

Analyse des échanges radiatifs et convectifs dans un canal rectangulaire ventilé ouvert, soumis à des sollicitations thermiques asymétriques

Mariam KHADRA¹, Annabelle JOULIN, Pierre TITTELEIN, Stéphane LASSUE

Univ. Artois, Ecole des Mines, FUPL, Univ. Lille, EA 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), F-62400 Béthune, France

Résumé - Cet article traite de l'étude d'un système pariéto-dynamique destiné à la rénovation par l'extérieur des bâtiments. Le composant étudié est opaque, et est associé à un dispositif forçant la circulation d'air dans la paroi et qui permet ainsi de récupérer une partie de l'énergie solaire incidente et des déperditions thermiques du bâtiment. Dans le cadre de notre étude, des modélisations ont été conduites à l'aide du logiciel de CFD Fluent® et permettent de discuter de l'importance de différents paramètres physiques et dynamiques sur la qualité et l'efficacité des transferts thermiques à l'intérieur de la cavité ventilée. Ces premiers résultats nous permettent également d'étudier les particularités du comportement du fluide en mouvement dans cette configuration et d'analyser l'incidence du flux solaire absorbé sur une des faces de la lame d'air sur les profils de vitesses, de températures et les densités de flux échangés.

Nomenclature

\dot{m}	Débit massique, $kg.s^{-1}$	E	Eclairement énergétique, W/m^2
C_p	Chaleur spécifique, $J/kg. °C$	<i>Symboles grecs</i>	
e	Epaisseur de la lame, m	η	Rendement
l	Largeur de la lame, m	<i>Indices et exposants</i>	
H	Hauteur de la lame, m	ext	extérieur
S	Surface, m^2	int	intérieur
U	Vitesse, $m.s^{-1}$	1	bardage
hc	Coefficient d'échange convectif, $W.m^{-2}. °C^{-1}$	2	isolant
Ri	Nombre de Richardson	air	air
T	Température, $°C$	e	entrée
q_{sol}	Flux solaire incident, W/m^2	s	sortie
F	Densité de flux, W/m^2	rad	radiatif

1. Introduction

Les systèmes pariéto-dynamiques sont des composants bioclimatiques qui permettent la limitation des déperditions thermiques et la récupération des énergies solaires et fatales. Les parois étudiées peuvent offrir de nombreuses possibilités telle que la récupération de la chaleur pour le chauffage d'un local par exemple en préchauffant l'air neuf de ventilation ou pour la préparation d'eau chaude sanitaire via l'utilisation d'une pompe à chaleur. Ils interviennent donc principalement sur trois domaines : l'isolation, le chauffage/refroidissement et la ventilation. Tout l'intérêt de ce type de système réside dans l'association et la complémentarité de ces différents aspects. On peut trouver dans la littérature de nombreux travaux plus ou moins récents dans lesquels plusieurs modèles expérimentaux et simulations numériques ont été réalisés dans le but d'évaluer les performances de ces parois ventilées et leurs atouts par rapport à des choix constructifs classiques [1–3]. Le composant est intéressant du point de vue thermique car il met en jeu différents modes de transferts de chaleur et tout particulièrement au

niveau des échanges convectifs qui se situent dans le domaine des lames d'air verticales différemment chauffées dans lesquelles l'air circule à basse vitesse sous les effets combinés d'une mise en dépression mécanique et d'une surface chaude qui engendre un effet « cheminée » naturel. Les limites entre les convections forcée, mixte et naturelle sont donc à explorer. Selon la configuration géométrique, les caractéristiques physiques des composants et la dynamique des sollicitations, les comportements peuvent être très différents et parfois difficiles à maîtriser. Le passage des études plus ou moins théoriques vers des configurations réelles de composants soumis à des sollicitations naturelles in-situ n'est pas évident. De même l'évaluation de leur impact sur les performances des bâtiments dans les logiciels de simulations dynamiques nécessite de mettre au point des modèles relativement simples mais fiables.

Cet article présente la modélisation via un logiciel de MFN de la lame d'air ventilée d'un composant pariéto-dynamique. Nous étudions en particulier ses performances et cherchons à caractériser les échanges convectifs par le calcul des coefficients de convection nécessaires pour une modélisation en simulation thermique dynamique de bâtiments.

