Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1 (2009) 117 - 124
DOI: https://doi.org/10.54966/jreen.v12i1.125

Simulation des transferts thermiques transitoires à travers un mur multicouche soumis à des conditions de flux solaire et de convection

Youcef Tamene[1*], Said Abboudi[2] et Cherif Bougriou[3]

[1] Département de Mécanique, Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur,
Université Kasdi Merbah, B.P. 511, Route de Ghardaïa, 30000 Ouargla, Algérie
[2] Laboratoire Systèmes et Transports (SET), Département GMC,
Université de Technologie, Belfort Montbéliard, site de Sévenans, 90010 Belfort Cedex, France
[3] Laboratoire d'Etude des Systèmes Energétiques Industriels, Département de Mécanique
Université Hadj Lakhdar, Rue Chahid M. El. Hadi Boukhlouf, 05000 Batna, Algérie

(reçu le 12 Janvier 2009 – accepté le 31 Mars 2009)

Résumé - *On propose une étude numérique, par différences finies, du transfert de chaleur dans un mur multicouche (à deux ou trois couches) soumis à une condition de rayonnement solaire sur le côté extérieur et prenant en compte les échanges de chaleur par convection sur ses deux faces. L'exploitation du code numérique est développée sur des cas relatifs au problème posé dans l'habitat. Les résultats numériques sont présentés sur des exemples de matériaux utilisés dans le domaine du bâtiment dans des conditions réelles de fonctionnement (flux solaire, pertes convectives, etc…). On analyse également, l'influence, sur le transfert de chaleur, de quelques paramètres clés du système comme le choix des matériaux, l'optimisation de leur épaisseur et également la nature variable du flux solaire. Une proposition optimale sera dégagée de cette étude en fonction des objectifs recherchés.*

Abstract - *We propose a numerical study by finite differences, of the heat transfer in a multilayered wall (three layers) submitted to a condition of solar radiation on the exterior side and take in account the heat exchanges by convection on his two faces. The numerical code is spread out on the case relative to the sitting problem in the building. The numerical results are presented on the examples of used materials in the building domain of the real working conditions (solar flow, convective losses, etc.). We analyse also, the influence on the heat transfer of some important parameterize of the system, like the choice of the materials, the optimization of their thickness and also the variable nature of the solar flow. An optimum proposal will be free of this study according to the sought after aims.*

Mots clés: Transfert de chaleur - Conduction - Transitoire - Mur multicouche - Flux solaire - Numérique.

1. INTRODUCTION

Le transfert de chaleur et de masse est l'un des phénomènes physiques les plus étudiés. A partir de la dernière moitié du 20ème siècle, beaucoup de travaux et d'approches ont été réalisées pour modéliser le phénomène.

Notre travail entre dans cette logique, et étant donné que le problème étudié est toujours d'actualité [1] et vu les travaux présentés par A. Sami *et al.* [2] et ceux réalisés par E. Wurtz [3], ainsi que l'étude faite par N. Mendes [4, 5] pour le cas d'un mur simple soumis à un flux solaire, nous nous sommes proposés de mettre au point un code

* tamene_y@yahoo.fr _ said.abboudi@utbm.fr _ cherif_bougriou@yahoo.fr

qui nous a permis d'étudier le transfert thermique à travers le mur extérieur multicouches d'une habitation soumis aux conditions réelles (rayonnement solaire, convection à l'intérieur et à l'extérieur,.). Les résultats obtenus nous ont permis de voir l'influence des différents paramètres sur la température intérieure et de voir ainsi la meilleure configuration pour une bonne isolation thermique et donc une économie d'énergie.

2. FORMULATION DU PROBLEME

On considère un mur constitué de trois couches, la couche centrale est en brique, d'épaisseur e_2 couverte des deux côtés par une couche de crépissage interne d'épaisseur e_1 et externe d'épaisseur e_3. Cette dernière est soumise à une condition de flux solaire variable. Les échanges par convection avec les milieux environnants sont pris en compte sur les deux surfaces interne et externe.

