

SIMULATION DES TRANSFERTS THERMIQUES COUPLÉS DANS UN DOUBLE MUR ALVEOLAIRE SOUMIS A UN FLUX SOLAIRE

M. BOUKENDIL, A. ABDELBAKI, Z. ZRIKEM

Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Département de Physique, LMFE, Unité affiliée au CNRST (URAC 27), B.P. 2390, Marrakech, Maroc
Auteur correspondant: m.boukendil@uca.ac.ma

Résumé

Dans le présent travail, on s'intéresse à l'étude de l'effet du flux solaire incident G et/ou de l'écart de températures ΔT sur les transferts thermiques couplés dans un double mur alvéolaire en tenant compte des échanges convectifs au sein des différentes alvéoles et radiatifs entre les surfaces internes de celles-ci et de la conduction de chaleur dans les différentes partitions solides séparant les alvéoles. Les résultats de la simulation ont montré que ces paramètres ont des effets très importants sur le transfert de chaleur global à travers la structure. En outre, malgré l'importance du rapport de forme de la lame d'air, la variation du flux Q a été trouvée presque linéaire en fonction de G et/ou de ΔT .

Mots clefs: *Double mur alvéolaire; Flux solaire incident ; Conduction; Convection; Rayonnement; Etude numérique*

1. Introduction

Le secteur du bâtiment en phase d'exploitation est le secteur le plus énergivore conduisant aujourd'hui à de nombreuses études sur la thermique du bâtiment pour réduire la consommation d'énergie tout en préservant le confort des usagers. Dans le but d'utiliser au mieux l'énergie à disposition dans les bâtiments, il convient donc de réaliser la construction et les installations de façon à consommer le moins possible d'énergie non renouvelable tout en assurant un confort convenable et c'est le cas de l'utilisation des doubles murs alvéolaires séparés par une lame d'air et construits par des briques creuses en terre cuite (voir figure 1).

L'utilité de telles structures est la limitation de la consommation énergétique et la contribution dans la réalisation du confort de manière naturelle. En effet, les briques creuses en terre cuite ont été conçues pour augmenter la résistance thermique des parois de construction. Cependant, l'estimation des transferts thermiques à travers de telles structures pose des problèmes de modélisation lors de la simulation de comportement thermique. Ces problèmes sont dus essentiellement au couplage entre les transferts thermiques conductifs dans les partitions solides, convectifs et radiatifs au sein des

différentes alvéoles et de la lame d'air. Par conséquent, l'étude fine du comportement thermique de telles structures nécessite la résolution simultanée des équations couplées traduisant les trois modes de transfert de chaleur. La plus part des travaux numériques ayant porté sur les problèmes de couplage entre les différents modes de transfert de chaleur (conduction, convection et/ou rayonnement) sont limités à des cavités rectangulaires. Cependant ceux concernant les cavités partitionnées différentiellement chauffées ne sont pas très nombreux [1,2]. En outre, ceux relatifs à des configurations similaires sont très rares [3,4].

Dans le but d'analyser le comportement thermique de ces structures alvéolaires en conditions climatiques naturelles, le présent travail met en évidence à l'aide d'une étude numérique en régime permanent l'influence du flux solaire incident et/ou de l'écart de températures sur les transferts thermiques couplés dans un double mur alvéolaire dont la paroi gauche verticale est soumise à un flux solaire et elle échange de la chaleur avec la température de l'ambiance extérieure avec un coefficient d'échange surfacique h_e , alors que la paroi droite échange de la chaleur avec la température du milieu intérieur avec un coefficient d'échange surfacique h_i . Cette configuration avec les conditions aux limites présentées dans ce travail représente la situation rencontrée en pratique concernant les enveloppes d'un bâtiment. Cependant, les travaux disponibles dans la littérature ne traitent que des configurations simples qui sont soumises soit à des températures de parois imposées, dans la plupart des cas, soit à des conditions de flux surfaciques imposés, dans quelques cas.