2. Configuration géométrique et description du problème

L'air circule dans un canal rectangulaire entre deux parois opaques. La hauteur du canal est de 2,5 m et son épaisseur est de 0,05 m. La paroi est globalement constituée de trois éléments : un bardage mince, en contact avec l'environnement extérieur ($e_b=0,01$ m), un canal vertical ventilé et une paroi isolante ($e_i=0,2$ m). Le dispositif est placé sur un mur existant dans le cas par exemple d'une rénovation par l'extérieur. De l'air à la température extérieure pénètre par le bas dans la cavité, circule dans la lame d'air et est récupéré dans la partie haute (voir figure 1).

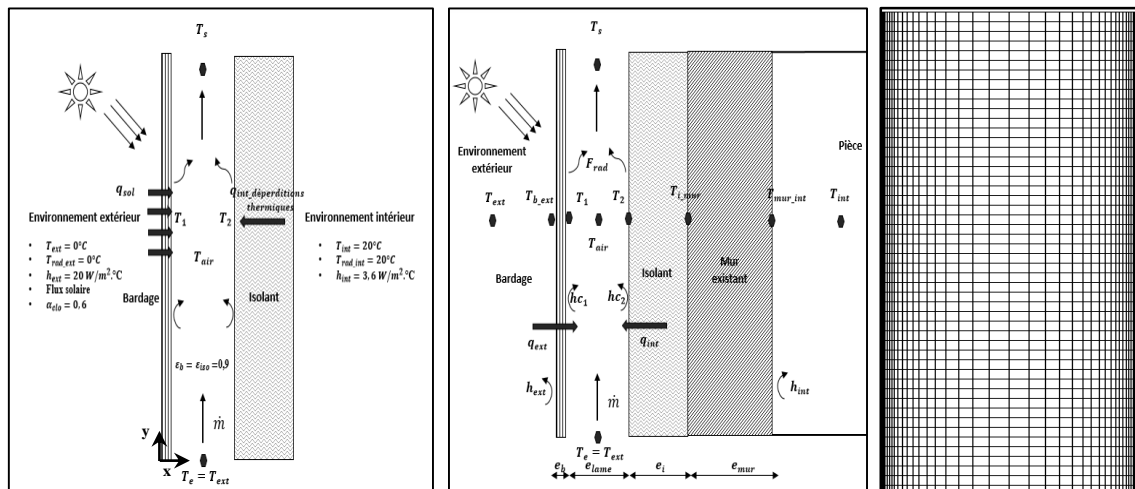


Figure 1 : De gauche à droite : Schéma de principe de la paroi ventilée simulée, couplage avec le bâtiment et maillage étudié.

3. Simulation numérique

Afin de modéliser les performances de ce type de systèmes, une première étape consiste à définir un modèle physique simple, approprié, capable de décrire les phénomènes et échanges thermiques de la manière la plus réaliste possible. Les simulations numériques sont réalisées pour une géométrie et un écoulement d'air bidimensionnels en régime stationnaire. Pour simplifier le problème, on suppose que le canal est suffisamment large dans la direction normale au plan d'étude, de façon à ce que l'écoulement puisse être considéré comme bidimensionnel.. Une seconde étape dans la résolution numérique du problème consiste à caractériser les échanges thermiques qui s'opèrent dans le dispositif. La paroi ventilée est caractérisée par la présence simultanée de trois types de transfert : la conduction, la convection et le rayonnement. La transmission de chaleur s'effectue par : les échanges convectifs et radiatifs entre les parois

extérieure et intérieure avec respectivement les milieux ambiants extérieur et intérieur, conduction dans les parois solides, rayonnement infrarouge entre les parois solides dans la lame d'air, et des échanges convectifs entre les parois solides et l'air qui circule dans le canal. La paroi intérieure est isolante (quasiment adiabatique), le bardage extérieur est conducteur. Le système n'a donc quasiment pas d'inertie et l'étude portera ici plus particulièrement sur la lame d'air en faisant l'hypothèse du régime permanent.