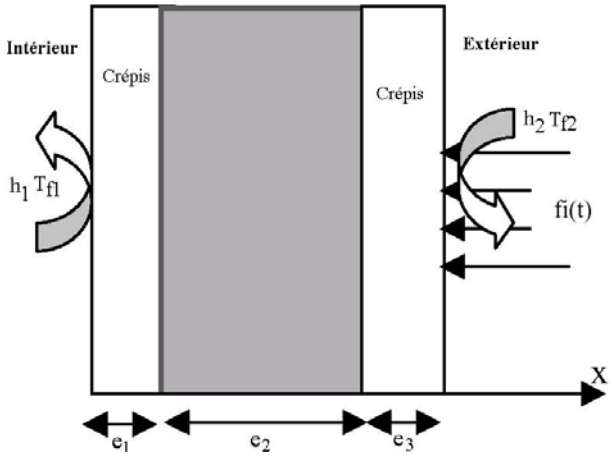

Fig. 1: Présentation du système

Dans ces conditions, les équations de bilan thermique s'écrivent:

$$\alpha_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} = \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad ; \qquad l_{i-1} \le x \le l_i \quad , \quad t \ge 0 \quad , \quad i = 1,2,3$$

où

$$\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\rho_i C_i} \quad ; \quad l_0 = 0 \, , \, l_i = l_{i-1} + e_i \, , \, L = l_3$$

2.1 Conditions aux limites

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = h_1 \left(T_{f1} - T_1 \right) \quad x = 0 ;$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \qquad x = l_i , \quad i = 1,2$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = h_2 \left(T_3 - T_{f2} \right) - f_i \quad x = l_3$$

2.2 Conditions initiales

$$T_i = T_0 \qquad t = 0 \quad , \quad l_{i-1} \le x \le l_i$$

2.3 Résolution numérique

La résolution du système d'équations ci-dessus muni des conditions aux limites et initiales est réalisée par la méthode des différences finies, selon le schéma numérique de Cranck–Nicolson [6].

Après discrétisation, on obtient le système d'équations suivant:

$$A_{1k}.T_{i-1}^{j+1} + B_{1k}.T_i^{j+1} + C_{1k}.T_{i+1}^{j+1} = A_{2k}.T_{i-1}^{j+1} + B_{2k}.T_i^{j+1} + C_{2k}.T_{i+1}^{j+1} + G_i$$

$$k = 1,2,3 \qquad i = 1,...,N \qquad j = I,...,J$$

avec:

$$A_{1k} = -r_k \qquad C_{1k} = -r_k \qquad B_{1k} = 1 - A_{1k} - C_{1k}$$

$$A_{2k} = r_k \qquad C_{2k} = r_k \qquad B_{2k} = 1 - A_{2k} - C_{2k} \qquad r_k = \frac{\alpha_k.\Delta t}{2.\Delta x^2}$$

Les coefficients A, B et C décrits ci-dessus gardent la même forme, sauf pour les cas particuliers correspondants aux conditions aux limites et aux interfaces.

- **Pour** $i = 1$, $k = 1$ $\quad (1^{\text{ère}}$ couche$)$, $x = 0$

$$A_{1k} = 0 \quad , C_{1k} = -2r_k \quad , \quad B_{1k} = 1 - A_{1k} - C_{1k} - r_k.H_1 \quad , \quad A_{2k} = 0$$

$$B_{2k} = 1 - A_{2k} - C_{2k} + r_k.H_1.G_1 = -2.r_1.H_1.T_{f1} \qquad H_1 = \frac{2.\Delta x.h_1}{\lambda_1}$$

<u>Première interface</u>: $x = l_1$

- **Pour** $i = N_1$, $k = 2$

$$A_{1k} = -2r_k \quad , C_{1k} = -r_k.F_1 \quad , \quad B_{1k} = 1 - A_{1k} - C_{1k} - r_k.F_1 \quad ,$$
$$A_{2k} = 2r_k \quad , C_{2k} = r_k.F_1 \quad , \quad B_{2k} = 1 - A_{2k} - C_{2k} + r_k.F_1$$

