférieur à 0,3. De ce fait, en première phase ①, la turbulence a été modélisée en utilisant les modèles : k-EPS : 1-Standard (noté STD), 2-RNG et 3-Realizable, ces trois modèles ont été testés pour prendre en compte les couches limites visqueuses dans la première maille, c'est-à-dire, très près de la paroi. La turbulence est amortie mais elle augmente rapidement quand on s'en écarte. La modélisation des zones proches des parois est fondamentale dans la mesure où elles constituent des zones de production de vorticité et de turbulence. Les fonctions de paroi standards sont celles qui ont été propos es par Launder et al. [10] et utilis es avec succès dans un grand nombre de situations. Dans la seconde phase

② de tests des modèles de turbulence, nous avons utilisé les deux modèles GEKO- $k-\omega$  et SST- $k-w$  "Shear-Stress Transport". Le modèle GEKO à deux équations est compatible pour les écoulements turbulents et les écoulements de transition laminaire-turbulent, le traitement des parois est activé avec une fonction de paroi dite améliorée, ce qui offre la possibilité de résoudre la sous-couche visqueuse (généralement avec le premier nœud proche de la paroi). Le modèle SST a été développé par Menter [11] pour une large gamme d'écoulements turbulents avec des gradients de pression plus ou moins variables. Des modifications ont été effectuées pour prendre en compte le terme de diffusion dans l'équation de transport, ce qui permet de traiter de manière efficace la structure de l'écoulement près de la paroi.

## 5. Résultats et discussion

### 5.1. Mesure de flux thermiques et températures

Les résultats des Figures 3 à 6 correspondent à des conditions thermiques et aérauliques stabilisées et sont obtenus sur la base de valeurs moyennes calculées pour 2 heures d'acquisition avec un pas de temps de 30 secondes ce qui correspond à une moyenne sur 240 points. A première vue, les résultats obtenus sont cohérents et les phénomènes identifiés par les simulations numériques sont confirmés par les essais expérimentaux :

- L'air récupère peu de chaleur dans la première cavité (températures stable). On note que l'évolution de la température d'air se caractérise par une légère augmentation en partie haute 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. L'augmentation de la température d'air est significative. La différence des températures de paroi dans la première lame d'air est faible tandis que celle dans la seconde lame d'air est plus importante sous les influences conjuguées de la puissance injectée dans la vitre « coté intérieur » et de la faible émissivité de la face 3 des vitrages.
- Au niveau de la vitre chauffante, on remarque des perturbations enregistrées sur les courbes de température et de flux en bas de la fenêtre, ce phénomène est lié à la naissance de zones de recirculation au niveau du passage de la lame d'air 1 vers la lame d'air 2. Sur ce dernier point nous avons réalisé une série de tests numériques pour comprendre l'origine de ces perturbations enregistrées dans la partie basse de la fenêtre, ces résultats sont présentés dans le paragraphe 5.2.

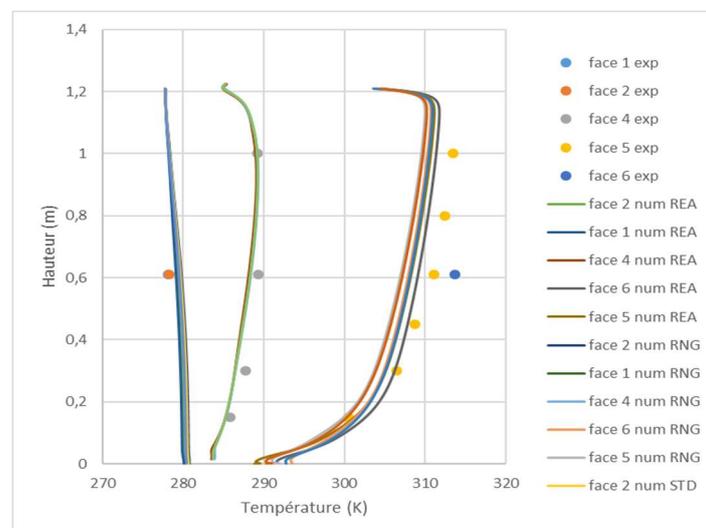


Figure 3. : Températures numériques et expérimentales, Modèles  $k-\epsilon$ s avec loi de paroi.