Le modèle a été créé en utilisant le logiciel commercial Fluent®. Concernant les résultats présentés ici, nous avons modélisé le dispositif sans prendre en compte le mur existant afin de définir les performances thermiques et énergétiques propres du dispositif. Plusieurs maillages ont été testés ce qui nous a conduit à travailler sur un maillage structuré non uniforme (40×1000) et raffiné près des parois latérales. Une étude de sensibilité a été effectuée à ce niveau afin de vérifier l'indépendance des résultats vis-à-vis du maillage.

L'air pénètre à l'intérieur du dispositif par le bas à la température extérieure T_{ext} et circule dans le canal en récupérant éventuellement un peu de flux de chaleur provenant de l'ambiance intérieure et une partie du rayonnement solaire absorbé par le bardage. Les conditions aux limites sont définies en accord avec la norme ISO-15099 sur l'évaluation des performances de parois vitrées et systèmes de protections solaires [4] et correspondent à des conditions hivernales. Cette norme propose un modèle pour déterminer les transferts thermiques dans un conduit formé par deux plans parallèles, dans lequel de l'air circule à une vitesse connue. La température d'air extérieure est imposée à 0°C , tandis que la température à l'intérieur de la pièce est maintenue à 20°C . Dans notre configuration, un débit massique à l'entrée du canal est imposé et peut varier de $0,02 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ à $0,05 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Cette gamme de variation a été définie sur la base du couplage de notre paroi à un modèle de bâtiment en calculant les besoins en air de renouvellement de ce dernier. Les coefficients d'échange superficiels intérieur et extérieur sont respectivement fixés à $h_{int}=3,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ et $h_{ext}=20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$. Le flux solaire q_{sol} peut varier entre $0 \text{ W}/\text{m}^2$ et $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ selon la configuration choisie. Les températures radiantes moyennes T_{rad_ext} et T_{rad_int} sont égales aux températures de leurs environnements respectifs.

Les échanges radiatifs considérés sont d'une part les apports solaires absorbés en partie par le bardage et, d'autre part, les échanges radiatifs entre les surfaces opaques dans la cavité ventilée. Le modèle de rayonnement aux ordonnées discrètes [5] a été utilisé ici. Le rayonnement solaire absorbé est simulé dans le logiciel sous la forme de sources internes dans le premier millimètre d'épaisseur du bardage sur toute la hauteur, homogènement. Les critères de convergence ont été fixés à 10^{-4} pour l'équation de la continuité et de 10^{-6} pour l'énergie, pour la vitesse et le rayonnement. Les propriétés thermo-physiques 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. La force de pesanteur est également prise en compte.

4. Résultats Numériques

Les résultats numériques présentés ici sont réalisés pour des valeurs de débits et de flux solaires différents. Quand l'air extérieur pénètre dans la cavité, il est chauffé par convection par contact avec le bardage lui-même chauffé par le flux solaire extérieur. Selon la valeur du gradient de température engendré par l'absorption du flux solaire incident une force motrice additionnelle et naturelle participe aux mouvements du fluide. On peut alors se trouver dans des configurations de convection mixte. En effet, la convection peut être naturelle, mixte ou forcée selon les sollicitations auxquelles est soumis le bardage. La détermination de la valeur des coefficients d'échange convectifs de part et d'autre de la lame d'air n'est pas évidente[6], notamment à cause de la variation des températures et des flux sur la hauteur. En effet ces variables sont grandement impactées par l'effet de paramètres tels que le rayonnement solaire, la vitesse en entrée etc...De plus, une étude paramétrique sur l'épaisseur est présentée pour évaluer l'impact de ce paramètre sur la récupération de chaleur et la nature de la

convection. Nous avons dans un premier temps, calculé la température de mélange moyenne dans la lame d'air $T_{air}(x)$ [7] définie comme suit :

$$T_{air}(x) = \frac{1}{UH} \int_0^H u(y).T(x,y).dy \quad (1)$$

Il s'agit de la température de l'air pondérée par la vitesse avec U la vitesse moyenne, H la hauteur de la section, $u(y)$ et $T(x,y)$ respectivement la vitesse locale et la température locale. Ce paramètre est indispensable pour le calcul des coefficients d'échange convectif afin de caractériser plus précisément le mode de transfert et d'évaluer les performances du composant.

