



Modélisation du transfert thermique conducto-radiatif dans un isolant mince réfléchissant multi-couche

David Joseph, Delfin Braga

► To cite this version:

David Joseph, Delfin Braga. Modélisation du transfert thermique conducto-radiatif dans un isolant mince réfléchissant multi-couche. JITH 2007, Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00167351

HAL Id: hal-00167351

<https://hal.science/hal-00167351>

Submitted on 29 Aug 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation du transfert thermique conducto-radiatif dans un isolant mince réfléchissant multi-couche

David JOSEPH¹, Delfin BRAGA²

¹ HPC-SA, 3, Ch. du Pigeonnier de la Cépière, Bât.C, Toulouse, France
joseph@hpc-sa.com

² ACTIS, Avenue de Catalogne, Limoux, France
delfin.braga@actis-isolation.com

Résumé : Les isolants minces réfléchissants utilisés pour l'isolation thermique des bâtiments présentent une constitution particulière leur conférant des efficacités différentes en fonction de leur environnement sous toiture. Afin de déterminer, le véritable pouvoir isolant de ce type de matériau, un modèle physique détaillé prenant en compte le couplage conducto-radiatif et basé sur le calcul des sensibilités par la méthode de Monte Carlo est proposé. Ce modèle a permis d'estimer avec précision les flux thermiques dans un isolant complexe composé de matériau fibreux absorbant et diffusant en présence de parois réfléchissantes spéculaires.

Mots clés : Thermique de l'habitat, Isolant Mince Réfléchissant, Conduction, Rayonnement, Monte Carlo, Sensibilité.

1. INTRODUCTION

Le marché de l'isolation des bâtiments a vu naître une nouvelle catégorie d'isolant, les isolants minces réfléchissants multi-couches (*IMRMC*). Ces produits testés en grandeur réelle [1,2] montre une efficacité supérieure à celle mesurée lors des tests menés en laboratoire [3]. Afin d'expliquer cette différence, il est nécessaire de comprendre le processus de transfert thermique à travers une enveloppe d'habitation intégrant un tel isolant. Une modélisation détaillée des mécanismes physiques (phénomènes conducto-radiatifs) présents dans les milieux alvéolaires ou fibreux tel que les ouates de polyester qui constituent un *IMRMC* constitue un premier pas vers cette compréhension. Or, le transfert thermique au sein de tels produits multi-couches n'a été étudié que pour des conditions extrêmes [4,5] et aucune modélisation fine de ce transfert validée dans le domaine de l'habitat n'est aujourd'hui disponible. Nous établirons donc un modèle physique simple validé ici en régime permanent et qui sera transposé en régime instationnaire et comparé aux mesures in situ.

2 MODÈLE PHYSIQUE

2.1 Couplage conducto-radiatif

Un isolant mince réfléchissant multi-couche (IMRMC) peut être considéré comme un simple assemblage de plusieurs couches de ouate de polyester de faible épaisseur (~ 1 cm) séparées par des films réfléchissants. La ouate de polyester peut être assimilée à un milieu semi-transparent absorbant et diffusant (κ_0 coefficient d'absorption de la ouate et σ_0 son coefficient de diffusion). Le transfert thermique à travers chaque couche de ouate est de type conducto-radiatif. L'équation de l'énergie en tout point du système s'écrit :

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = -\text{div} \left(-\lambda \frac{dT}{dx} + S_r \right) \quad (1)$$

où ρ est la masse volumique du matériau fibreux, C_p sa chaleur massique, λ sa conductivité thermique et S_r est le terme source radiatif ou bilan radiatif local.

Du fait de la faible épaisseur des ouates et de la présence des films réfléchissants, les épaisseurs optiques en jeu sont faibles. La présence des films réfléchissants impose l'utilisation de modèle de conditions limites prenant en compte une émissivité de parois non noires ($\epsilon \neq 1$). Il est donc nécessaire d'utiliser un modèle de transfert radiatif mieux adapté et plus précis que le modèle de Rosseland ou Deissler (approximation de milieu épais avec parois réfléchissante) classiquement utilisé dans le domaine de l'habitat [6].

