

0017-9310(95)00397-5

Etude théorique de l'influence des infibrés sur le comportement radiatif des isolants fibreux

P. BOULET, G. JEANDEL et G. MORLOT

L.E.M.T.A., Faculté des Sciences, BP 239, 54506 Vandoeuvre Les Nancy Cedex, France

et

P. DE DIANOUS

C.R.I.R.—Isover Saint Gobain Centre de Recherches et de Développement,
BP 19, 60290 F Rantigny, France*(Reçu 18 décembre 1994 et sous forme finale 8 octobre 1995)*

Abstract—Cet article présente une étude théorique de l'influence de particules infibrées sur le comportement radiatif d'un milieu de fibres de silice. Le matériau considéré est simulé par un mélange de particules cylindriques (fibres) et sphériques (infibrés). L'analyse des propriétés radiatives est réalisée sous l'hypothèse du régime de diffusion indépendante. Un modèle de transfert permet ensuite de calculer le flux radiatif correspondant et d'étudier les facteurs qui l'influencent. En particulier, les effets liés aux caractéristiques morphologiques, telles que la fraction de mélange des fibres et la taille des particules sphériques, sont étudiés. Il apparaît que les infibrés influent sur le transfert par rayonnement à travers les milieux fibreux et peuvent conduire à une altération des propriétés d'isolation thermique en fonction de leur géométrie.

Copyright © 1996 Elsevier Science Ltd.

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, de nombreuses études théoriques ont été menées sur les problèmes de transfert de chaleur à travers les milieux fibreux, tels que les isolants. En particulier, sur le thème spécifique du transfert par rayonnement, rendu complexe par le comportement de ce type de matériaux. Leur structure poreuse provoque des interactions rayonnement-matière compliquées, liées aux phénomènes d'absorption, d'émission et de diffusion anisotrope, qu'il est nécessaire d'analyser [1–4].

En dépit de difficultés importantes, de nombreux progrès ont été réalisés, grâce aux méthodes de modélisation numérique, notamment. Partant des indices optiques du matériau en masse et de la morphologie exacte des fibres (taille et orientation), il est maintenant possible de simuler, de façon précise le comportement radiatif d'un milieu fibreux [5, 6]. Cependant certaines particularités rencontrées dans les isolants industriels demandent des investigations supplémentaires pour améliorer la validité des simulations effectuées. Cela est par exemple nécessaire pour analyser l'influence du liant organique qui assure la tenue des fibres entre elles dans le milieu. Un autre facteur d'influence important est lié à la présence de particules non fibreuses, dont la proportion peut devenir importante dans les isolants du type laines de roche, suivant le procédé de fibrage utilisé. La mise en évidence des effets liés à cette dernière caractéristique sur la partie radiative du transfert de chaleur est l'objet de cet

article. A température ambiante, le transfert radiatif représente environ 40% du transfert de chaleur global [4, 5] et cette proportion est susceptible d'augmenter avec le niveau de température. Cette importance justifie que l'on cherche à mieux prendre en compte les effets éventuels des infibrés sur le transfert par rayonnement. Dans le but de progresser sur cet aspect du problème, nous nous sommes donc intéressés aux phénomènes radiatifs sans couplage avec les autres modes de transfert, même s'il est clair que d'autres effets peuvent être attendus sur le transfert par conduction notamment. Cependant, en travaillant à température ambiante, la prise en compte du couplage conduction-rayonnement n'affecte pas les caractéristiques radiatives [6]. De plus, le champ de température étant linéaire dans ces conditions, la résolution séparée de l'équation du transfert radiatif est possible puisque la seule inconnue restante est le champ de luminance.

Des observations récentes menées par les centres de recherche de Saint-Gobain sur des laines de roche industrielles ont montré que le taux d'infibrés peut atteindre 50% en masse dans certains matériaux [7]. Ces infibrés ont la forme de gouttes, prolongées par une queue fine et sont dus au procédé de fibrage. Pour étudier les conséquences de telles données, nous avons entrepris la modélisation du comportement radiatif de particules non fibreuses. La silice étant le constituant majoritaire des laines de roche, nous avons consacré notre étude à des particules (fibres et sphères) de silice pure. Nous avons pour cela, en accord avec les observations précédentes, simulé les infibrés par des

NOMENCLATURE

f_v	fraction volumique de milieu	ξ	angle polaire
L_λ	luminance spectrale	$\sigma_{a\lambda}$	coefficient spectral d'absorption
L_λ^0	luminance spectrale du corps noir	$\sigma_{e\lambda}$	coefficient spectral d'extinction
p_λ	fonction de phase	$\sigma_{s\lambda}$	coefficient spectral de diffusion
r	rayon de la particule	$[\sigma_{sp}](\mu_1, \mu_2)$	coefficient bidirectionnel de diffusion.
Q_λ	efficacité spectrale		
Q_r	flux radiatif		
$T(y)$	température à l'abscisse y		
X_r	fraction de mélange		
y	abscisse.		
Symbols grecs		Indices	
α	paramètre de taille	a	absorption
λ	longueur d'onde	e	extinction
μ	cosinus de l'angle polaire ξ	f	caractéristique des fibres
		i, j	indexation des directions discrètes
		s	diffusion
		sp	caractéristique des sphères
		λ	propriété spectrale.

particules sphériques de diamètre allant de 2 à 50 μm et plus. Afin de voir les effets liés à ces seules particules par comparaison avec un cas de milieu purement fibreux, nous avons par ailleurs déterminé les propriétés d'un milieu de référence simple, composé de fibres de taille unique réparties de façon isotrope dans l'espace (le diamètre choisi, 7 μm , et cette répartition correspondent en effet à des caractéristiques moyennes pour ce type de matériau [2]).

Les éléments de base du problème considéré sont présentés dans différents ouvrages de référence. En ce qui concerne la détermination des propriétés radiatives, les travaux de Van De Hulst [8] d'une part, de Kerker [9] d'autre part, donnent des solutions satisfaisantes pour décrire les phénomènes d'absorption, de diffusion et d'extinction par des particules sphériques et cylindriques. Mais la programmation des propriétés résultantes nécessite l'utilisation de fonctions de Bessel en variables complexes qui, utilisées sans précaution, conduisent à des problèmes d'instabilités ou de divergence (particulièrement dans le cas des particules de grande taille par rapport à la longueur d'onde d'incidence). Les études complémentaires de Bohren et Huffman [10], prennent mieux en compte ces difficultés numériques en proposant des relations de récurrence qui permettent un calcul plus rapide et stable. Par ailleurs, sur le problème de la caractérisation des fibres, une série d'articles de Lee [11, 12] traite de l'influence de l'orientation des fibres et de la dépendance directionnelle des propriétés radiatives.