4.1 Variation des coefficients d'échange convectifs

L'objectif étant de créer un modèle simplifié du composant pour effectuer un couplage avec la simulation thermique dynamique du bâtiment, l'évaluation des coefficients d'échange convectif est importante. Habituellement [4], on considère ces coefficients identiques de part et d'autre de la lame d'air. Les figures suivantes permettent de constater que cette hypothèse n'est pas forcément satisfaisante dans notre cas (voir figures 2 et 3). Les coefficients d'échange convectif sont calculés à partir du flux convectif et de la différence de température entre la paroi et la température de mélange.

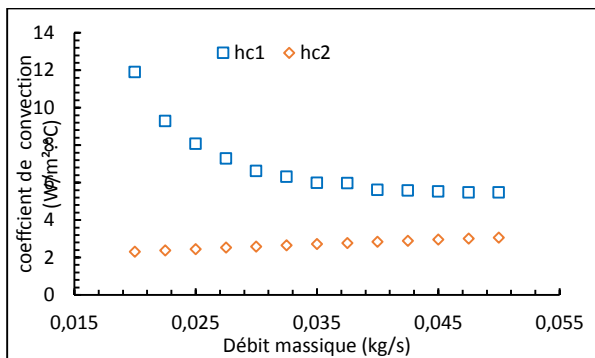


Figure 2 : Coefficient de convection en fonction du débit d'air pour une lame d'épaisseur 0,05 m sans flux solaire

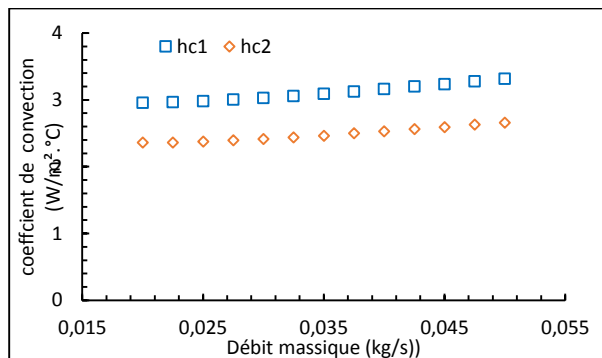


Figure 3 : Coefficient de convection en fonction du débit d'air pour une lame d'épaisseur 0,05 m et un flux solaire de 300 W/m²

Les graphes précédents montrent que les coefficients h_{c1} et h_{c2} varient selon la valeur du débit imposé mais également selon la présence ou non de rayonnement solaire. Sur la figure 2 (sans flux solaire), pour le coefficient h_{c1} , on remarque qu'il a tendance à diminuer à mesure que le débit augmente. Cela s'explique par le fait, qu'ici la seule source de chaleur provient des déperditions thermiques qui sont en réalité très faibles. Plus le débit augmente, moins le bardage récupère de chaleur et donc a tendance à moins en restituer à la lame. La température moyenne de l'air dans la lame augmente tout au long de son ascension dans le canal. La température du bardage se rapproche de celle de l'air et il y a donc très peu d'échange. L'intérêt du composant dans ce premier cas de figure est uniquement de récupérer les déperditions thermiques du bâtiment. Par contre, dans le cas d'un flux solaire imposé, les coefficients ont tendance à augmenter avec le débit. Ces études mettent en avant le manque d'intérêt à utiliser le composant en l'absence de flux solaire surtout dans notre cas où les déperditions sont extrêmement faibles à cause de l'isolant en place.

4.2 Evolution de la température de mélange avec le débit

Nous avons tout d'abord vérifié que lorsque l'on a un flux solaire incident nul ou très faible, quel que soit le débit massique imposé en entrée, les variations de températures dans la lame sont extrêmement faibles. On remarque dans ce cas-là, une très faible évolution de la température d'air à mesure de son évolution dans le canal. Ce phénomène devient significatif

et intéressant lorsque l'on impose un flux solaire (figure 4). De plus peu importe la présence ou non de flux solaire, on remarque également que plus le débit d'air augmente plus la température de mélange de l'air diminue (figure 5). Les courbes se distinguent sur la hauteur et on note que l'augmentation des températures de parois a un net impact sur la température de mélange.