Les systèmes à modéliser évoluent dans des plages de températures comprises entre 250 K et 320 K, domaine où la luminance de Planck est quasiment linéaire. Il est donc possible d'envisager une méthode de couplage conducto-radiatif basée sur le calcul des sensibilités du champs de terme source radiatif S_r aux variations du profil de température [7, 8].

2.2 Calcul de sensibilité par la méthode de Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo permet de calculer les facteurs de formes ξ_{ij} entre les différents couple d'éléments $\{E_i, E_j\}$ constituant un système et les puissances nettes échangées (PNE) par rayonnement ϕ_{ij} qui leurs sont associées, et ce avec une estimation du degré de précision via l'écart-type, ce qui en fait une méthode quasi-exacte :

$$\phi_{ij} = \xi_{ij} (L_b(T_i) - L_b(T_j)) \quad (2)$$

Sous l'hypothèse de l'invariance du facteur de forme aux profils de température, la sensibilité de cette PNE à la température de l'élément E_j devient :

$$\frac{d\phi_{ij}}{dT_j} = \xi_{ij} \frac{dL_b(T_j)}{dT_j} \quad (3)$$

où L_b est la luminance du corps noir.

Le terme source radiatif $S_{r,i}$ d'un élément E_i étant le bilan de l'ensemble de ses PNE ϕ_{ij} échangées avec les N éléments constituant le reste du système, on peut décrire l'évolution de cette grandeur physique comme il suit :

$$S_{r,i}^n = S_{r,i}^0 + \sum_{j=1}^N \frac{d\phi_{ij}}{dT_j} \cdot (T_j^n - T_j^0) \quad (4)$$

où $S_{r,i}^0$ est la somme des ϕ_{ij} de la solution initiale de référence obtenue par la méthode de Monte Carlo.

Le code de calcul radiatif atmosphérique KARINE développé par V.EYMET [7, 9] est utilisé afin d'obtenir les ϕ_{ij} et des ξ_{ij} . Basé sur la méthode de Monte Carlo, il permet d'estimer les PNE entre les différentes mailles d'un système monodimensionnel en prenant en compte les phénomènes d'émission, d'absorption et de diffusion dans un milieu non gris ainsi que le phénomène de réflexion spéculaire aux limites qui peuvent être générés par la présence des films réfléchissants. L'application d'un tel modèle au transfert thermique dans un milieu fibreux tel qu'une couche de ouate de polyester requiert une connaissance exacte des propriétés spectrales de ce type de matériau : κ_o , σ_o mais aussi le paramètre d'asymétrie g associé à la fonction de phase de diffusion. Il envisageable d'effectuer la mesure expérimentale détaillée de ces propriétés spectrales pour un matériau fibreux mais ceci requiert la mise en oeuvre de procédure complexe et lourde [10, 11].

Dans une première approche du couplage, l'hypothèse d'un milieu gris isotrope est donc faite. Toutefois, le spectre des fréquences est divisé en autant de bandes spectrales que nécessaires afin de prendre en compte la dépendance spectrale de la luminance de corps noir L_b , en prévision d'un éventuel passage à l'hypothèse de milieu non-gris.