Le cas d'un mélange de plusieurs types de particules a reçu moins d'attention. On trouve dans la littérature des études séparées mais peu d'analyses sur le mélange de cylindres et de sphères [13]. Seuls Lee *et al.* [14, 15] proposent une étude complète de ce type de mélange. Leur but est par contre différent du nôtre. Ils traitent de l'amélioration des propriétés radiatives d'un milieu de fibres de silice par adjonction de petites particules sphériques (de diamètre 3 μm) dans une

gamme de longueurs d'onde couvrant l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge. Cette étude a montré que l'utilisation d'un tel mélange peut atteindre ce but en couplant un bon pouvoir réflecteur dans l'ultraviolet et une forte émission dans l'infrarouge. Notre démarche est différente ici. Nous considérons un mélange de particules représentatif d'un matériau réel contenant des infibrés indésirables, dont nous voulons observer l'influence sur le transfert radiatif. Par ailleurs nous nous intéressons à des particules dont certaines ont un diamètre plus grand que la longueur d'onde du rayonnement (diamètre pouvant dépasser 50 μm). Malgré cela, nous pouvons nous inspirer de la méthode utilisée par Lee *et al.* pour calculer les propriétés radiatives de notre milieu. En particulier, nous reprendrons l'hypothèse du régime de *diffusion indépendante* décrite dans la référence [14], pour obtenir une caractérisation correcte d'un milieu composé d'un mélange de particules.

Connaissant les propriétés radiatives d'un milieu semi-transparent donné, nous pouvons résoudre l'équation du transfert radiatif. La méthode de résolution utilisée, basée sur une procédure matricielle, a été détaillée dans deux communications [5, 6]. Nous en rappelons brièvement le principe dans cet article. Nous utiliserons ce même modèle ici pour déterminer le flux radiatif au sein du milieu étudié, avec les paramètres qui l'influencent. Cela nous permettra également d'envisager les possibilités d'améliorer les propriétés radiatives par modification des caractéristiques morphologiques des particules.

Le principe de la méthode appliquée est détaillé, dans un premier temps, avec le calcul des propriétés radiatives d'un type donné de particules (sphères ou fibres), puis on aborde la détermination des caractéristiques d'un mélange avec les deux types de particules en tenant compte de la part respective de chaque élément. Ce calcul donne accès aux différents coefficients spectraux d'absorption, de diffusion et d'extinction,

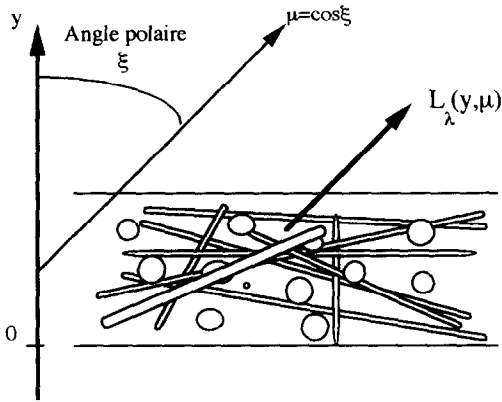


Fig. 1. Représentation schématique du milieu.

ainsi qu'aux coefficients bidirectionnels, traduisant la géométrie de diffusion [6]. Notre modèle de transfert permet alors d'en déduire le flux de rayonnement caractéristique du matériau pour des conditions de température définies, avec les paramètres d'influence correspondants (notamment la taille des particules et leur proportion). Un ensemble de résultats numériques permettant l'étude de l'influence des particules infibrées sur le comportement radiatif d'un milieu fibreux est ensuite analysé.

2. MODELISATION

Le milieu qui nous intéresse est schématisé sur la Fig. 1. Il s'agit d'un milieu plan de faible épaisseur par rapport aux autres dimensions (le problème de transfert est alors traité en mode monodimensionnel).

Pour caractériser son comportement radiatif, la procédure de calcul habituelle comprend les trois étapes suivantes :

- (i) calcul des propriétés radiatives d'un type donné de particules (de géométrie sphérique ou cylindrique) ;
- (ii) détermination des propriétés du milieu constitué d'un mélange de particules de taille et proportion définies et

(iii) modélisation du transfert radiatif à travers le milieu à partir des données de l'étape (ii).

Les variations spectrales des indices d'absorption et de réfraction constituent, avec les données morphologiques des particules, les données de base du calcul des propriétés radiatives. Les valeurs d'indice que nous avons utilisées ont été déterminées par les centres de recherche de Saint Gobain à partir de mesures spectroscopiques de transmission et de réflexion sur des lames de silice. Les résultats obtenus sont présentés sur la Fig. 2. Nous retrouvons certaines caractéristiques connues telles que le faible niveau d'absorption en-dessous de $5 \mu\text{m}$ et les filtres de Christiansen à 7.3 et $19.3 \mu\text{m}$ (à ces longueurs d'onde, l'indice de réfraction de la silice est égal à celui de l'air, ce qui provoque l'absence de phénomènes de diffusion comme nous le constaterons par la suite).

En ce qui concerne la première phase du calcul, si nous avons traité séparément les deux types d'éléments diffusants, nous avons par contre gardé la même procédure de calcul. Dans les deux cas, l'analyse est fondée sur la représentation de l'interaction entre la matière et les ondes électromagnétiques. La résolution des équations de Maxwell permet alors le calcul des facteurs d'efficacité de diffusion et d'extinction ainsi que de la fonction de phase pour une particule [8-10]. Les propriétés de l'ensemble du milieu sont ensuite obtenues en intégrant les données précédentes sur l'ensemble des éléments absorbants-diffusants. C'est cette étape du calcul qui permet de bien prendre en compte les caractéristiques morphologiques du matériau (particulièrement la taille et l'orientation des particules).

Les propriétés obtenues sont fonction de la longueur d'onde incidente. Ce comportement non gris est lié aux valeurs de l'indice complexe de réfraction qui varient fortement (particulièrement dans le cas de la silice, que nous traitons ici). Il est donc nécessaire d'effectuer les calculs en fonction de la longueur d'onde pour obtenir une représentation précise des phénomènes.

Par ailleurs, les variations directionnelles des propriétés radiatives ne sont pas les mêmes pour les fibres et pour les infibrés. Nous avons décrit la forte dépendance observée dans le cas d'un milieu purement fibreux dans un article précédent [6]. Nous avons par exemple noté des pics de diffusion vers l'avant très marqués et dépendant du paramètre de taille α ($\alpha = 2\pi r/\lambda$, avec r désignant le rayon de la particule et λ la longueur d'onde incidente). Si cette anisotropie du phénomène de diffusion est un résultat attendu, il est à noter que les autres coefficients spectraux sont eux aussi dépendants de la direction d'incidence. Ce n'est pas le cas pour les particules sphériques, du fait de leur géométrie isotrope. Leur étude est par conséquent plus simple, même si d'un point de vue numérique, nous gardons les mêmes contraintes directionnelles que pour les fibres, afin de pouvoir coupler facilement nos résultats lors de l'étude d'un milieu composé d'un mélange de particules.