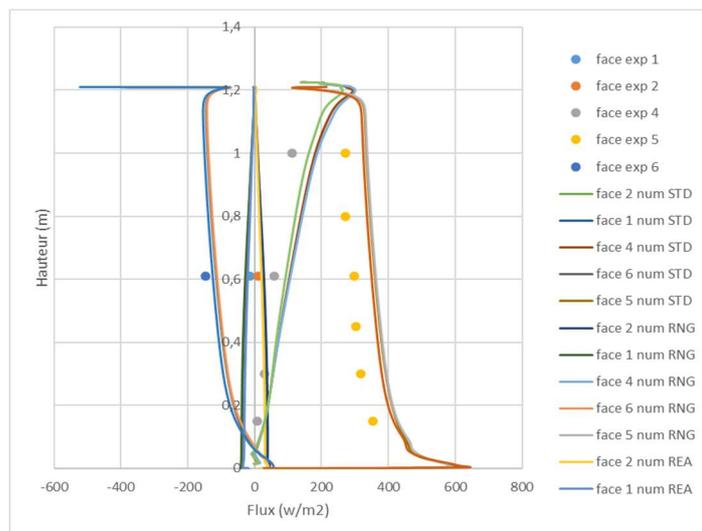


Figure 4 : Flux numériques et expérimentaux, Modèles *k-eps* avec loi de paroi.

En ce qui concerne les modèles de turbulence, on constate que le modèle GEKO décrit correctement le comportement thermique et dynamique dans la fenêtre, on constate sur les courbes de température fig.3 et 5 une très bonne correspondance entre les courbes numériques et expérimentales, et on observe que les modèles de turbulence *k-eps* amènent à une sous-estimation des températures sur la face 5 de l'ordre de 3K.

Les modèle *k-w* donnent dans l'ensemble de très bonnes estimations mis-à-part, en bas de la fenêtre où l'écart relatif entre les températures obtenues numériquement et expérimentalement est sans doute lié à une recirculation. Par rapport aux courbes de flux thermiques, on constate que les courbes obtenues par le modèle *k-w* sont proches des mesures avec un écart relatif de moins de 3% figure 6. En revanche, la confrontation entre les modèles *k-eps* et les résultats expérimentaux révèle un écart très important (> 12%) visible sur la figure 4 et ceci pour les différentes mesures de flux effectuées sur les 6 faces des vitres de la fenêtre.

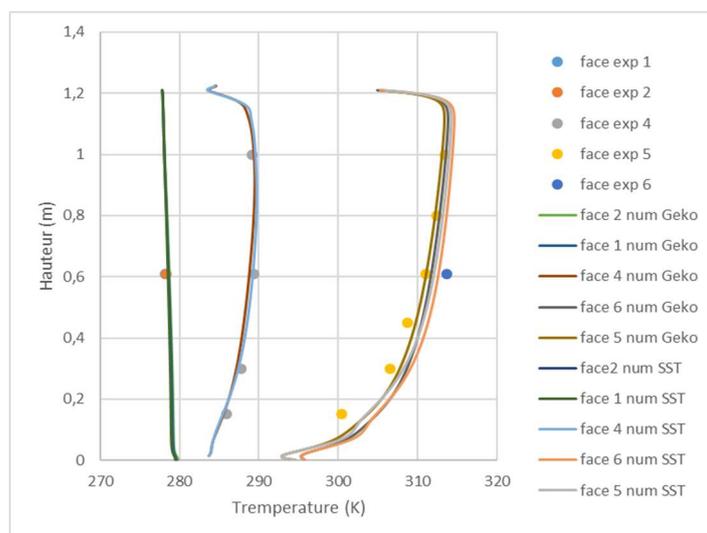


Figure 5 : Températures numériques et expérimentales pour les 3 vitres, Modèles *k-w*

