

Modélisation et validation expérimentale des transferts thermiques dans une paroi isolante complexe associant des lames d'air allongées et des faces peu émissives.

Nada CHAMI*, Assaad ZOUGHAIB

Centre Energétique et Procédés – Paris, 60 boulevard St-Michel, 75006, Paris

*nada.chami@ensmp.fr

Résumé - Les produits minces réfléchissants sont présents sur le marché européen depuis la fin des années 1970, surtout en rénovation quand l'utilisateur ne dispose que de peu de place. L'usage de ces produits s'est beaucoup développé sans réelle évaluation consolidée et des interrogations subsistent quant aux performances effectives qu'ils permettent d'atteindre dans les bâtiments.

Dans cet article, une évaluation des performances thermiques des isolants minces associés à 1 ou 2 lames d'air non ventilées est réalisée par modélisation. Les configurations évaluées correspondent aux poses les plus fréquentes de ce type d'isolant. Une étude expérimentale utilisant la boîte chaude gardée valide les résultats du modèle.

Nomenclature

H	hauteur de la lame d'air, m	ε	émissivité thermique
L	épaisseur de la lame d'air, m	ϕ	angle d'inclinaison, $^{\circ}$
q	densité de flux thermique, $W.m^{-2}$	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
R	résistance thermique, $m^2.K.W^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
h	coefficient d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$	σ	constante de Stefan-Boltzmann
S	surface, m^2	ν	viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$
T	température, K	<i>Indices et exposants</i>	
C_p	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	a	au niveau de la lame d'air
g	accélération gravitationnelle, $m.s^{-2}$	c	froide
a	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$	ce	convection avec l'extérieur
<i>Symboles grecs</i>		ci	convection avec l'intérieur
β	coefficient de dilatation thermique, K^{-1}	h	chaude

1. Introduction

Un produit mince réfléchissant (PMR) est constitué d'une partie centrale formée d'une couche mince de matériau (mousse plastique, film de polyéthylène) et recouverte sur une ou deux faces de feuilles réfléchissantes d'aluminium ou de films aluminisés. Certains PMR sont constitués de plusieurs couches de feuilles d'aluminium intercalées avec de la mousse souple. L'épaisseur totale varie généralement de 5 à 30 mm. Les PMR sont couramment utilisés en rampants, en murs, en plancher léger et plus rarement sous chape flottante.

En mur, le PMR est généralement agrafé sur un quadrillage de tasseaux en bois aménageant une ou deux lames d'air adjacentes au produit (figure 1).

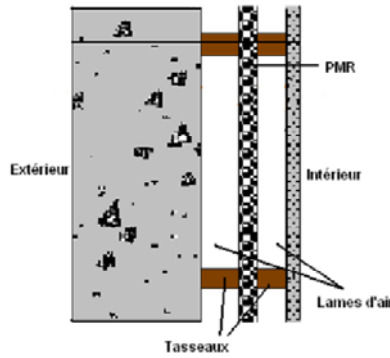


Figure 1 : Pose en mur (Cas de deux lames d'air)

Cet article présente une méthodologie de modélisation permettant de déterminer la résistance thermique de parois complexes verticales contenant des PMR. Les résultats présentés permettent d'encadrer la valeur de la résistance thermique pouvant être obtenue dans les divers montages possibles.

2. Méthodologie de calcul

La méthodologie de calcul consiste à découpler les différents phénomènes thermiques intervenant dans une paroi complexe intégrant un produit mince réfléchissant (figure 2).

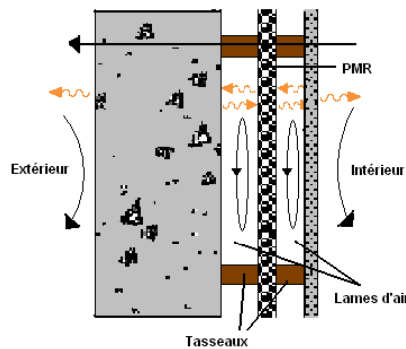


Figure 2 : Paroi verticale d'un bâtiment intégrant un produit mince réfléchissant avec deux lames d'air

La figure 2 schématise une paroi verticale intégrant un PMR. Les transferts par convection avec l'extérieur et l'intérieur sont caractérisés respectivement par h_{ce} et h_{ci} . Au sein de la lame d'air il existe, en parallèle avec le transfert radiatif, soit de la conduction pure soit de la thermoconvection. La convection dans la lame d'air est caractérisée par le coefficient d'échange h_a qui est déterminé par une corrélation adéquate ou d'après des simulations dans le code CFD Fluent. Les autres couches formant le mur sont sujettes à la conduction notamment au niveau des ponts thermiques dus aux quadrillages en tasseaux délimitant les lames d'air.