2. Modèle mathématique

2.1 Description de la configuration étudiée

Le problème physique considéré est schématisé sur la figure 1. Il s'agit d'un double mur, d'épaisseur L et de hauteur H , formé par deux parois alvéolaires séparées par une lame d'air d'épaisseur l et de hauteur h . Les alvéoles sont des petites cavités rectangulaires, d'épaisseur l' et de hauteur h' , entourées de partitions solides verticales, d'épaisseurs ex_i ($1 \leq i \leq 6$), et horizontales d'épaisseurs ey_j ($1 \leq j \leq Ny+1$) où Ny est le nombre d'alvéoles dans la direction verticale ($Ny = 24$). Pour les parties joignant les

différentes briques creuses on doit ajouter l'épaisseur du joint en mortier ($e_m = 1\text{cm}$) à l'épaisseur des parties solides des briques creuses horizontales e_y . La paroi gauche verticale est soumise à un flux solaire incident et elle échange de la chaleur avec la température de l'ambiance extérieure T_e avec un coefficient d'échange surfacique h_e , alors que la paroi droite échange de la chaleur avec la température de l'air intérieur T_i avec un coefficient d'échange surfacique h_i . Les surfaces horizontales, quant à elles, sont considérées adiabatiques.

2.2 Equations du modèle et méthode de résolution

Les équations adimensionnelles régissant le mouvement du fluide et la conservation de l'énergie sont celles présentées dans [4].

Les conditions aux limites du problème sont :

* Condition d'imperméabilité et d'adhérence aux parois :

$U = V = 0$ sur toutes les surfaces internes des cavités

* Condition aux limites thermiques :

$\left. \frac{\partial \theta_s}{\partial Y} \right|_{Y=0} = \left. \frac{\partial \theta_s}{\partial Y} \right|_{Y=A} = 0$ ($0 \leq X \leq 1$) : adiabaticité

$\alpha_p G + h_e \Delta T (\theta_e - \theta_{se}) = \frac{k_s \Delta T}{L} \frac{d\theta}{dX}$: sur la face verticale externe

$h_i \Delta T (\theta_{si} - \theta_i) = -\frac{k_s \Delta T}{L} \frac{d\theta}{dX}$: sur la face verticale interne

où θ_{se} et θ_{si} sont respectivement les températures adimensionnelles moyennes des faces verticales externe et interne de la structure, α_p est le coefficient d'absorption de la paroi extérieure par rapport au rayonnement solaire.

* Aux interfaces fluide-solide, on a :

$\theta_s(X, Y) = \theta_a(X, Y)$ et $-\frac{\partial \theta_s}{\partial \eta} = -N_k \frac{\partial \theta_a}{\partial \eta} + N_r Q_r$

où η est la coordonnée adimensionnelle normale à l'interface considéré et :

$Q_r(r_k) = \varepsilon_k \left(1 - \frac{1}{M}\right)^4 \left(\theta_k(r_k) + \frac{1}{M-1}\right)^4 - \varepsilon_k \sum_{j=1}^4 \int_{S_j} J_j(r_j) dF_{ds_k - ds_j}$

où $Q_r(r_k)$ est le flux radiatif net adimensionnel échangé par l'élément de surface ds_k situé en un point d'abscisse r_k sur la surface k , $dF_{ds_k - ds_j}$ est le facteur de forme entre les

éléments ds_k et ds_j , ε_k est l'émissivité de la surface k ; M est le rapport des températures ($M = T_e/T_i$) et $J_j(r_j)$ est la radiosité de l'élément ds_j ; N_r est le nombre de rayonnement adimensionnel et N_k le rapport des conductivités:

$$N_r = \frac{\sigma T_e^4 L}{k_s (T_e - T_i)} \quad \text{et} \quad N_k = \frac{k_a}{k_s}$$

Le flux thermique global adimensionnel qui traverse la structure est :

$$Q_a = -\frac{1}{A} \int_0^A \left. \frac{\partial \theta_s}{\partial X} \right)_{X=0} dY = -\frac{1}{A} \int_0^A \left. \frac{\partial \theta_s}{\partial X} \right)_{X=1} dY$$

Les équations du modèle sont discrétisées par la méthode des volumes de contrôle, et sont résolues par l'algorithme SIMPLE. Une étude d'optimisation a été faite

sur le maillage et le pas de temps utilisés dans la simulation. Cette étude a conduit au choix d'un maillage non uniforme (63×514). Le pas de temps adimensionnel utilisé varie entre 10^{-7} et 10^{-6} selon la valeur du nombre de Rayleigh. On estime que la convergence est atteinte lorsque les écarts relatifs entre les variables calculées, aux différents nœuds du maillage, deviennent inférieurs à 10^{-4} entre deux itérations successives.