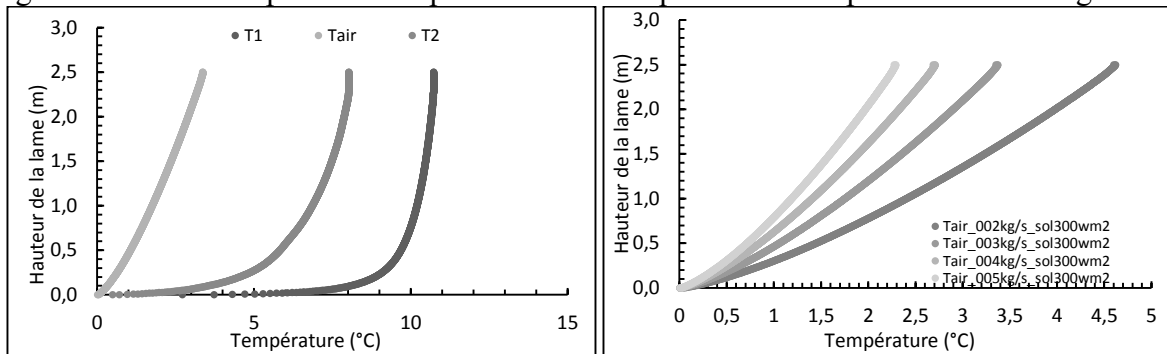


Figure 4 : Evolution de la température de l'air dans la cavité et des températures aux interfaces paroi-air avec $\dot{m}=0,03 \text{ kg/s}$ et avec un flux solaire de 300 W/m^2

Figure 5 : Evolution de la température de l'air dans la cavité en fonction de la hauteur pour différents débits et avec un flux solaire de 300 W/m^2

4.3 Influence de l'apport solaire

A l'entrée du canal, l'air se réchauffe sur les parties proches des parois solides alors qu'on retrouve au centre de la cavité, hors des couches limites, une température proche de $T_{\text{entrée}}$. Quelle que soit la hauteur, les plus importantes valeurs de température sont observées à proximité des parois. (Figure 6). On constate une inclinaison des profils de température et de vitesses provoquée par l'entraînement de l'air vers les parois. La température de l'air augmente tout au long de son évolution dans le canal. La vitesse évolue localement et le profil est très influencé par la température du bardage (figure 7). La température des parois reste plus élevée que celle de l'air. Le flux solaire est le paramètre qui conditionne le chauffage dans la cavité (figure 8) ainsi que les profils de vitesse. Ces derniers diffèrent fortement en sortie du canal selon l'intensité du flux solaire. On note que lorsque l'on a un flux solaire très faible, on obtient un profil de vitesse quasi parabolique (figure 9). Les figures 10 et 11 représentent l'évolution des températures de surface et des flux pariétaux avec le flux solaire. Elles confirment que le flux au niveau de l'isolant (F2) est très faible voire négligeable par rapport au flux au niveau du bardage (F1) dès que le flux solaire est non nul.

Les écarts de température dans la zone d'entrée du canal sont assez faibles. Le profil de température est relativement plat en entrée lorsque le flux solaire imposé est faible et a tendance à se déformer avec des inflexions croissantes près des parois solides. Au centre, le profil n'est plus trop influencé par la variation de flux solaire. Les profils de vitesses deviennent dissymétriques avec des valeurs maximales à proximité des parois solides et des valeurs minimales au centre de l'écoulement à mesure que le flux solaire augmente. Cela montre nettement une corrélation reliant l'intensité du flux solaire à la variation de la vitesse dans le canal.

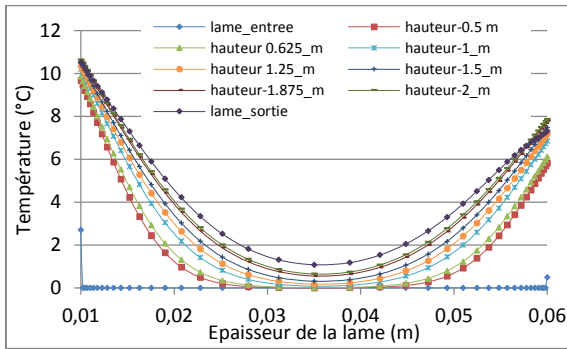


Figure 6 : Profil de température à différentes hauteurs dans la lame pour $e=0,05m$, $q_{sol}=300$ W/m^2 et $\dot{m}=0,03$ kg/s