Dans une première partie, une modélisation détaillée du comportement de la lame d'air est réalisée avec le code de simulation CFD Fluent. Une modélisation du transfert radiatif est ensuite réalisée avec un logiciel de modélisation des échanges radiatifs par facteurs de transfert Modray [1]. Puis dans une dernière partie, un assemblage de modèles permettra de construire l'ensemble de la paroi complexe dans un outil de modélisation de réseaux thermiques 0D / 1D Thermette [2].

2.1. Modélisation de la convection naturelle dans des lames d'air verticales non ventilées

L'étude des lames d'air verticales a fait l'objet de nombreux travaux de recherche afin de mieux comprendre les phénomènes de convection naturelle qui s'y développent. Plusieurs corrélations existent dans la littérature [3], [4], [5], [6] et [7]. Une comparaison de ces différentes corrélations a montré des écarts significatifs dans l'évaluation du nombre de Nusselt et ceci pour plusieurs valeurs d'allongement (rapport de la hauteur sur l'épaisseur de la lame d'air) de lames d'air allant de 5 à 40. Un exemple de l'écart entre les valeurs de Nusselt obtenues en fonction du nombre de Rayleigh est présenté à la figure 3 pour un allongement de la lame d'air de 25.

Les nombres de Rayleigh et Nusselt étant définis dans ce cas par les équations 1 et 2.

$$Ra_L = \frac{g L^3 \beta (T_H - T_C)}{a \nu} \quad (1)$$

$$Nu = \frac{q L}{\lambda_a (T_H - T_C)} \quad (2)$$

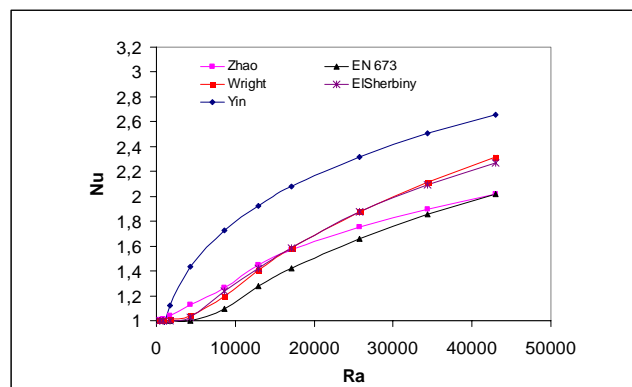


Figure 3 : Comparaison du Nu de plusieurs corrélations en fonction du nombre de Ra pour A=25

Ces écarts importants sont probablement liés aux expérimentations réalisées pour l'établissement de ces corrélations et le nombre de points de la base de données expérimentale. Pour sélectionner la meilleure corrélation utilisable pour la modélisation des parois, une modélisation d'une lame d'air verticale est entreprise avec le code CFD Fluent.

Différentes lames d'air sont simulées pour des écarts de température allant de 1 à 50 K, des allongements allant de 10 à 40 et pour une plage du Ra allant de 10^3 à 10^6 (figure 4). Les résultats de simulation montrent que pour chaque allongement, une corrélation de la littérature donne des valeurs de Nu très rapprochées de celles obtenues par modélisation.

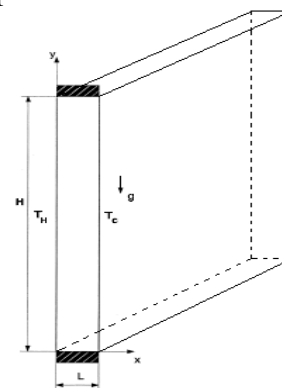


Figure 4 : Représentation de la lame d'air tridimensionnelle dans le code CFD

La figure 5 montre par exemple un rapprochement de la courbe de simulations numériques avec la corrélation de Zhao pour A=25. L'utilisation des résultats de la modélisation numérique permet alors de sélectionner pour chaque allongement la meilleure corrélation de la littérature.

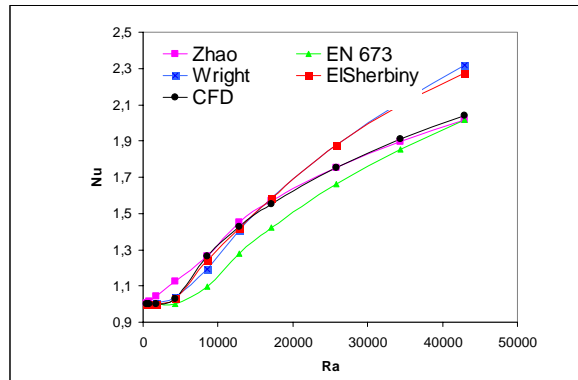


Figure 5 : Comparaison du modèle numérique avec les corrélations de la littérature pour $A=25$

2.2. Modélisation du transfert radiatif

Le montage d'un PMR dans une paroi verticale nécessite la présence d'un quadrillage en tasseaux formant des lames d'air sur lequel est agrafé le produit réfléchissant. Les phénomènes radiatifs au sein des lames d'air entre les tasseaux, la face intérieure du mur et la face réfléchissante du PMR nécessite une modélisation 3D. En introduisant les émissivités correspondantes, les facteurs de transferts radiatifs sont alors calculés en utilisant le logiciel de MODélisation du RAYonnement thermique Modray utilisant la méthode des flux plans [1].