3. Résultats et discussion

Les résultats présentés ici sont obtenus pour un double mur construit par 8 unités de briques creuses en terre cuite à 6 alvéoles dans la direction verticale avec une épaisseur de la lame d'air l égale à 5cm et différents écarts de la température $1^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 40^\circ\text{C}$ conformément aux conditions rencontrées dans la pratique, alors que la température de l'air intérieur est maintenue à $T_i = 20^\circ\text{C}$. Les coefficients d'échanges surfaciques ont été fixés aux valeurs, $h_e = 25\text{W/m}^2\text{C}$ et $h_i = 7,7\text{W/m}^2\text{C}$, la gamme de variation du flux de chaleur incident G est comprise entre 0 et 1000W/m^2 ; ce qui correspond, en ordre de grandeur, au rayonnement solaire terrestre. Les dimensions géométriques (en cm) de la structure étudiée sont données dans le tableau 1. Les parois solides sont en béton de conductivité thermique $k_s = 1\text{W/mK}$. Le nombre de rayonnement N_r dépend de $\Delta T = (T_e - T_i)$. La conductivité thermique de l'air confiné dans les différentes cavités est $k_a = 0,026\text{W/mK}$ et le nombre de Prandtl est $Pr = 0,71$. L'émissivité des faces internes des différentes alvéoles et de la lame d'air est $\varepsilon = 0,93$. Le coefficient d'absorption de la paroi extérieure par rapport au rayonnement solaire est $\alpha_p = 0,8$.

l'	h'	l	ex_i	ey_1	ey_j	ey_{Ny+1}	el_1	el_2
5	5	5	1	1,5	1	1,5	0,5	0,5

Tableau 1 : Dimensions de la structure étudiée (en cm).

Afin de montrer l'impact du flux solaire incident G sur la paroi extérieure et/ou de l'écart de température ΔT , entre les faces du double mur étudié, sur le transfert de chaleur global à travers ce dernier, on représente sur les figures 2 et 3 les variations du flux de chaleur global par unité de surface de la structure $Q(\text{W/m}^2)$ respectivement en fonction de G et de ΔT . Les résultats de ces figures montrent tout d'abord, que le flux solaire incident et/ou l'écart de températures présentent un impact fort sur la valeur du flux de chaleur global à travers la structure étudiée. En effet, l'augmentation du flux solaire incident et/ou de l'écart de températures entraîne l'amplification à la fois du rayonnement et de la convection naturelle dans la lame d'air et les alvéoles, ce qui entraîne une augmentation du flux de chaleur.

Concernant l'effet du flux solaire incident, les résultats de la figure 2 montrent que ce dernier fait augmenter le flux de chaleur à travers la structure alvéolaire. Ceci montre que

le transfert de chaleur au sein la structure croît d'une manière très importante lorsque le flux incident G passe de 0 à 200W/m². Cependant cette augmentation diminue au fur et à mesure que ce flux incident augmente. En effet, l'écart enregistré, lorsque la température imposée $T_e=25^\circ\text{C}$ ($\Delta T=5^\circ\text{C}$), est de l'ordre de 137% lorsque G passe de 0 à 200W/m². Cet écart diminue jusqu'à atteindre 61% et 23% respectivement quand le flux passe de 200W/m² à 400W/m² et de 800W/m² à 1000W/m². Quand à l'effet de l'écart de température ΔT , les résultats de la figure 3 montrent que le transfert de chaleur global à travers le système augmente en fonction de l'écart de température ΔT . Ainsi, les écarts enregistrés entre les flux obtenus en prenant $\Delta T=1^\circ\text{C}$ comme référence, pour un flux solaire incident $G=600\text{W/m}^2$, passent de 21% à 227% lorsque l'écart de température ΔT passe de 5°C à 40°C . Les résultats montrent également que lorsque l'écart de température augmente l'influence du flux incident diminue. En effet, les écarts enregistrés, lorsque G varie de 400W/m² à 600W/m², diminuent de 50% à 14% quand ΔT passe de 1°C à 40°C .

On tient à signaler que le flux de chaleur moyen Q dimensionnel, traversant la structure, varie presque linéairement en fonction du flux solaire incident G sur la paroi extérieure et/ou de la différence de température ΔT entre ses faces verticales extrêmes et ce, malgré le caractère localement non linéaire, des transferts convectifs et radiatifs au sein de la lame d'air et des alvéoles. Ce phénomène peut être expliqué par la prédominance des transferts de chaleur par conduction dans le système étudié qui obéissent à la condition de linéarité (résultats non présentés ici).