- **Pour** $i = N_1 + 1$, $k = 2$

$$A_{1k} = --r_k.F_2 \quad , C_{1k} = -2r_k \quad , \quad B_{1k} = 1 - A_{1k} - C_{1k} - r_k.F_2 \quad ,$$
$$A_{2k} = r_k.F_2 \quad , C_{2k} = 2r_k \quad , \quad B_{2k} = 1 - A_{2k} - C_{2k} + r_k.F_2$$

<u>Deuxième interface</u>: $x = l_2$

- **Pour** $i = N_2$, $k = 2$

$$A_{1k} = -2r_k \quad , C_{1k} = -r_k.F_2 \quad , \quad B_{1k} = 1 - A_{1k} - C_{1k} - r_k.F_2 \quad ,$$
$$A_{2k} = 2r_k \quad , C_{2k} = r_k.F_2 \quad , \quad B_{2k} = 1 - A_{2k} - C_{2k} + r_k.F_2$$

- **Pour** $i = N_2 + 1$, $k = 3$

$$A_{1k} = -r_k . F_3 \quad , C_{1k} = -2 r_k \quad , \quad B_{1k} = 1 - A_{1k} - C_{1k} - r_k . F_3 \quad ,$$
$$A_{2k} = r_k . F_2 \quad , C_{2k} = 2 r_k \quad , \quad B_{2k} = 1 - A_{2k} - C_{2k} + r_k . F_3$$

Avec: $F_n = \dfrac{2 . h_I . \Delta x}{\lambda_n}$, $n = 1, 2, 3$ h_I est le coefficient d'échange interfacial.

- **Pour** $i = N$, $k = 3$ ($3^{ème}$ couche), $x = L$

$$A_{1k} = -2 r_k \quad , C_{1k} = 0 \quad , \quad B_{1k} = 1 - A_{1k} - C_{1k} - r_k . H_2 \quad ,$$
$$A_{2k} = 2 r_k \quad , C_{2k} = 0 \quad , \quad B_{2k} = 1 - A_{2k} - C_{2k} + r_k . H_2$$

$$G_2 = -2 r_k \left(H_2 . T_{f2}(t) + f_I(t) \right) \quad , \quad H_2 = \frac{2 h_2 . \Delta x}{\lambda_3}$$

$$f_i(t) = F\left(\sin \omega . t, \cos \omega . t \right) \quad \text{avec} \quad \omega = 2 \pi / T_I$$
$$\text{et } T_{f2}(t) = F\left[\sin \left(2 \pi . t / T_I \right) \right]$$

L'assemblage de l'ensemble de ces équations se traduit par un système tridiagonal dont la résolution est réalisée, à chaque pas de temps, par l'algorithme connu de Thomas [7].

3. RESULTATS NUMERIQUES

L'exploitation du code numérique a été réalisée dans les conditions suivantes:

$e_1 = 1$ cm, $e_2 = 20$ cm, $e_3 = 1$ cm, $h_1 = 10$ W/m^2.°C, $h_2 = 100$ W/m^2.°C,
$h_I = 10^6$ W/m^2.°C, $T_{f1} = 20$ °C, $T_{f2} = 40$ °C, $F_I = 500$ W/m^2

Les matériaux considérés sont ceux utilisés généralement en Algérie dans la construction des bâtiments, à savoir: la brique pour le mur central, le mortier pour la couche extérieure et le plâtre pour la couche intérieure.

Sur le plan numérique, le nombre de pas utilisé dans chaque couche est le suivant:

$N_1 = 8$, $N_2 = 20$, $N_3 = 8$.

Dans ce travail, nous avons limité notre analyse, pour deux types de flux (constant et périodique), l'influence des épaisseurs et la nature des couches sur le comportement thermique du multicouche.

3.1 Cas où le flux incident est constant

Sur les figures 2, 3 et 4, on présente l'influence des épaisseurs des différentes couches sur la température interne du mur. On constate que la température interne chute d'environ 5 °C et de un degré si on triple respectivement l'épaisseur de la couche centrale (en brique) et de la première couche (en plâtre). L'épaisseur de la troisième couche (en mortier) influence très peu la température interne (variation inférieure à un degré), (Fig. 3).

L'effet de la nature du matériau de la couche interne (1ère couche), (Fig. 5), montre que l'utilisation de la laine de verre ou du liège contribue de façon considérable à abaisser (de 28 à 24 °C) la température interne du mur.