L'analyse d'un milieu 'mixte', composé de particules, sphériques et cylindriques, est grandement simplifiée avec l'hypothèse de la diffusion indépendante, ce qui signifie que les particules élémentaires sont supposées diffuser le rayonnement indépendamment les unes des autres. Une telle hypothèse est justifiable compte tenu de la très faible fraction volumique des matériaux que nous étudions [16] (la fraction volumique exprime le rapport entre la masse volumique du milieu fibreux et la masse volumique du matériau constituant les particules ; pour les matériaux qui nous intéressent : $f_v < 0.01$). La distance résultante entre les éléments diffusants peut être estimée suffisante pour considérer que le phénomène de diffusion d'une onde par une particule n'est pas affecté par les particules voisines. Ce concept de base permet de réaliser un calcul séparé pour chaque type d'élément diffusant. Une pondéra-

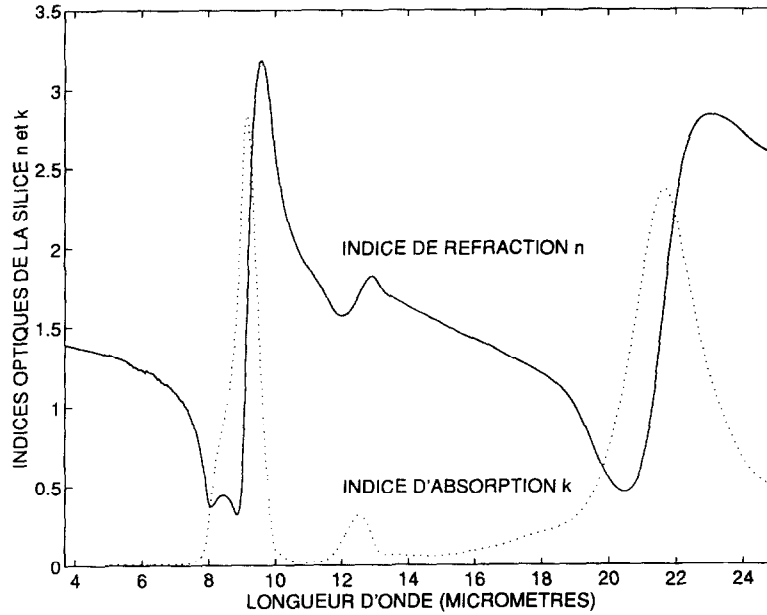


Fig. 2. Indices d'absorption et de réfraction de la silice en fonction de la longueur d'onde.

tion simple est enuiste réalisée à partir de la *fraction de mélange* des particules.

2.1. Propriétés radiatives des fibres

Les travaux de Lee permettent de calculer les propriétés radiatives d'un milieu fibreux en tenant compte de l'orientation des fibres [12]. Nous nous intéressons ici au cas de fibres réparties aléatoirement dans l'espace, qui sont représentées comme des cylindres réguliers de longueur infinie, la comparaison entre leur longueur réelle (de l'ordre du mm) et leur diamètre ou la longueur d'onde incidente (de l'ordre du μm) justifie pleinement cette approximation. En partant des efficacités spectrales Q_{sf} selon Kerker [8], les coefficients σ_{sf} correspondants sont donnés par :

$$\sigma_{sf} = \frac{2f_v}{\pi r_f} \cdot Q_{sf} \quad (1)$$

où l'indice *f* désigne les propriétés des fibres (comme *sp* désignera plus loin les propriétés des sphères), r_f est le rayon des fibres considéré constant. La procédure de calcul étant définie, pour déterminer les coefficients d'absorption (σ_{asf}), de diffusion (σ_{dsf}) et d'extinction (σ_{esf}), il suffit d'utiliser l'efficacité correspondante : Q_{asf} , Q_{dsf} ou Q_{esf} .

D'après l'analyse de Lee, la fonction de phase (p_{sf}) peut être déduite de l'intensité de diffusion de Kerker et représentée comme une fonction des angles polaires d'incidence et de diffusion [14]. Etant donné qu'elle apparaît dans une intégrale sous la forme d'un produit avec le coefficient de diffusion, $\sigma_{dsf}(\mu)$, dans le bilan radiatif, nous avons calculé un facteur correspondant, que nous avons appelé coefficient de diffusion bidirectionnel et noté $[\sigma_s P]_{sf}$. Il représente la diffusion d'une onde d'incidence donnée (*i*) vers un secteur angulaire centré sur une direction donnée (*j*) mise en forme

qui permet une utilisation directe dans notre modèle multi-flux de résolution du bilan radiatif.

Soient μ_i et μ_j les valeurs des cosinus des angles polaires respectifs, les coefficients sont donnés par :

$$[\sigma_s P]_{sf}(\mu_i, \mu_j) = \frac{2f_v}{\pi r_f} \cdot \frac{1}{2} \int_{\mu_i - \Delta\mu/2}^{\mu_i + \Delta\mu/2} Q_{s,if} \cdot p_{sf}(\mu_i, \mu') d\mu' \quad (2)$$

$Q_{s,if}$ est l'efficacité spectrale de diffusion, p_{sf} est la fonction de phase de diffusion selon Lee et $\Delta\mu$ indique la largeur du secteur angulaire de diffusion (imposée par les conditions de discrétisation définie pour résoudre le bilan radiatif).

2.2. Propriétés radiatives des particules sphériques

Considérons dans ce paragraphe un milieu exclusivement composé de sphères de rayon r_{sp} . Le calcul préalable des efficacités et de l'intensité de diffusion utilise des formules de récurrence. Les relations proposées par Bohren et Huffman [8], basées sur les études de Kerker [9] et de Van De Hulst [10], permettent de caractériser des particules de la taille qui nous concerne (jusque 50 μm) sans instabilité numérique liée aux fonctions de Bessel en variables complexes. A partir de ces résultats, les coefficients spectraux ($\sigma_{s,sp}$) sont alors donnés par une formule analogue au cas des fibres à partir des efficacités ($Q_{s,sp}$) :

$$\sigma_{s,sp} = \frac{3f_v}{4r_{sp}} \cdot Q_{s,sp} \quad (3)$$

La même procédure est appliquée pour le calcul des coefficients d'absorption ($\sigma_{a,sp}$), de diffusion ($\sigma_{s,sp}$) et d'extinction ($\sigma_{e,sp}$).

La géométrie de diffusion peut également être déter-

minée de la même façon que pour les milieux fibreux. Nous calculons ensuite les coefficients bidirectionnels de diffusion des sphères à partir de la fonction de phase :

$$[\sigma_s P]_{\text{isp}}(\mu_i, \mu_j) = \frac{3f_v}{4r_{\text{sp}}} \cdot \frac{1}{2} \int_{\mu_j - \Delta\mu/2}^{\mu_i + \Delta\mu/2} Q_{s,\text{isp}} \cdot P_{\text{isp}}(\mu_i, \mu') d\mu'. \quad (4)$$

2.3. *Cas d'un mélange de particules sphériques et cylindriques*

A partir des propriétés déterminées dans les paragraphes précédents, nous pouvons étudier le cas d'un mélange. La fraction volumique f_v du milieu est le rapport entre la masse volumique du milieu (ensemble des particules : sphères et cylindres) et la masse volumique du matériau constitutif des particules. Elle caractérise donc le milieu global. Le paramètre qui permet de réaliser une pondération des propriétés suivant la part respective des types de particules est la fraction de mélange, notée X_f [14]. Elle représente la fraction de fibres en masse (masse des fibres par rapport à la masse totale de verre). Un milieu défini par $X_f = 0$ est constitué exclusivement de sphères alors que si $X_f = 1$ il s'agit d'un milieu purement fibreux.