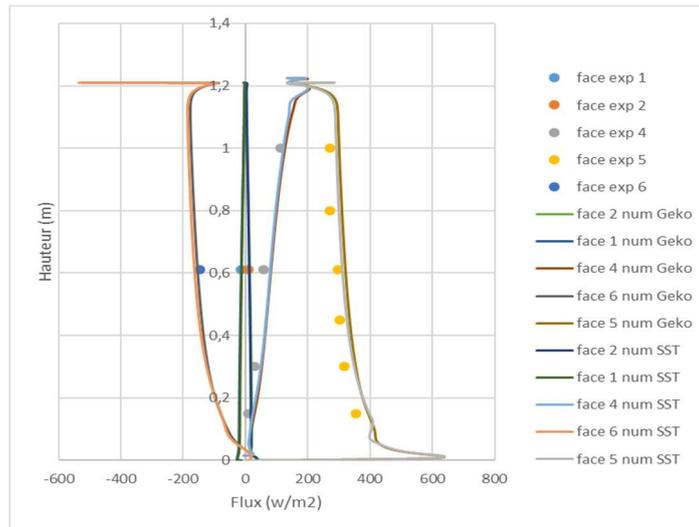


Figure 6 : Flux numériques et expérimentaux pour les 3 vitres, Modèles  $k-w$

## 5.2. Ligne de courants

Dans cette partie nous avons étudié la dynamique de l'écoulement dans la fenêtre en utilisant le modèle GEKO, les figures (7-a, b et c) présentent les lignes de courants en bas de la fenêtre, la fig. 7-a présente les lignes de courant enregistrées dans le 1<sup>er</sup> modèle utilisé pour la confrontation avec les essais expérimentaux, dans les deux autres cas 7-b et 7-c nous avons pratiqué un chanfrein sur les trois vitres dans un but de libérer d'avantage l'écoulement et diminuer les pertes de charges lorsque l'écoulement change de direction. Pour le cas 7-c, le passage de l'air dans le bas de la fenêtre a été élargi :  $e=30$  mm au lieu de 15 mm.

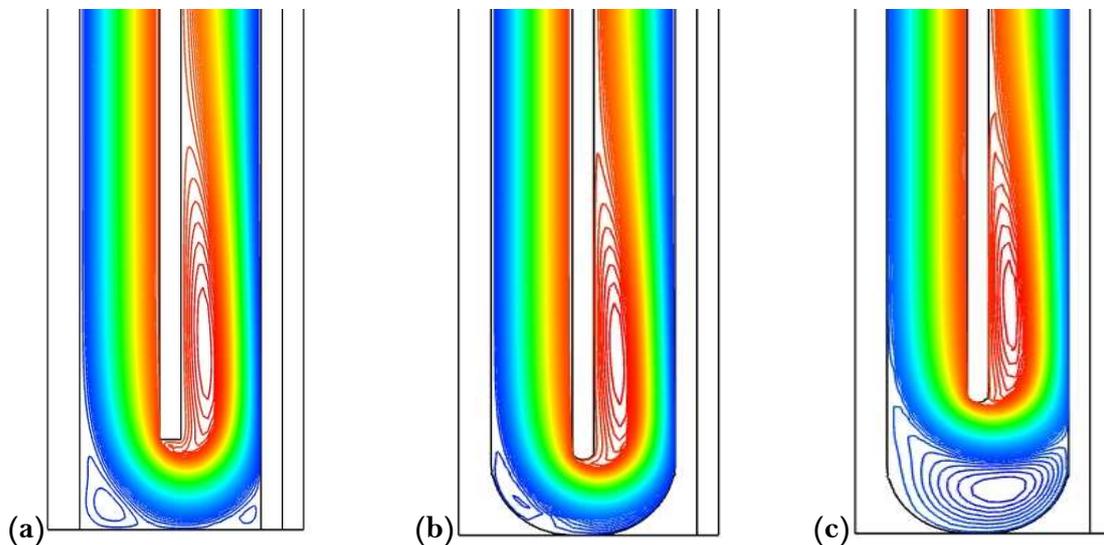


Figure 7. : lignes de courant dans différentes configurations pour la fenêtre chauffante