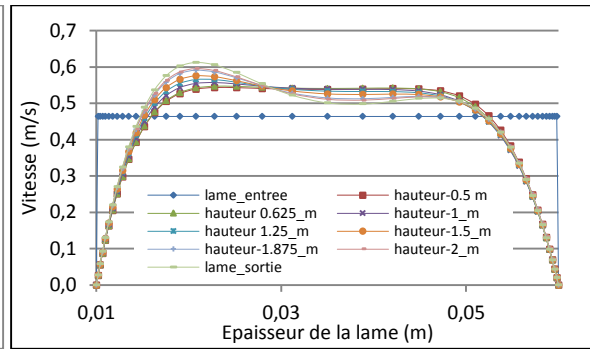


Figure 7 : Profil de vitesse à différentes hauteurs dans la lame pour $e=0,05m$, $q_{sol}=300$ W/m^2 et $\dot{m}=0,03$ kg/s

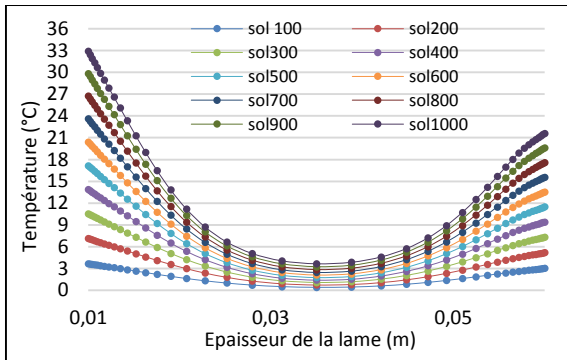


Figure 8 : Comparaison des profils de températures en sortie de lame en fonction du flux solaire imposé

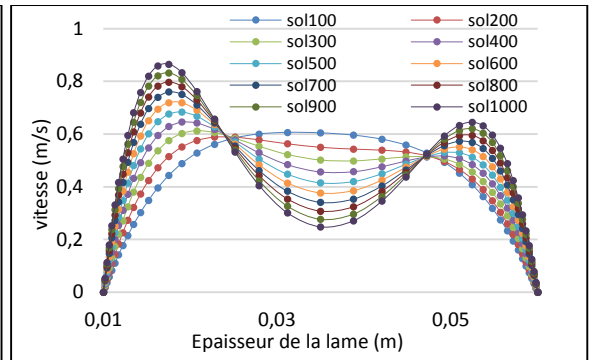


Figure 9 : Comparaison des profils de vitesses en sortie de lame en fonction du flux solaire imposé

Les échanges thermiques au niveau du bardage dépendent de paramètres tels que l'éclairement et la température extérieure. Le rendement η de la paroi ventilée peut être calculé comme étant le rapport entre l'énergie récupérée par le composant et l'énergie solaire incidente (corrélation utilisée par Mitogo Eseng [8]) :

$$\eta = \frac{\dot{m}C_p(T_s - T_e)}{E} \quad (2)$$

Avec \dot{m} le débit massique en kg/s et E l'éclairement énergétique (W/m^2).

