

## Absorption et Diffusion du Rayonnement en Milieu Particulaire

J.L. Consalvi, B. Porterie, J.C. Loraud et R. Martin

Ert Feux, IUSTI- CNRS umr 6595, 5 Rue Enrico Fermi, Tech. De Château-Gombert, 13453 Marseille cedex 13, France

**Résumé** - Les transferts radiatifs dans un milieu composé d'une phase gazeuse et de particules sont modélisés par l'équation de transfert radiatif multiphasique obtenue pour de grosses particules opaques en appliquant la moyenne pondérée d'Anderson et Jackson à l'équation de transfert radiatif de la phase gazeuse.

Cette approche théorique nouvelle se distingue des précédents travaux dans le domaine par le fait que les termes d'interactions entre la phase gazeuse et chacune des phases particulières mais aussi entre les phases particulières elles-mêmes (diffusion multiple) découlent de la dérivation mathématique et non plus de considérations empiriques.

L'équation de transfert radiatif multiphasique (ETRM) se présente comme une équation de transfert radiatif classique de sorte que les techniques de résolution numérique habituelles pour ce type d'équation sont applicables.

La méthode des ordonnées discrètes est ici utilisée pour la résolution numérique. Les résultats obtenus par l'ETRM montrent notamment un bon accord avec ceux obtenus par la méthode directe de Monte Carlo dans le cas de grosses particules opaques.

**Mots clés:** Transferts radiatifs - Milieux particuliers - Réflexions multiples - ETRM.

### 1. INTRODUCTION

Lorsqu'une onde électromagnétique ou un ensemble de photons traverse un milieu chargé en particules, l'intensité radiative est modifiée par absorption et/ ou par diffusion.

Le premier à avoir résolu le problème de la diffusion de la lumière par une particule sphérique en utilisant la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell est Gustav Mie en 1908. Cette théorie complexe est généralement utilisée lorsque le paramètre de taille ( $\chi = 2\pi D/\lambda$  où  $D$  est le diamètre de la particule et  $\lambda$  la longueur d'onde) est trop élevé pour appliquer la théorie de Rayleigh et trop faible pour utiliser l'optique géométrique. La solution dépend du diamètre de la particule, de la longueur d'onde et des propriétés radiatives du matériau considéré.

Pour un milieu contenant un grand nombre de particules et en utilisant l'hypothèse de diffusion indépendante (le rayonnement diffusé par une particule n'interagit pas avec les autres particules), les propriétés radiatives sont additives. Cette hypothèse est acceptable seulement lorsque le rapport entre la distance interparticulaire et la longueur d'onde du rayonnement incident est supérieur à 0.5.

Toutefois pour de grosses particules, même lorsque ce critère est vérifié, la théorie indépendante peut être mise en échec pour de fortes porosités [1]. Cet échec est attribué aux réflexions multiples (effets de dépendance entre les particules) que la théorie indépendante ne prend pas en compte. Divers auteurs ont proposé des modèles, basés sur des considérations empiriques pour prendre en compte les phénomènes de diffusion multiple [2].

Dans le présent papier, l'équation de transfert radiatif multiphasique (ETRM) [5] est utilisée pour modéliser les transferts radiatifs en milieu particulaire. L'ETRM est résolue par la méthode des ordonnées discrètes en utilisant une quadrature S-16 [4]. Les prédictions sont en bon accord avec les résultats obtenus par la méthode de Monte Carlo.

### 2. MODELE MATHEMATIQUE

Le milieu considéré étant un milieu multiphasique composé d'une phase gazeuse (phase continue) et de plusieurs phases particulières (phases dispersées), il semble naturel d'introduire, pour décrire les transferts radiatifs, les mêmes outils mathématiques que ceux utilisés pour traiter les écoulements multiphasiques. La dérivation de l'ETRM a été effectuée par Consalvi et al. [5] dans le cas de grosses particules sphériques opaques en appliquant la méthode des moyennes pondérées d'Anderson et Jackson à l'équation de transfert radiatif de la phase gazeuse [3].

L'ETRM prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left[ \alpha_g \langle L_g^\Omega \rangle \Omega \right] + \left( \sum_{k=1}^N \frac{\alpha_k \sigma_k \varepsilon_k}{4} + \alpha_g \beta_g \right) \langle L_g^\Omega \rangle = & \alpha_g (1 - \omega_g) \beta_g \langle L_b(T_g) \rangle + \sum_{k=1}^N \frac{\alpha_k \sigma_k \varepsilon_k}{4} \langle L_b(T_k) \rangle \\ & + \frac{\alpha_g \omega_g \beta_g}{4 \pi} \int_{4\pi} \langle L_g^{\Omega'} \rangle \Phi_g^{\Omega' \Omega} d\Omega' + \sum_{k=1}^N \frac{\alpha_k \sigma_k \varepsilon_k}{16 \pi} \int_{4\pi} \langle L_g^{\Omega'} \rangle \Phi_g^{\Omega' \Omega} d\Omega' \end{aligned}$$

où  $\varepsilon_k$  est l'émissivité des particules,  $\Phi_k$  est la fonction de phase de la phase particulaire  $k$ . Les paramètres  $\alpha_g$ ,  $\alpha_k$  and  $\sigma_k$  sont respectivement la porosité, la fraction volumique et la surface spécifique de la phase  $k$ . Chaque phase particulaire est constituée de particules ayant localement les mêmes propriétés physiques et radiatives.