Les figures 6 et 7 représentent la variation de la température du mur interne en fonction du flux solaire absorbé suivant la configuration (3) et dans la figure 7. On prend deux murs, interne et externe, réalisés en brique d'épaisseur 10 cm chacun avec un vide intermédiaire de 2 cm rempli d'air, et il apparaît clairement que cette deuxième configuration nous permet une meilleure isolation.

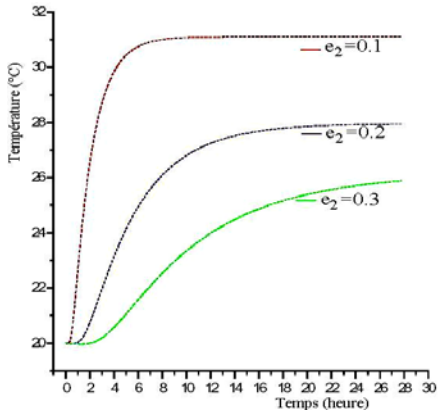

Fig. 2: Evolution de la température interne en fonction de l'épaisseur du mur intermédiaire en brique

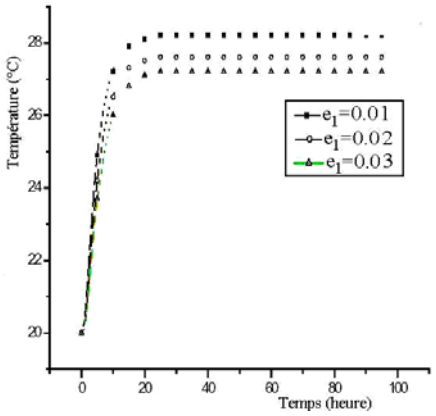

Fig. 3: Evolution de la température interne en fonction de l'épaisseur de la première couche en plâtre

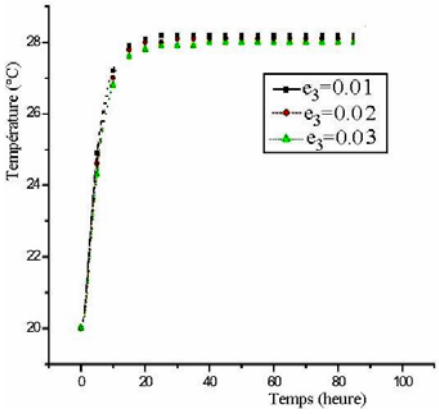

Fig. 4: Evolution de la température interne en fonction de l'épaisseur de la couche externe en mortier

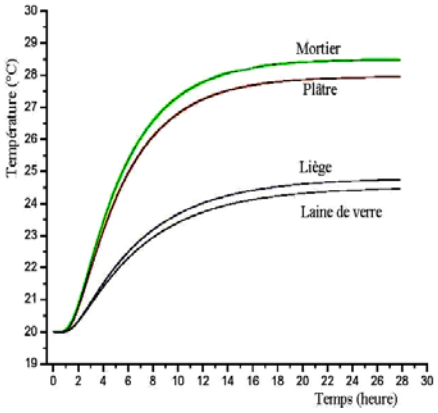

Fig. 5: Evolution de la température interne du mur en fonction de la nature du matériau de la couche interne

3.2 Cas où le flux incident et la température extérieure sont variables

On propose un flux solaire et une température extérieure variable suivant les relations (2), qui donnent l'allure représentée sur les figures 8 et 9, qui est très proche des valeurs du climat du sud.