4. Conclusion

Les résultats de la simulation ont montré que le flux solaire incident G sur la paroi extérieure et/ou l'écart de température ΔT , entre les faces du double mur alvéolaire étudié, ont des effets très importants sur le transfert de chaleur Q . En outre, malgré l'importance du rapport de forme de la lame d'air, les transferts de chaleur conductifs restent prédominants ce qui permet d'avoir une variation presque linéaire de Q en fonction de G et/ou de ΔT .

Références

- [1] M. AL-Hazmy, Majed, *Analysis of coupled natural convection-conduction effects on the heat transport through hollow building blocks*, Energy and Buildings 38 (2006) 515–521.
- [2] J. Sun, L. Fang, *Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method*, International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 5598–5607.
- [3] M.A. Antar, *Thermal radiation role in conjugate heat transfer across a multiple-cavity building block*, Energy 35 (2010) 3508–3516.
- [4] M. Boukendil, A. Abdelbaki, Z. Zrikem, *Detailed numerical simulation of coupled heat transfer by conduction, natural convection and radiation*

through double honeycomb walls, Building Simulation 5 (2012) 337–344.

- [5] T. Ait-Taleb, A. Abdelbaki, Z. Zrikem, *Simulation of coupled heat transfers in a hollow tile with two vertical and three horizontal uniform rectangular cavities heated from below or above*, Energy and Buildings 84 (2014) 628–632.

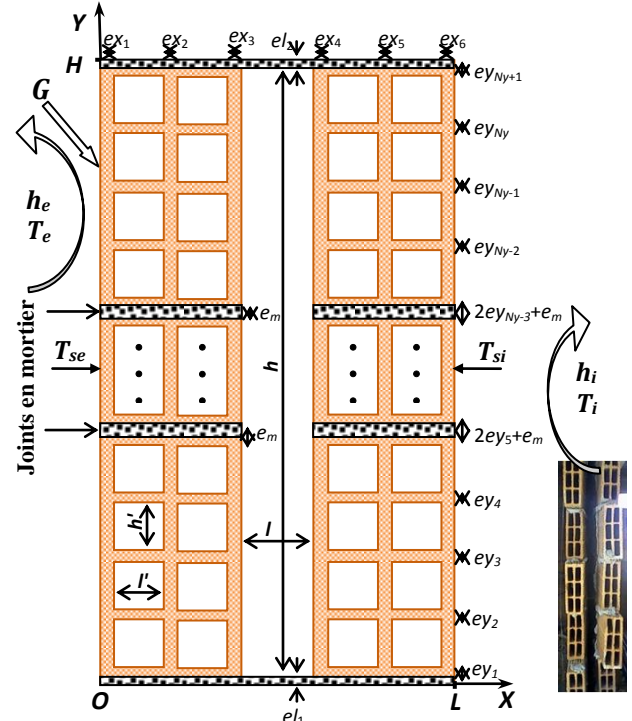


Fig. 1 : Schéma et photo du double mur étudié.

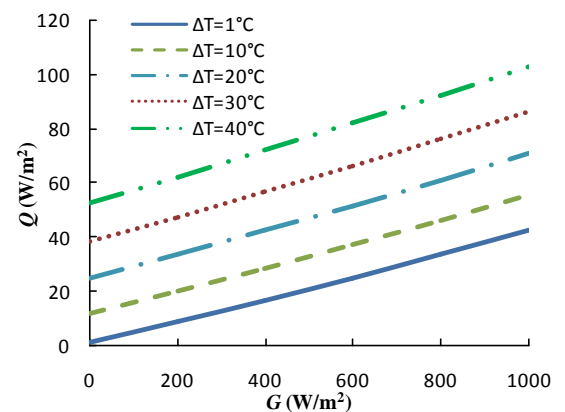


Fig. 2 : Variation du flux Q en fonction du flux solaire G .

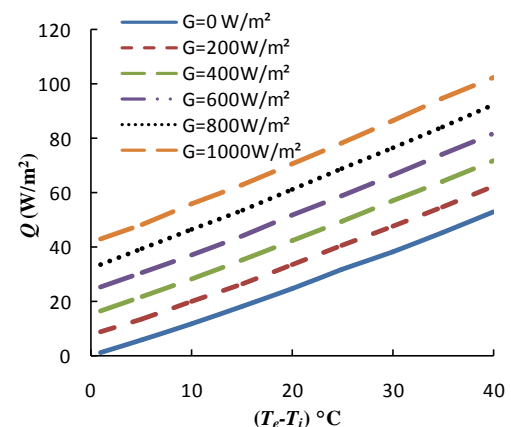


Fig. 3 : Variation du flux Q en fonction de l'écart de température ΔT .