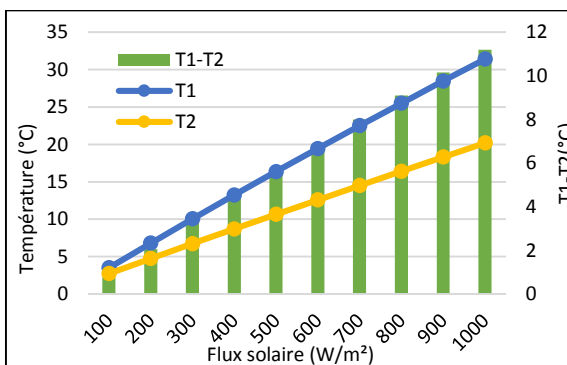


Figure 10 : Evolution des températures de parois selon le flux solaire

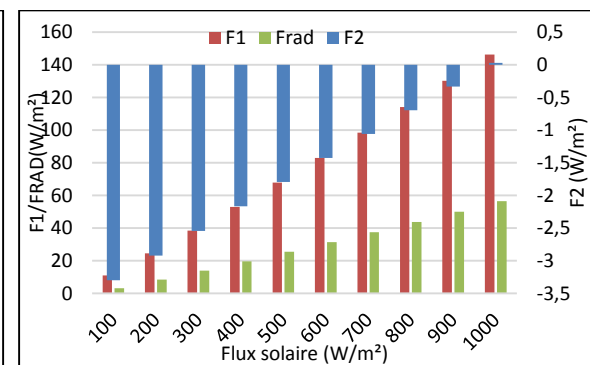


Figure 11 : Evolution des flux selon le flux solaire

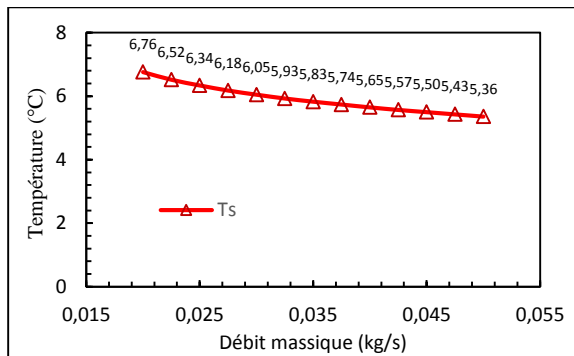


Figure 12 : Température en sortie de la lame selon le débit avec $q_{sol} = 300 \text{ W/m}^2$

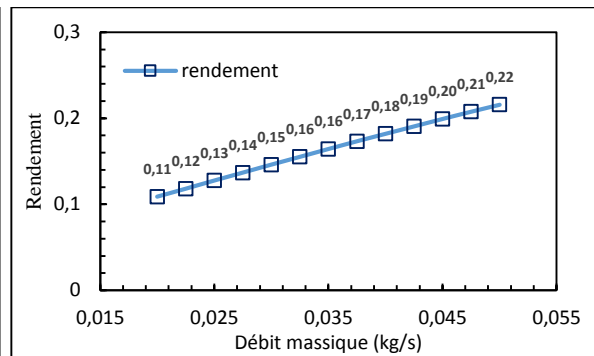


Figure 13 : Rendement de la lame d'air selon le débit avec $q_{sol} = 300 \text{ W/m}^2$

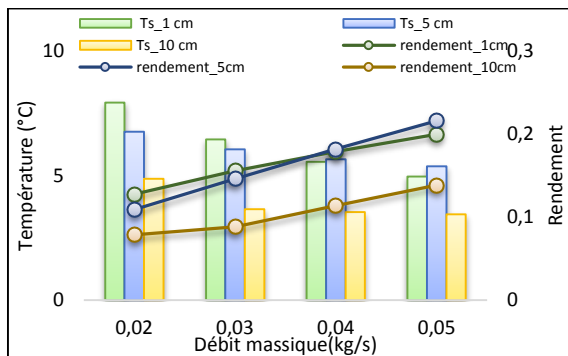


Figure 14 : Evolution de la température en sortie en fonction de l'épaisseur de la lame et du débit, et calcul du rendement du dispositif

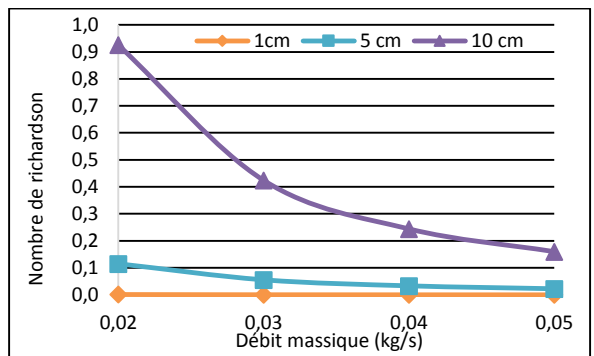


Figure 15 : Nombre de Richardson en fonction de l'épaisseur et du débit d'air

Sur la figure 12, on remarque que la température de sortie diminue légèrement au fur et à mesure de l'augmentation du débit. On remarque que lorsque le débit augmente, le rendement augmente également (Figure 13).