2.3. Assemblage des modèles

Le système à modéliser est composé de plusieurs lames d'air entourées par un quadrillage et délimité d'une part par le parement intérieur du mur et d'autre part par la face réfléchissante du produit mince. Le système peut être considéré comme étant reproductible et la cellule unitaire comportant une seule cavité d'air (figure 6) est représentée dans le logiciel Thermette. Ce modèle numérique détermine la résistance thermique de la lame d'air (seule ou couplée à un PMR) non ventilée intégrant une face de faible émissivité. Différents paramètres peuvent être variés comme par exemple l'épaisseur de la lame d'air, son allongement et l'écart de température de part et d'autre du complexe.

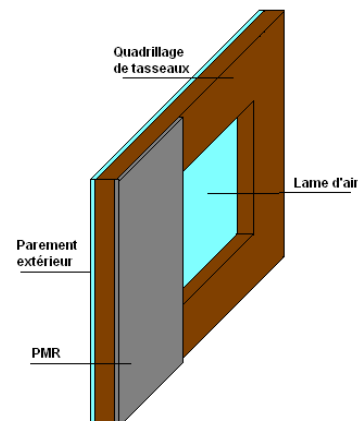


Figure 6 : Schématisation du montage à modéliser

Dans ce modèle, on introduit d'une part le coefficient d'échange de convection naturelle trouvé par modélisation numérique CFD pour des lames d'air verticales de différents allongements et d'autre part les facteurs de transfert radiatif calculés par Modray.

3. Validation expérimentale

Des essais à la boîte chaude gardée (BCG) [8] sont réalisés au CSTB afin de mesurer les performances thermiques d'une paroi complexe intégrant un PMR couplé à une lame d'air. Les mesures ont été réalisées sur des complexes PMR de 7 mm d'épaisseur, de conductivité thermique égale à 0,035 W/m.K et d'émissivité 0,07, couplé à une lame d'air d'épaisseur égale à 1 cm (cas1) ou 2 cm (cas2) et de hauteur égale à la hauteur du complexe (1,45 m). Ce dernier est limité de part et d'autre par des parements de bois intérieur (PI) et extérieur (PE) de 10 mm d'épaisseur et ayant une conductivité thermique de 0,1 W/m.K. Le complexe testé

ne comporte pas de tasseaux en son centre mais seulement sur les quatre côtés ; un soin a été apporté au montage du complexe de façon à garantir une lame d'air d'épaisseur constante. Afin de valider le modèle de paroi complexe, une température chaude est imposée à l'entrée du modèle ainsi qu'une température froide à la sortie, elles sont égales aux températures mesurées lors des essais à la BCG sur l'entrée du parement intérieur et la sortie du parement extérieur.

Les résultats comparatifs entre modèle et essai du flux thermique total traversant le complexe sont donnés au tableau 1. Les écarts observés sont faibles. Ces écarts peuvent être dus d'un côté à une erreur dans l'évaluation des coefficients de transferts et d'un autre côté au montage expérimental qui mesure le flux thermique et considère qu'il est entièrement mono dimensionnel et néglige le flux latéral (ce flux est bien entendu minimisé par la mise en oeuvre du dispositif).

	Cas 1	Cas 2
Flux mesuré (W)	87.8	74.2
Flux calculé (W)	76.9	71.6
Ecart (%)	12.4	3.5

Tableau 1 : Comparaison entre mesures et modèle du flux thermique

La figure 8 représente l'évolution de la température dans le complexe pour les deux cas étudiés. Les deux profils résultants du modèle et des mesures sont proches.

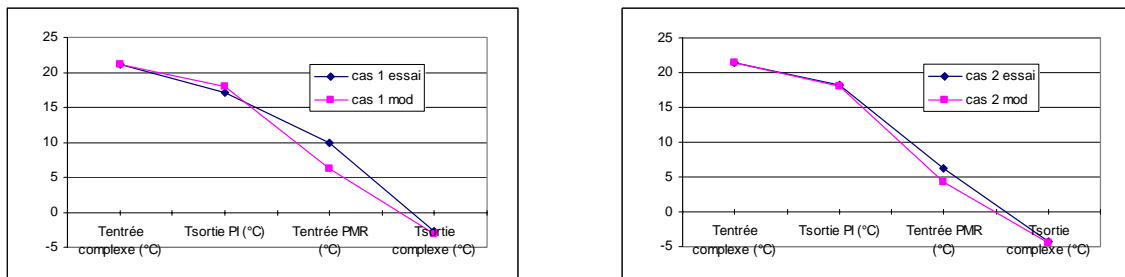


Figure 8 : Comparaison de l'évolution du champs de température dans le complexe

Les résultats expérimentaux valident ainsi la modélisation et le modèle sera par la suite utilisé pour réaliser une étude paramétrique permettant d'étudier le rôle de l'émissivité de la face réfléchissante ainsi que celui du nombre de lames d'air créées.