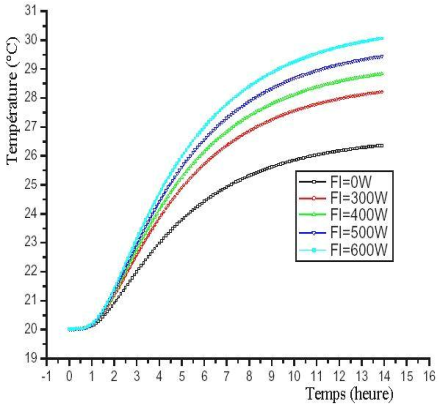

Fig. 6: Evolution de la température interne du mur en fonction du flux incident

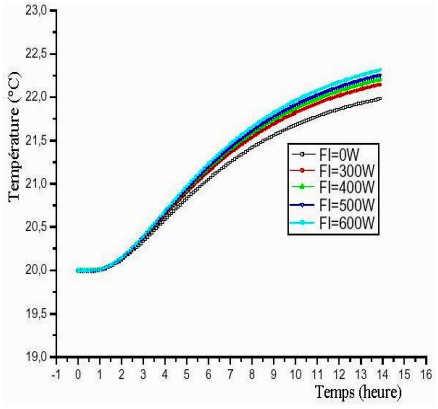

Fig. 7: Evolution de la température interne du mur en fonction du flux incident

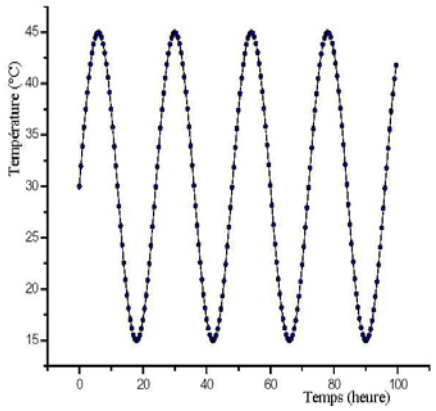

Fig. 8: Variation de température du fluide extérieur

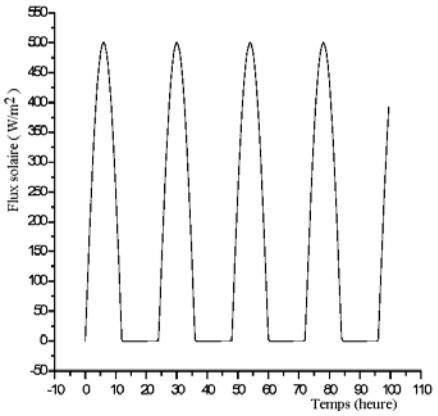

Fig. 9: Variation du flux solaire

Dans ce cas, on retrouve les mêmes remarques énoncées ci-dessus sur l'amplitude de la température interne. Le caractère périodique du flux incident et de la température externe du milieu ambiant se traduit par un déphasage qui augmente en fonction de l'épaisseur de chaque couche. Celui-ci est plus nuancé dans le cas de la variation de la deuxième couche et il l'est beaucoup moins dans le cas des deux autres couches 1 et 3.

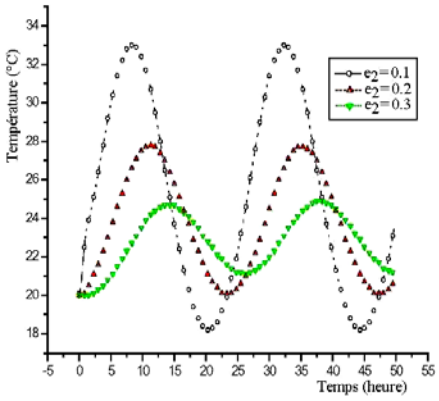

Fig. 10: Evolution de la température interne en fonction de l'épaisseur de la couche intermédiaire

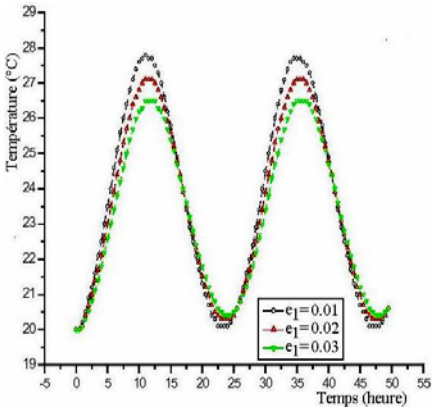

Fig. 11: Evolution de la température interne du mur en fonction de l'épaisseur de la première couche