Il faut toutefois être vigilant car l'augmentation du rendement du composant ne signifie pas forcément une augmentation globale de la performance du bâtiment dans lequel il est intégré. Si l'air est directement injecté dans le bâtiment, il est important de ne pas dépasser une certaine valeur de renouvellement d'air pour ne pas sur-ventiler la maison et ainsi dégrader ses performances thermiques. Seule une simulation thermique globale du bâtiment pourra nous permettre d'optimiser le système. Si par contre on utilise le composant en amont d'un système de type échangeur ou pompe à chaleur, on peut se permettre d'avoir des débits plus importants

4.4 Influence de l'épaisseur de la lame d'air

L'épaisseur de la lame d'air est un paramètre qui influe aussi sur la récupération d'énergie. On peut remarquer qu'il existe une épaisseur optimale à laquelle on récupère une température de sortie croissante (figure 14). Le modèle avec une épaisseur de lame d'air de 5 cm fournit un rendement croissant pour les différents débits testés à mesure que ces derniers augmentent. On ne constate pas le même phénomène pour les autres épaisseurs. De plus, modifier ce paramètre peut influencer sur le type de convection dans la lame (figure 15). On peut le constater sur la figure 15 avec le calcul du nombre de Richardson. Typiquement, la convection naturelle est négligeable lorsque $Ri < 0,1$, la convection forcée est négligeable quand $Ri > 10$, et les deux ne sont pas négligeables lorsque $0,1 < Ri < 10$. Dans notre cas, la convection forcée est généralement prépondérante par rapport à la convection naturelle, excepté dans le cas de vitesses d'écoulement forcé extrêmement faibles.

5. Conclusion

Un calcul stationnaire a été réalisé pour évaluer les performances énergétiques de la paroi ventilée durant la période hivernale. Les profils de vitesses et de températures ont été calculés pour différentes épaisseurs de cavités, de flux solaire, de débits. Les conclusions majeures sont les suivantes :

- Le système n'est pas productif quand il n'y a pas de flux solaire en période hivernale (les pertes de chaleur par le mur sont trop faibles et les transferts entre la lame et l'environnement extérieur sont quasi-nuls).
- Les profils de température et de vitesse sont sensibles aux variations des conditions extérieures.
- Si l'épaisseur du canal augmente, cela influe sur le type de convection et l'efficacité du système diminue
- Le rendement augmente si le flux solaire augmente. Donc il est recommandé d'utiliser ces parois dans des zones avec des flux solaires importants.
- L'augmentation de la vitesse à l'entrée entraîne la baisse de la température d'air en sortie mais une augmentation du rendement global du composant.

Les simulations numériques réalisées nous ont permis d'identifier les paramètres les plus influents sur les coefficients d'échange convectif dans la lame d'air. Il sera donc possible de construire une corrélation pour le calcul de ces coefficients permettant d'avoir des résultats cohérents dans la modélisation de la paroi couplée à un bâtiment en simulation thermique dynamique.

Bibliographie

- [1] R.Oesterle, R.Lieb, M.Lutz, W.Heusler, Double Skin Facades – Integrated Planning, *Prestel verlag. germany*, (2001).
- [2] A. Brun, Amélioration du confort d'été grâce à la ventilation de l'enveloppe, *Thèse de doctorat*, Université de Grenoble, France, (2011).
- [3] K. Imessad, N. A. Messaoudene, and M. Belhamel, Performances of the Barra–Costantini passive heating system under Algerian climate conditions, *Renew. Energy*, vol. 29, no. 3, pp. 357–367, (Mar. 2004).
- [4] AFNOR, Norme ISO-15099, Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed Calculations. (2003).
- [5] W. Fiveland, *Discrete-Ordinates Solutions of the Radiative Transport Equation for Rectangular Enclosures*. *Journal of Heat Transfer* 106: 699–706. (1984).
- [6] F. Gloriant, Caractérisation et modélisation d'une fenêtre pariéto-dynamique à trois vitrages, *Thèse de doctorat*, Université d'Artois, France, (2014).
- [7] R. K. Shah, A. L. London, *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*, *Advanced in Heat Transfer*, Academic Press. New-York. (1978).
- [8] J.N. Mitogo Eseng, Quantification expérimentale des performances d'un dispositif de bardage avec lame d'air tampon et parement en bois, *Thèse de doctorat*, Université Bordeaux 1, (2012).