Considérons les coefficients précédents, σ_{isp} et σ_{sf} , caractérisant respectivement les propriétés des particules sphériques et cylindriques que nous avons calculées pour la même fraction volumique f_v (le fait qu'il s'agisse des propriétés d'absorption, de diffusion ou d'extinction ne change rien au principe de calcul). Sous l'hypothèse de la diffusion indépendante, les caractéristiques du mélange sont données par :

$$\sigma_\lambda = X_f \cdot \sigma_\lambda \cdot f + (1 - X_f) \cdot \sigma_\lambda \cdot sp. \quad (5)$$

En utilisant les coefficients adaptés, l'équation (5) est valable pour les différentes propriétés radiatives (coefficients spectraux d'absorption, de diffusion, d'extinction et coefficients bidirectionnels de diffusion).

2.4. *Modélisation du transfert radiatif*

Considérons un milieu semi-transparent de propriétés radiatives connues. La mise en équation du problème de transfert par rayonnement conduit à l'écriture d'un bilan radiatif (voir notamment Ozisik [17]). Dans le cas d'un problème de transfert monodimensionnel avec symétrie azimutale, l'équation du transfert radiatif s'écrit :

$$\mu \frac{\partial L_\lambda(y, \mu)}{\partial y} = -\sigma_{e\lambda}(\mu) L_\lambda(y, \mu) + \sigma_{a\lambda}(\mu) L_\lambda^0[T(y)] + \frac{1}{2} \int_{\mu' = -1}^1 \sigma_{s\lambda}(\mu) \cdot P_\lambda(\mu', \mu) L_\lambda(y, \mu') d\mu'. \quad (6)$$

Les indices e, a et s caractérisent respectivement l'extinction, l'absorption et la diffusion. $L_\lambda(y, \mu)$ représente la luminance spectrale au sein du milieu, selon la direction définie par le cosinus d'angle polaire μ , à

l'abscisse $y \cdot L_\lambda^0[T]$ désigne la luminance spectrale du corps noir à la température T .

Les conditions aux limites utilisées correspondent au cas de frontières noires avec températures imposées. Vu le matériau que nous étudions (épaisseur 10 cm et masse volumique 10 kg/m³), la prise en compte de valeurs d'émissivités réelles (de l'ordre de 0.9) compliquerait la résolution et ne modifierait pas les valeurs de flux radiatifs obtenues au sein du milieu parce qu'il est optiquement épais. L'influence des parois n'est sensible que très près de celles-ci [5].

L'équation (6) décrit les interactions rayonnement-matière au sein du milieu. Pour résoudre le problème lié à la présence du terme intégral, une discrétisation spatiale selon m directions est effectuée. Ce principe est analogue à celui utilisé dans les méthodes aux ordonnées discrètes, mais la procédure employée est du type multi-flux. L'espace est découpé en m secteurs angulaires isotropes, la luminance est ensuite supposée constante dans chaque secteur. La décomposition en deux domaines ($m = 2$) correspond à l'hypothèse de l'isotropie hémisphérique de la luminance qui permet l'écriture de modèles simplifiés du type deux-flux. Cependant, pour rendre compte du caractère directionnel du rayonnement et de la forte anisotropie du phénomène de diffusion, il est nécessaire de choisir un découpage plus fin.

La relation (6) est alors réécrite sans forme discrétisée, conduisant à un système de m équations différentielles de la forme :

$$\mu_i \frac{\partial L_\lambda(y, \mu_i)}{\partial y} = -\sigma_{e\lambda}(\mu_i) L_\lambda(y, \mu_i) + \sigma_{a\lambda}(\mu_i) L_\lambda^0[T(y)] + \sum_{j=1}^m [\sigma_s P]_\lambda(\mu_i, \mu_j) \cdot L_\lambda(y, \mu_j). \quad (7)$$

Nous avons réalisé notre étude pour $m = 12$, ce qui est suffisant pour obtenir des résultats précis pour les valeurs de flux [5]. Les variations spectrales sont également prises en compte grâce à un calcul réalisé sur 52 valeurs de longueur d'onde. Nous étudions un matériau soumis à des températures proches de la température ambiante. Compte tenu des caractéristiques d'émission du corps noir dans ces conditions, le domaine spectral qui a été retenu pour le calcul est compris entre 4 et 40 μm .

Nous utilisons ensuite une mise en forme matricielle qui conduit à la détermination du champ de luminance dans le matériau. Le flux radiatif peut alors être calculé par double intégration sur l'ensemble des directions angulaires et en fonction de la longueur d'onde :

$$Q_r(y) = \int_{\lambda=0}^{\infty} 2\pi \int_{\mu=-1}^1 L_\lambda(y, \mu) \mu d\mu d\lambda. \quad (8a)$$

Compte tenu de nos discrétisations successives, l'intégration est en fait remplacée par deux sommes discrètes sur 12 directions et sur 52 longueurs d'onde :

$$Q_r(y) = 2\pi \sum_{n=1}^{52} \sum_{i=1}^{12} L_n(y, \mu_i) \mu_i \Delta\mu \Delta\lambda. \quad (8b)$$

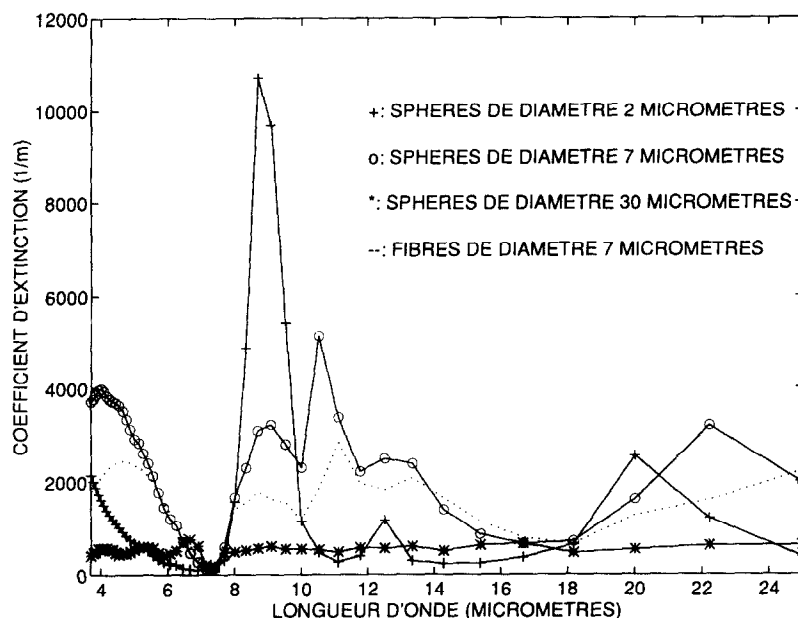


Fig. 3. Variations spectrales du coefficient d'extinction pour un milieu composé d'un type de particules. Cas étudiés : fibres de diamètre $7 \mu\text{m}$; sphères de diamètres $2, 7$ et $30 \mu\text{m}$.