2.3 Méthode de caractérisation du matériau fibreux

La conductivité thermique réelle λ des matériaux de type fibreux intervenant dans l'équation (1) est souvent inaccessible à la mesure directe, la présence de phénomène radiatif intervenant intrinsèquement lors des mesures expérimentales. Cependant, à partir du modèle conducto-radiatif établi à partir des équations (1) et (4), il est tout de même possible de générer des abaques exprimant le flux thermique en fonction de l'épaisseur du milieu et ce pour des émissivités différentes aux conditions limites, en faisant varier les paramètres $\{\kappa_o, \sigma_o, \lambda_o\}$ sur des domaines adaptés aux problèmes posés. Pour l'étude actuelle, les variations de λ_o ont été limité à la plage $[20 \text{ mW.K}^{-1}.\text{m} ; 70 \text{ mW.K}^{-1}.\text{m}]$ avec un pas de variation de $5 \text{ mW.K}^{-1}.\text{m}$, et celles des coefficients d'absorption et de diffusion ont été effectuées sur la plage $[0 \text{ m}^{-1} ; 400 \text{ m}^{-1}]$ avec un pas de variation de 50 m^{-1} . Des abaques ont été établis pour des émissivités de parois de 0.9, 0.5 et 0.05. En régime stationnaire, il n'existe qu'un seul trio $\{\kappa_o, \sigma_o, \lambda_o\}$ pouvant correspondre aux différents flux mesurés pour des configurations d'émissivités de parois différentes (le phénomène de réflexion rallonge les chemins optiques en accentuant le rôle de la diffusion et en augmentant la probabilité du phénomène d'absorption par le milieu). Nous avons donc établi un protocole de mesure au fluxmètre en 9 points (3 épaisseurs de milieu et 3 émissivités de parois différentes correspondant aux abaques) permettant de caractériser sur les abaques le seul trio de paramètres correspondant aux flux observés expérimentalement (cf. Fig. 1). Les 3 épaisseurs de milieu sont choisies de façon à pouvoir estimer les flux pour des domaines d'épaisseur optique suffisamment variés. Ceci constitue une méthode de caractérisation de conductivité thermique réelle et des propriétés radiatives (modèle non spectral) du matériau étudié.

3. APPLICATION À UN ISOLANT MULTICOUCHE

Des mesures expérimentales de flux ont été réalisées en laboratoire sur trois

configurations faisant intervenir 5 couches de ouate polyester de 10,7 mm d'épaisseurs, seules ou en présence de 6 films réfléchissants d'émissivité $\varepsilon=0.05$. La configuration A est composée des 5 couches de ouate seules. La configuration B est composée du même regroupement de 5 couches de ouate sur lequel sont déposés les 6 films réfléchissants (borne supérieure). La configuration C propose d'intercaler les 5 couches de ouates de polyester entre les 6 films réfléchissants. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un fluxmètre en imposant pour chacune de ces configurations une température $T_{Haut} = 15^{\circ}\text{C}$ à la borne supérieure du dispositif et une température $T_{bas} = 35^{\circ}\text{C}$ à la borne inférieure. Les bornes du fluxmètre ont une émissivité mesurée $\varepsilon_{fluxmètre} = 0.9$. À l'aide des abaques, la ouate utilisée a pu être caractérisée comme il suit : conductivité thermique $\lambda_0 = 30 \text{ mW.K}^{-1}.\text{m}$, coefficient d'absorption $\kappa_0 = 50 \text{ m}^{-1}$ et le coefficient de diffusion $\sigma_0 = 200 \text{ m}^{-1}$.

Ces trois configurations ont été simulées sur le logiciel Minitherm intégrant le moteur de calcul KARINE et le modèle de couplage conducto-radiatif exposé précédemment. Ce logiciel permet d'obtenir l'évolution du champ de températures et des flux conducto-radiatifs au cours du temps. Les simulations ont été effectuées sur une période suffisante pour considérer que le régime stationnaire est atteint. Les valeurs moyennes ϕ_{moy} des profils de flux obtenus en fin de simulation sont reportés dans le tableau 1 ci-après pour chacune des configurations. L'erreur relative par rapport à l'expérience est inférieure à 2%. L'erreur relative associée au processus de mesure expérimentale a été estimée à $\pm 5\%$. On peut donc observer l'efficacité du modèle de couplage fondé sur le calcul de sensibilité pour un domaine d'application tel que celui de la thermique de l'habitat, l'hypothèse de linéarité étant parfaitement respectée pour le domaine de variation de température associée à cette étude. Le rôle des films réfléchissants au niveau du transfert par rayonnement thermique au sein du complexe est mis en exergue. La rupture répétée des échanges radiatifs qui se feraient à distance amène la conduction à devenir le mode de transfert thermique majoritaire et réduit le flux thermique de 36 % entre les configurations A et C.