4. Etude paramétrique

Le complexe étudié est formé d'un PMR d'une épaisseur de 20 mm et de conductivité thermique de 0,05 W/m.K, d'une ou de deux lames d'air non ventilées de 20 mm d'épaisseur chacune. Un quadrillage en tasseaux délimite des lames d'air d'allongement égal à 20 est également représenté. L'écart de température de part et d'autre du complexe est de 20 K. Les paramètres étudiés sont l'émissivité thermique de la face réfléchissante et le nombre des lames d'air.

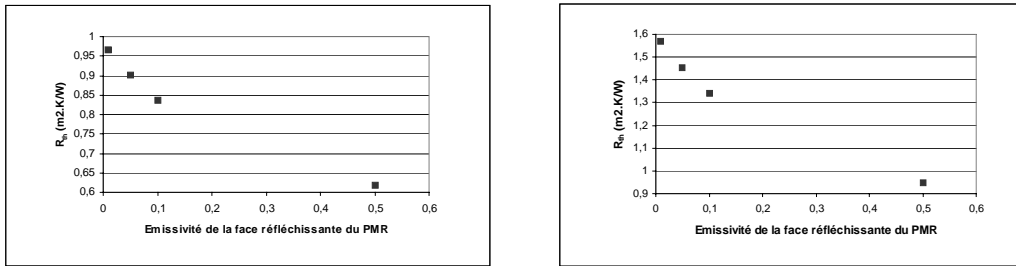


Figure 7 : Schéma et résistance thermique du modèle de PMR couplé à une (gauche) ou deux lames d'air (droite)

D'après les figures ci-dessus, la résistance thermique du complexe augmente avec la diminution de l'émissivité thermique de la face réfléchissante du PMR. Pour un complexe muni d'une seule lame d'air, la résistance thermique de la paroi étudiée varie en fonction de l'émissivité thermique entre 0,6 et 1,2 m².K/W. Pour un complexe muni de deux lames d'air, cette dernière varie entre 0,9 et 1,8 m².K/W. Ceci correspond à une augmentation de l'ordre de 30 % d'où l'importance de la présence de deux lames d'air dans le complexe, quand ceci est possible. La lame d'air est donc responsable de la part la plus importante de la résistance thermique d'une paroi complexe incluant un PMR.

5. Conclusion

La performance thermique des parois intégrant les produits réfléchissants est très sensible à l'épaisseur et aux caractéristiques thermiques intrinsèques du produit, à la durabilité de ses faces peu émissives, à la mise en œuvre des lames d'air adjacentes et leurs dimensions. Le modèle ainsi réalisé a permis d'étudier les paramètres d'influence des performances thermiques de telles parois complexes. La résistance thermique de parois utilisant des PMR varie ainsi entre 0,6 et 1,8 m².K/W en fonction des différents paramètres (nombre de lames, émissivité thermique, conductivité thermique et épaisseur du PMR ...).

Références

- [1] D.Roy, K. El Khoury, D.Clodic, Modeling of In-Vehicle heat transfers using zonal approach, Proceedings of SAE 2001, 5-8 March 2001.
- [2] K. El Khoury, Thermette, User's Guide, Version 2.0, EMP, 1999.
- [3] ElSherbiny, S. M., "Heat Transfer by Natural Convection Across Vertical and Inclined Air Layers", Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 1980.
- [4] S.H. Yin, Natural convection in an air layer enclosed within rectangular cavities, Int Journal of Heat Mass Transfer 21(1978) p 307-315.
- [5] Y. Zhao, Proceedings of clima 2000 on a New set of Analytical correlations for predicting convective Heat Transfer in Fenestration Glazing cavities, Brussels, 1997 p305-316.
- [6] J.L Wright, H.Jin, K.G.T. Hollands, D.Naylor, Flow visualization of natural convection in a tall, air-filled vertical cavity. International Journal of Heat and Mass Transfer 49 (2006) 889-904
- [7] EN ISO 6946, Composants et parois des bâtiments - Résistance thermique et coefficient de transmission thermique - Méthode de calcul.
- [8] ISO 8990:1994, Isolation thermique – Détermination des propriétés de transmission thermique en régime stationnaire – Méthode à la boîte chaude gardée et calibrée.

Remerciements

Ce travail est réalisé avec la collaboration du CSTB et le financement de l'ADEME.