$\Delta\mu$ et $\Delta\lambda$ correspondant aux pas choisis lors des discrétisations angulaire et spectrale et $L_n(y, \mu_i)$ désignant la luminance spectrale à l'abscisse y , dans la direction discrète μ_i calculée à la longueur d'onde λ_n .

3. RESULTATS

Notre étude concerne un milieu poreux avec les caractéristiques suivantes :

matériau de base : silice pure (masse volumique 2200 kg/m^3),

masse volumique du milieu : 10 kg/m^3 (fraction volumique résultante : $f_v \approx 0.005$),

épaisseur du milieu : 10 cm ,

fibres de diamètre $7 \mu\text{m}$, orientées de façon isotrope dans l'espace,

sphères de diamètre compris entre 2 et $50 \mu\text{m}$.

Sur la Fig. 3, nous avons représenté les variations spectrales du coefficient d'extinction calculé pour un milieu purement fibreux (pointillés) et d'autres constitués exclusivement de sphères de diamètre unique pris successivement égal à $2, 7$ et $30 \mu\text{m}$ (lignes continues). Une caractéristique commune à chacune des courbes est la chute de l'extinction autour de $7.3 \mu\text{m}$.

Cette particularité est en fait provoquée par les propriétés de la silice (faiblesse de l'absorption combinée à l'effet Christiansen évoqué précédemment). Les autres variations sont fortement tributaires du type de particules et de leur taille.

Les sphères de grand diamètre atténuent très faiblement le rayonnement, quelle que soit la longueur d'onde incidente, en comparaison avec les autres particules. Cette faiblesse doit conduire à des flux de transfert élevés. Le comportement spectral présente

peu de singularité en dehors de $7.3 \mu\text{m}$. Ce n'est pas le cas pour les autres particules étudiées. Si nous comparons le cas des particules sphériques et cylindriques pour un même diamètre, nous pouvons observer des variations spectrales marquées mais similaires, avec un niveau d'extinction légèrement plus élevé pour les sphères en dessous de $14 \mu\text{m}$. Les sphères de petit diamètre se comportent différemment. Elles présentent une extinction plus faible que celle des particules précédentes pour les longueurs d'onde inférieures à $7.3 \mu\text{m}$, puis une diminution logique autour de $7.3 \mu\text{m}$, avec ensuite un pic d'extinction très pointu à $9 \mu\text{m}$ (lié en grande partie à un pic d'absorption de la silice observable sur la Fig. 2). La complexité de ces variations nécessite une analyse complémentaire, notamment en ce qui concerne le phénomène de diffusion.

La Fig. 4, qui représente les variations spectrales des coefficients de diffusion calculés dans les mêmes conditions que précédemment, confirme nos premières analyses. Ce qui est particulièrement intéressant, c'est la faiblesse du niveau de diffusion des grosses particules. Ensuite, si nous considérons des éléments de même taille, fibres ou sphères (diamètre $7 \mu\text{m}$), nous observons un comportement spectral similaire malgré une diffusion globalement plus élevée dans le cas des sphères. Au contraire, pour les sphères de petite taille, le coefficient de diffusion varie différemment et la diffusion disparaît pratiquement pour les longueurs d'onde supérieures à $12 \mu\text{m}$ (l'absorption contribue alors essentiellement à l'atténuation du rayonnement).

Un autre facteur important, caractéristique des interactions rayonnement-matière, est la géométrie de diffusion. La Fig. 5 traite le cas de différentes particu-

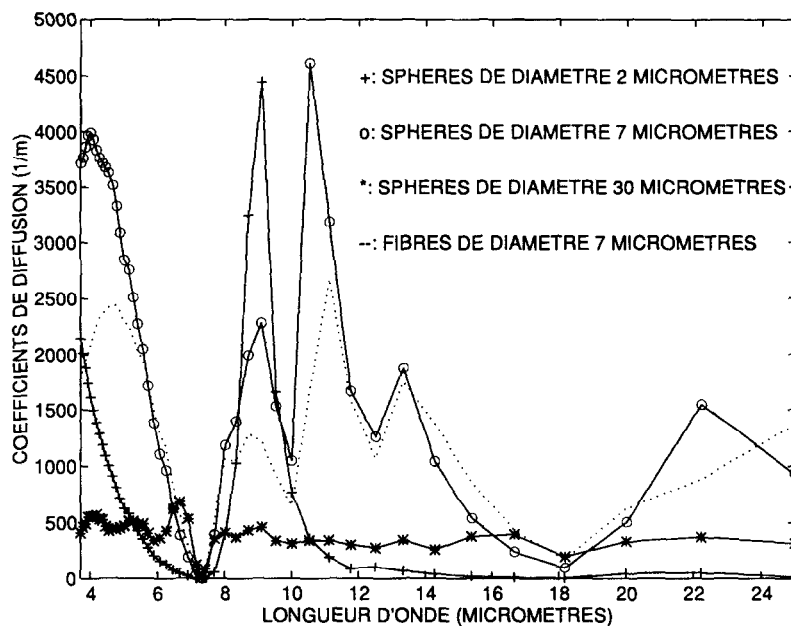


Fig. 4. Variations spectrales du coefficient de diffusion pour un milieu composé d'un type de particules. Cas étudiés : fibres de diamètre 7 μm ; sphères de diamètres 2, 7 et 30 μm .