Configuration	ϕ_{moy} mesuré (W.m^{-2})	ϕ_{moy} simulé (W.m^{-2})	Erreur relative (%)
A	21.86	21.70	0,73
B	20.56	20.48	0,39
C	13,62	13,84	1,62

Tableau 1 : Flux thermiques mesurés et simulés

4. CONCLUSION

L'application de ce modèle de couplage en régime stationnaire répond parfaitement au besoin d'analyse dans des configurations de type habitat, l'évolution du système étant progressive et lente. Les résultats de cette méthodologie fondée sur l'utilisation d'abaques pour déterminer les propriétés spectrales des matériaux semi-transparents montre la pertinence de cette approche simple. L'effort doit maintenant être porté sur une meilleure précision de ces abaques (voire une automatisation de l'évaluation des 3 paramètres caractéristiques à partir de la base de données) et sur la modélisation des transferts thermiques et du couplage conducto-radiatif en régime instationnaire. L'utilisation de cette méthodologie pour des techniques de caractérisations rapides de types flash est envisageable.

REFERENCES

- [1] D. Braga, C. Portet et M. Duran, Méthodologie comparative de la performance énergétique des bâtiments, *soumis au congrès SFT 2007*.
- [2] F. Miranville, H. Boyer, T. Mara et F. Garde, On the thermal behaviour of roof-mounted radiant barriers under tropical and humid climatic conditions: modelling and empirical validation, *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp 997–1008, 2003.
- [3] Note d'information du GS N°20, *Les performances des produits minces réfléchissants opaques utilisés dans l'enveloppe des bâtiments*, CSTB, 24 Juin 2004
- [4] M. Spinnler, E.R.F. Winter, R. Viskanta, T. Sattelmayer, Theoretical studies of high-temperature multilayer thermal insulation using radiation scaling, *JQSRT*, Vol.84, pp. 477-491.
- [5] P. Li et H. Cheng, Thermal analysis and performance study for multilayer perforated insulation material used in space, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, pp. 2020-2026, 2006.
- [6] X. Brige, G. Jeandel, F. Asllanaj, P. Boulet, et G. Parent, Etude des limites des modèles de ROSSELAND et DEISSLER appliqués au cas d'un milieu anisotrope, *VIe Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois Thermique des systèmes*, Article CIFQ2003/08-05, 26-28 mai 2003, Québec.
- [7] M. Roger, M. El Hafi, R. Fournier, S. Blanco, A. De Lataillade, V. Eymet et P. Perez, Applications of Sensitivity Estimations by Monte Carlo Methods, *The 4th International Symposium on Radiative Transfer*, Istanbul, Turkey, 2004.
- [8] H.L. Yi, H.P. Tan et Y.P. Lu, Effect of reflecting modes on combined heat transfer within an anisotropic scattering slab, *JQSRT*, 95, pp 1–20, 2005.
- [9] V. Eymet, Simulation Monte Carlo et analyse en Puissances Nettes Echangées des transferts radiatifs Infrarouges avec diffusion : vers une paramétrisation dans un modèle de circulation générale atmosphérique, *PhD thesis*, Université Paul Sabatier, 2003.
- [10] A. Milandri, Détermination des paramètres radiatifs d'un isolant fibreux : théorie de Mie, oscillateur de Lorentz et méthode inverse, *PhD thesis*, Henri Poincaré-Nancy I, 2000.
- [11] A. Milandri, F. Asllanaj, G. Jeandel et J.R. Roche, Heat transfer by radiation and conduction in fibrous media without axial symmetry, *JQSRT*, 74, pp 585–603, 2002.