En comparant ces trois figures nous pouvons faire les remarques suivantes :

Dans le cas « a » les lignes de courants sont modifiées de manière significative en bas de la fenêtre au niveau de plusieurs zones de recirculation avec des dimensions et des formes très variables. La modification de la dynamique de l'écoulement est bien visible dans cette zone. Dans le cas « b » on remarque la disparition des zones de recirculation en bas de la face 5 de la vitre chauffante, de même, on enregistre un changement et une transformation de la zone de recirculation du côté face 2. Cette nouvelle forme de l'écoulement dans la fenêtre sera favorable

dans la mesure où l'on souhaite créer un écoulement pleinement développé dans toute la section du conduit. Pour le dernier cas « c », on remarque que l'élargissement du passage de l'air sous la vitre centrale n'est pas nécessaire pour changer à la fois, le régime de l'écoulement (turbulent vers laminaire) dans cette section et chasser les zones de recirculations. En revanche, par rapport à la vitre 2, face 4, on constate, dans les trois figures (7-a ; 7-b ; 7-c) une zone de recirculation de forme elliptique étalée sur quelques centimètres du bas de la fenêtre. Il serait intéressant dans la suite de ce travail, d'analyser l'effet de l'épaisseur de la seconde lame d'air sur la modification voire la disparition de cette zone.

## 6. Conclusion

Dans cet article nous avons mené une double démarche expérimentale et numérique pour étudier la structure de l'écoulement dans une fenêtre pariétodynamique chauffante lorsque le régime de l'écoulement est turbulent. Plusieurs modèles de turbulence ont été testés et comparés aux résultats expérimentaux. Les premiers résultats obtenus montrent une très bonne concordance avec les modèles k-w, ceci est valable pour l'ensemble des mesures (température et flux thermique) réalisées dans la fenêtre, en revanche, les modèles de turbulence k-eps avec une loi de paroi améliorée révèlent une grande faiblesse pour l'estimation des températures et flux de chaleur dans la fenêtre

## 7. Références

- [1] G. A. Powell, Automatic ventilator window. 1962.
- [2] R. F. Boehm et K. Brandle. 1980. "Testing of Air-Flow Windows for Evaluation and Application. *Dans Solar Energy Conference. Reno, Nevada, USA*
- [3] T. Korkala. P. Sarnia et V. Siitonen. Air Intake Arrangements of the Supply Air Window from the View of Comfort and Ventilation Efficiency." *Proceeding Windows in Buildings. Suède. 1984.*
- [4] J. Paziard. Fenêtre à isolation dynamique par circulation d'air. 1983.
- [5] CSTB. 1995. Rapport d'essais n°35078.
- [6] CSTB. 1995. Rapport d'essais n°35078.
- [7] J. Padet, R. Cotta, N. C. Chereches, N. El Wakil. Convection laminaire interne : critères de sélection pour distinguer les régimes de convection naturelle, mixte ou forcée. In : Congrès français de thermique - La maîtrise de l'énergie, 30 ans après. Reims, France : *Société Française de Thermique.* (2005).
- [8] ISO. 2003. "Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices - Detailed Calculations". Norme n°15099.
- [9] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. *New-York : McGraw-Hill.* 1980.
- [10] B. E. Launder, D. B. Spalding. The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3 :269-289, 1974.
- [11] F. R. Menter. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8) :1598-1605, August 1994.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leurs remerciements à l'ADEME pour son soutien à ce projet (NTE Nouvelles Technologies émergentes – Varieto) réalisé en collaboration avec nos collègues du LASIE et l'entreprise Ridoret à La Rochelle qui étaient impliqués sur d'autres aspects liés au développement du composant fenêtre ventilée chauffante.