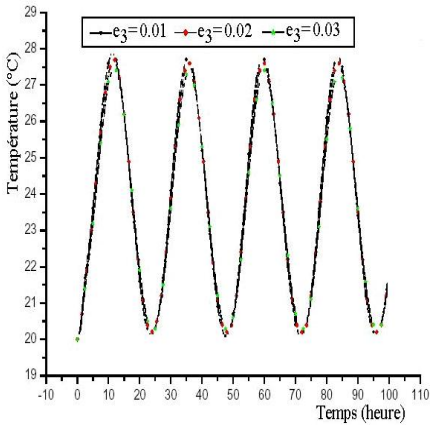

Fig. 12: Evolution de la température de la paroi intérieure en fonction de l'épaisseur de la 3ème couche

4. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons proposé un modèle thermique transitoire de prédiction de la distribution de la température d'un mur multicouche soumis à des conditions thermiques variables proches de celles du sud du Maghreb, où il est question d'un flux solaire variable et des transferts thermiques convectifs à l'intérieur et à l'extérieur.

Les résultats numériques obtenus montrent qu'il est possible de choisir et d'optimiser les matériaux qui composent le mur multicouche en fonction des objectifs

fixés en terme de température interne et par suite en terme de consommation énergétique et électrique.

Enfin, la nature poreuse de ces matériaux et le caractère humide du milieu ambiant nécessitent forcément la prise en compte des couplages massique et thermique au sein de ces matériaux. Un tel travail est en cours.

NOMENCLATURE

C_i : Chaleur spécifique {J/kg.K)}, i = 1, 2 ,3

f_i : Flux solaire absorbé{ W /m^2 }

h_i : Coefficient de convection, {W/m^2.K)}, i = 1, 2 ,3

t : Temps { s }

Symboles grecs

ρ_i : Masse volumique {kg/m^3}

α_i : Diffusivité thermique {m^3/s}

e_i : Epaisseur de la couche {i (m)}, i = 1, 2 ,3

K : Nombre de pas de temps

T_{fi} : Température extérieure, {°C}, i = 1, 2

N_i : Nombre de pas dans la couche i

T : Température { °C }

λ_i : Conductivité thermique {W/m.K}

REFERENCES

[1] Prabal Talukdar, Stephen O. Olutmayin, Olalekan F. Osanyintola and Carey J. Simonson, '*An Experimental Data Set for Benchmarking 1-D, Transient Heat and Moisture Transfer Models of Hygroscopic Building Materials*', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, N°25-26, pp. 4527 – 4539, 2007.

[2] S.A. Al-Sanea, M.F. Zedan and S.A. Al-Ajlan, '*Effect of Electricity Tariff on the Optimum Insulation Thickness in Building Walls as Determined by Dynamic Heat Transfer Model*', Applied Energy, Vol. 82, N°4, pp. 313 – 330, 2005.

[3] E. Wurtz, L. Mora, K.C. Mendonca et C. Maalouf, '*Modélisation des Transferts de Chaleur et de Masse dans l'Environnement de Simulation Simspark*', Journée INES-LAMA, 2004.

[4] N. Mendes and P.C. Philippi, '*A Method for Predicting Heat and Moisture Transfer through Multilayered Walls Based on Temperature and Moisture Content Gradients*', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, N°1, pp. 37 – 51, 2005.

[5] N. Mendes, P.C. Philippi and R. Lamberts, '*A New Mathematical Method to Solve Highly Coupled Equation of Heat and Mass Transfer in Porous Media*', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, N°3, pp. 509 – 518, 2002.

[6] Curtis F. Gerald, '*Applied Numerical Analysis*' Addison Wesley Publishing Company, 1978.

[7] M. Boumahrat et A. Gourdin, '*Méthodes Numériques Appliqués*', Office des Publications Universitaires, Algérie, 1993.

[8] J. Taine et J. P. Petit, '*Transferts Thermiques*', Edition Dunod, 2003.

[9] H. Li, J.S. Zhang, T.Q. Dang, '*Heat, Air, Moisture and VOC Transport in Building Envelopes*', Environmental Quality Systems, 2003.

[10] A. Hussain, A. Seidel-Morgenstern and E. Tsotsas, '*Heat and Mass Transfer in Tubular Ceramic Membranes for Membrane Reactors*', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, N°13-14, pp. 2239 – 2253, 2006.