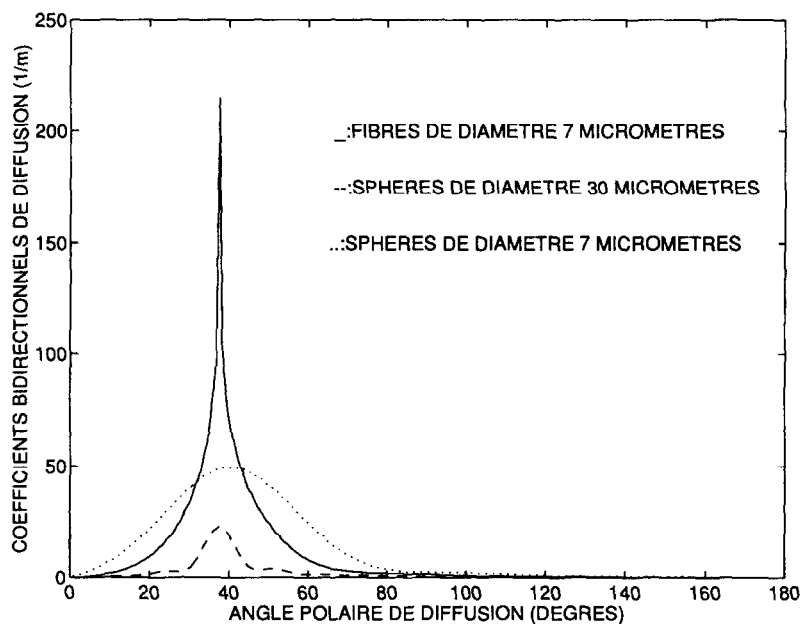


Fig. 5. Coefficients de diffusion bidirectionnels en fonction de l'angle polaire de diffusion pour une incidence de 5 μm selon un angle polaire de 37.5°. Largeur des secteurs angulaires de diffusion : 0.75°. Cas étudiés : fibres de diamètre 7 μm ; sphères de diamètres 7 et 30 μm .

les soumises à un rayonnement incident de longueur d'onde 5 μm avec un angle d'incidence de 37.5°. (Il s'agit d'une des directions discrètes choisie pour notre calcul de flux dans le cas d'une discrétisation avec $m = 12$ directions. Nous ne représentons que ce cas pour la clarté de la figure, sachant que l'allure obtenue pour d'autres angles d'incidence est similaire avec simplement un décalage autour de la direction d'incidence correspondante.) Les courbes obtenues présentent les coefficients de diffusion bidirectionnels corresponda-

nts en fonction de la direction de diffusion. Afin d'obtenir un profil lisse, nous avons effectué nos calculs avec un pas très fin entre les directions de diffusion (la largeur des secteurs angulaires de diffusion est de 0.75°). La géométrie de diffusion correspondant aux deux types de particules, sphères ou cylindres, apparaît nettement différente. Si les fibres diffusent de façon très anisotrope, avec un pic de diffusion très pointu dans la direction d'incidence, les sphères présentent une anisotropie moins marquée avec un pic de diffu-

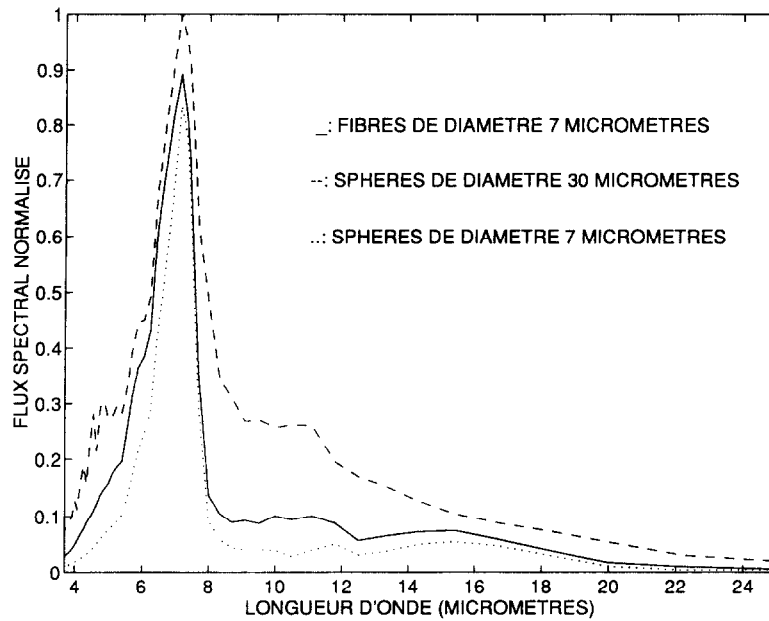


Fig. 6. Flux radiatif spectral en fonction de la longueur d'onde pour un milieu d'épaisseur 10 cm et de températures de paroi fixées à 20 et 30 °C, respectivement. Composition des milieux étudiés : fibres de diamètre 7 μm exclusivement ; sphères de diamètres 7 ou 30 μm exclusivement.

sion plus faible. Il s'agit là d'une caractéristique qui permettrait donc aux sphères de mieux atténuer le passage du rayonnement à travers le milieu. (Il est à noter qu'une répartition anisotrope des fibres conduirait à une fonction de phase encore plus singulière ; cela accentuerait la différence de comportement entre sphères et fibre. Par exemple les fibres stratifiées en plans provoquent des pics de rétrodiffusion également très marqués [6].) Par contre, nous retrouvons le résultat observé sur la figure précédente : dans cette gamme de longueurs d'onde, les sphères de grande taille diffusent beaucoup moins le rayonnement. Cette faiblesse diminue donc leur aptitude à atténuer le transfert du rayonnement.

Observons maintenant les variations spectrales des flux radiatifs déduits des propriétés précédentes. La température moyenne du matériau est de 25 °C et la différence de température entre les parois est 10 °C. Voyons d'abord les résultats correspondant aux deux types de particules séparément (Fig. 6). Les variations présentées sont ramenées entre 0 et 1 en divisant par la valeur maximale du flux spectral obtenu (ici, cela correspond au cas des sphères de diamètre 30 μm pour une longueur d'onde de 7.3 μm). La particularité essentielle est le pic dit de Christiansen, autour de 7.3 μm . Dans le cas de fibres ou de sphères de diamètre 7 μm , nous obtenons une courbe similaire, avec des valeurs de flux légèrement inférieures pour les sphères. Ceci est en accord avec les observations précédentes sur les propriétés radiatives. Deux facteurs expliquent cet état de fait : l'extinction plus élevée des sphères pour les longueurs d'onde inférieures à 14 μm et la prédominance moins marquée de la diffusion vers l'avant. Au contraire, les grandes sphères sont caracté-

risées par un flux radiatif plus élevé à cause de leur niveau d'extinction trop faible. Nous voyons nettement ici que l'influence des particules sphériques dans un milieu fibreux dépend fortement de leur taille.

Ceci apparaît clairement sur la Fig. 7, où le flux radiatif total (intégré sur toute la gamme de longueurs d'onde) est tracé en fonction du diamètre des particules. Pour permettre une comparaison avec le cas des fibres, nous avons également indiqué la valeur de flux qui correspond à un milieu purement fibreux, constitué de fibres réparties aléatoirement dans l'espace (*), ou stratifiées dans des plans parallèles aux frontières du matériau (o). En ce qui concerne les sphères, nous pouvons observer qu'il existe une taille susceptible de minimiser le flux de transfert ; diamètre proche de 7 μm . Le flux augmente rapidement en dessous et au delà de cette valeur particulière. Cela confirme le résultat de la Fig. 6 et montre également que les propriétés isolantes du milieu considéré ici (fibres de silice de diamètre 7 μm , mélangées à des particules sphériques) peuvent être améliorées si la taille des sphères est adaptée. Rappelons que l'existence d'une taille de particule optimale pour limiter le transfert radiatif à également été observée dans le cas des fibres. La valeur obtenue est cependant plus faible, puisqu'elle est d'environ 2 μm [3–5].

Connaissant les propriétés respectives de milieux constitués des différents types de particules, nous pouvons à présent analyser le comportement d'un milieu 'mixte'. La Fig. 8 présente le flux radiatif caractéristique d'un milieu constitué de fibres de diamètre 7 μm et de sphères dont le diamètre a été fixé successivement à 7, 30 puis 50 μm (avec les mêmes conditions d'épaisseur et de température que précédemment).

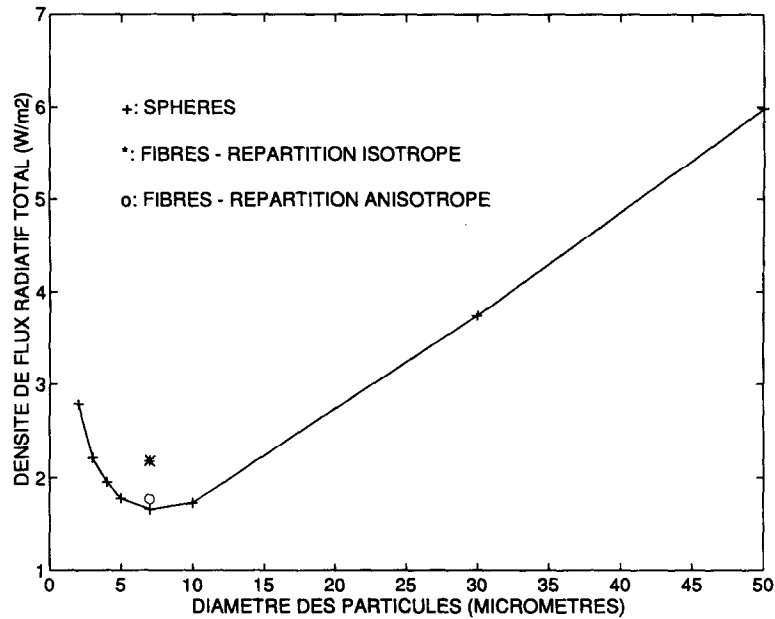


Fig. 7. Flux radiatif total d'un milieu composé exclusivement de sphères en fonction du diamètre des particules. Cas étudiés : milieux d'épaisseur 10 cm et de températures de paroi fixées à 20 et 30°C, respectivement. Les valeurs correspondant au cas de fibres de 7 μm placés dans les mêmes conditions sont indiquées : (*) pour une orientation aléatoire dans l'espace, (o) pour des fibres stratifiées en plans parallèles aux frontières.

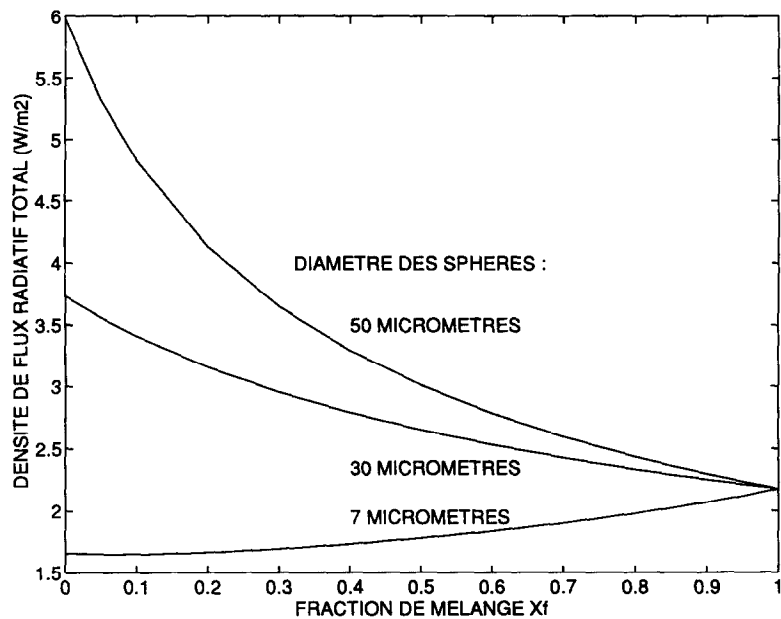


Fig. 8. Flux radiatif total pour un mélange de fibres de diamètre 7 μm et de sphères de diamètre fixé successivement à 7, 30 et 50 μm , en fonction de la fraction de mélange X_f . Cas étudiés : milieux d'épaisseur 10 cm et de températures de paroi fixées à 20 et 30°C respectivement.

Dans chaque cas, le flux est tracé en fonction de la fraction de mélange X_f . La valeur obtenue s'écarte donc progressivement de la caractéristique d'un milieu purement fibreux au fur et à mesure que X_f tend vers 0. En accord avec l'analyse de la Fig. 7, les sphères de diamètre 7 μm conduisent à une diminution du flux, alors que les sphères de plus grand diamètre provoquent une augmentation du flux radiatif. Comme nous

pouvons le voir ici, la présence de particules infibrées de grande taille est donc susceptible d'altérer les propriétés thermiques d'un isolant fibreux.

Nous avons entrepris de simuler une telle altération correspondant au cas d'un milieu constitué de fibres de diamètre 7 μm et d'infibrées de diamètre 30 μm (tailles rencontrées dans un matériau réel du type laine de roche [7]). Nous avons donc tracé (Fig. 9) les

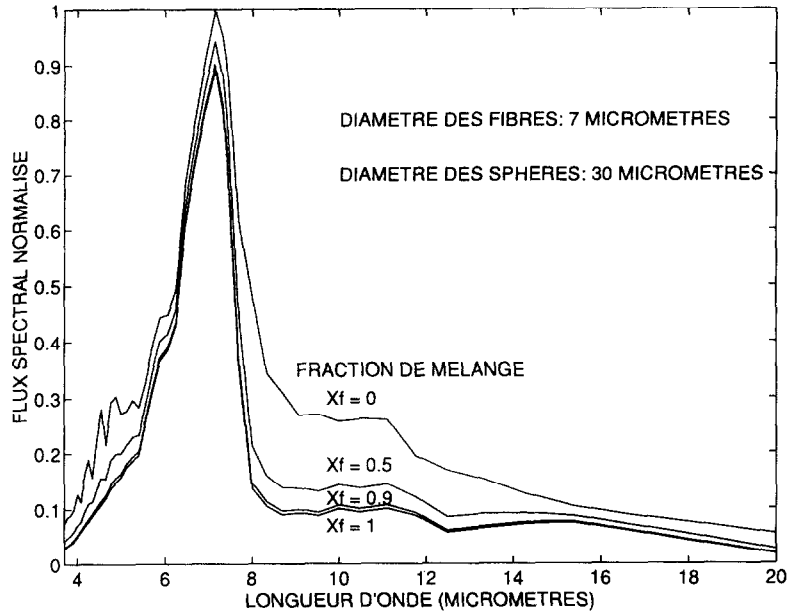


Fig. 9. Variations spectrales du flux radiatif pour plusieurs fractions de mélange. Cas étudié: milieu constitué de fibres de diamètre $7\ \mu\text{m}$ et de sphères de diamètre $30\ \mu\text{m}$, avec une épaisseur de $10\ \text{cm}$ et des températures de paroi fixées à 20 et 30°C , respectivement.

variations spectrales du flux radiatif pour plusieurs fractions de mélange (successivement 0 ; 0.5 ; 0.9 et 1). Les variations du flux sont ramenées entre 0 et 1 en divisant par la valeur maximale du flux spectral obtenu. Les écarts enregistrés par rapport au cas 'milieu purement fibreux' ($X_f = 1$) deviennent importants pour les fractions de mélange inférieures à 0.5 . L'augmentation du flux est observable dans toute la gamme de longueurs d'onde. Nous avons calculé les valeurs de densité de flux radiatif total correspondantes d'après la relation (8). Dans les conditions de température définies précédemment, nous avons obtenu: $2.2\ \text{W m}^{-2}$ pour $X_f = 1$ (fibres uniquement), $2.25\ \text{W m}^{-2}$ pour $X_f = 0.9$, $2.65\ \text{W m}^{-2}$ pour $X_f = 0.5$ et $3.7\ \text{W m}^{-2}$ pour $X_f = 0$ (sphères uniquement). En conséquence, une fraction de mélange de 0.5 , valeur observable sur des matériaux réels, conduit à une augmentation du flux de transfert radiatif de 18% . En fait, les particules infibrées ont des diamètres variables de valeurs souvent supérieures à $30\ \mu\text{m}$. Il s'agit donc ici d'une évaluation théorique de leur possible influence sur le transfert. Mais une altération encore plus importante des propriétés isolantes est à attendre, puisque nous avons vu que le transfert augmente rapidement avec la taille des sphères. Pour présenter des caractéristiques thermiques exactes, il est maintenant nécessaire de réaliser des observations expérimentales plus fines pour introduire dans notre modèle des caractéristiques morphologiques précises (notamment en ce qui concerne les deux facteurs essentiels: taille et proportion des infibrés).

4. CONCLUSIONS

Nous avons étudié le comportement radiatif dans l'infrarouge d'un matériau constitué de deux types de

particules de silice: des fibres (de diamètre $7\ \mu\text{m}$) et des sphères (de diamètre compris entre 2 et $50\ \mu\text{m}$). Nous avons analysé dans un premier temps les propriétés de milieux constitués exclusivement d'un type d'éléments, puis nous avons effectué une pondération tenant compte de la part respective des constituants, approximation autorisée dans le cadre du régime de diffusion indépendante. Cette procédure a été appliquée à la simulation théorique d'un isolant fibreux contenant une part de particules infibrées. L'analyse de nos résultats montre que ces éléments ont une influence importante sur les valeurs de flux de transfert. Une altération nette des propriétés isolantes a été observée dans le cas de particules de taille importante (diamètre $30\ \mu\text{m}$). Cet effet est d'autant plus prononcé que la taille des infibrés et leur proportion croissent. Nous avons également constaté l'existence d'un diamètre de particule permettant de minimiser la part radiative du flux liée aux infibrés ($7\ \mu\text{m}$ sur le cas étudié ici).

Cette étude porte uniquement sur l'aspect radiatif du transfert de chaleur. Il est clair que la présence d'infibrés influence également le transfert par conduction en modifiant notamment la géométrie des contacts entre particules. Cet aspect fera l'objet d'études complémentaires.

REFERENCES

1. T. W. Tong and C. L. Tien, Radiative heat transfer in fibrous insulation—1. Analytical study, *J. Heat Transfer* **105**, 70–75 (1983).
2. G. Guilbert, Etude des caractéristiques optiques de milieux poreux semi-transparents. Thèse, Nancy 1 (1985).
3. D. Banner, Propriétés radiatives des verres et des fontes

- de silicates. Modélisation des transferts de chaleur. Thèse, Ecole centrale de Paris (1990).
4. V. P. Nicolau, M. Raynaud and J. F. Sacadura, Spectral radiative properties identification of fiber insulating materials, *Int. J. Heat Mass Transfer* **37**(1), 311–324 (1994).
 5. P. Boulet, Etude du transfert par rayonnement à travers les milieux fibreux. Thèse, Nancy 1 (1992).
 6. P. Boulet, G. Jeandel and G. Morlot, Model of radiative transfer in fibrous media—matrix method, *Int. J. Heat Mass Transfer* **36**(18), 4287–4297 (1993).
 7. G. Jeandel et P. Boulet, Etude des isolants fibreux. Contract no. 931014 S.G.R., L.E.M.T.A., Mai (1995).
 8. H. C. Van de Hulst, *Light Scattering by Small Particles*. John Wiley, New York (1957).
 9. M. Kerker, *The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiations*. Academic Press, New York (1969).
 10. C. F. Bohren and D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. J. Wiley, New York (1983).
 11. S. C. Lee, Radiation heat transfer model for fibers oriented parallel to diffuse boundaries, *J. Thermophys. Heat Transfer* **2**(4), 303–308 (1988).
 12. S. C. Lee, Effect of fiber orientation on thermal radiation in fibrous media, *Int. J. Heat Mass Transfer* **32**, 311–319 (1989).
 13. K. Y. Wang and C. L. Tien, Radiative heat transfer through opacified fibers and powders, *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer* **30**(3), 213–223 (1983).
 14. S. C. Lee, S. White and J. Grzesik, Effect of particle size in composite materials on radiative properties, *AIAA* 93-2729, 28th Thermophysics Conference, Orlando, FL (1993).
 15. S. White, S. C. Lee and J. Grzesik, Advanced particulate fibrous composite for thermal control re-entry vehicles, *AIAA* 93-2824, 28th Thermophysics Conference, Orlando, FL (1993).
 16. M. Q. Brewster and C. L. Tien, Radiative transfer in packed fluidized beds: dependent versus independent scattering, *J. Heat Transfer* **104**, 573–579 (1982).
 17. M. N. Ozisik, *Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection*. J. Wiley, New York (1973).

THEORETICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF SLUGS ON THE RADIATIVE BEHAVIOUR OF FIBROUS MEDIA

Abstract—A theoretical investigation of the influence of non-fibrous particles on the radiative behaviour of a silica based fibrous insulant is presented. Simulating the real medium by a mixture of cylindrical and spherical particles, an analysis of the resulting radiative properties is first proposed under the independent scattering assumption. A model of transfer leads then to the determination of the radiative fluxes with the parameters influencing them. In particular the morphological features such as the fibre mixture fraction and the spherical particle size are studied. It appears that the non-fibrous elements do affect the radiative behaviour of the fibrous materials, leading to an alteration of their insulating properties in the case of large spheres.