Ainsi, la possibilité d'avoir un échantillon polydisperse et/ou d'avoir des particules de propriétés radiatives différentes peut être envisagé. Les termes d'interactions entre la phase gazeuse et les phases dispersées sont déduits mathématiquement et sont analogues à ceux utilisés par la théorie indépendante.

La théorie multiphasique assure, qu'en moyenne, les interactions entre les différentes phases particulières sont pris en compte; en particulier, celles liées à la diffusion multiple. La dérivation des termes sources radiatifs qui apparaissent dans les équations de l'énergie pour chaque phase a été effectuée à partir de l'ETRM dans la référence [5].

### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus sont comparés à ceux obtenus par la méthode de Monte Carlo qui fait office de référence et peut se substituer à des résultats expérimentaux.

La figure 1 montre l'évolution de la transmittance à travers à travers un milieu de sphères opaques non-émittantes, absorbantes et à diffusion spéculaire pour une porosité donnée  $\alpha_g = 0.476$ . Dans le cas d'une diffusion spéculaire, la fonction de phase peut être prise comme isotrope. Pour de telles porosités et de tels diamètres, Singh et Kaviany ont montré que la théorie indépendante est mise en défaut [1].

L'ERTM, quant à elle, moyenne les effets de réflexions multiples entre particules, ce qui conduit à un même comportement volumique que celui obtenu par la méthode de Monte Carlo. Les résultats obtenus par l'ERTM sont proches de sur ceux obtenus par Singh et Kaviany à l'aide d'une méthode empirique faisant intervenir un facteur d'échelle [1]. La théorie corrélée de Kamiuto [2], dont les résultats sont donnés également sur la figure 1, ne permet pas de traduire correctement le comportement radiatif des particules. Elle surestime la transmittance.

La figure 2 montre la transmittance à travers un milieu de particules opaques non-émittantes, absorbantes et à réflexion diffuse pour la même porosité. Les résultats obtenus par l'ETRM et la méthode d'échelle de Singh et Kaviany sont en bon accord avec ceux obtenus par la méthode directe de Monte Carlo tandis que la théorie corrélée de Kamiuto surestime toujours la transmission de rayonnement.

Il apparaît donc que, pour de larges particules grises, l'ETRM donne une bonne description des réflexion multiples à l'origine de l'échec de la théorie indépendante.

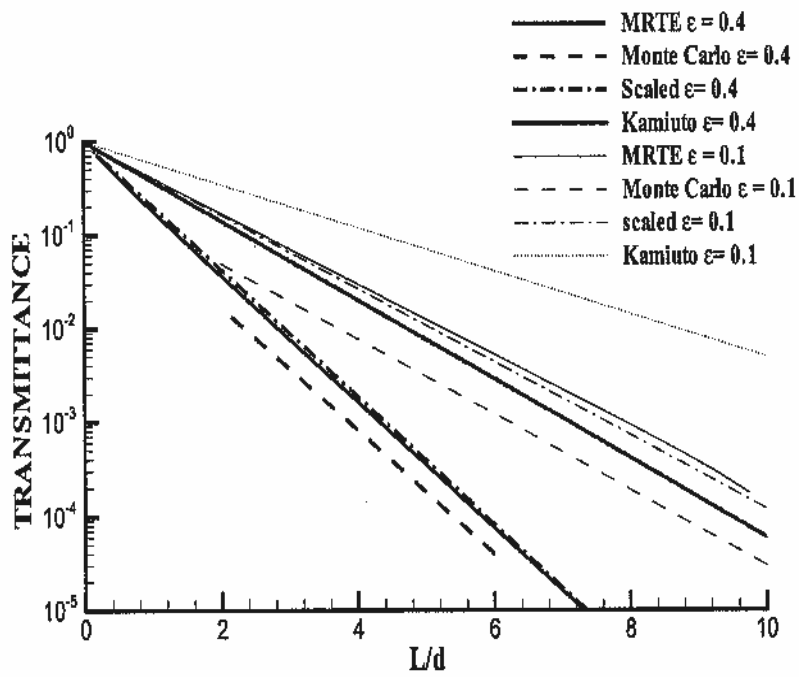


Fig. 1: Transmittance à travers un milieu de sphères opaques à réflexion spéculaire pour une porosité de 0.476

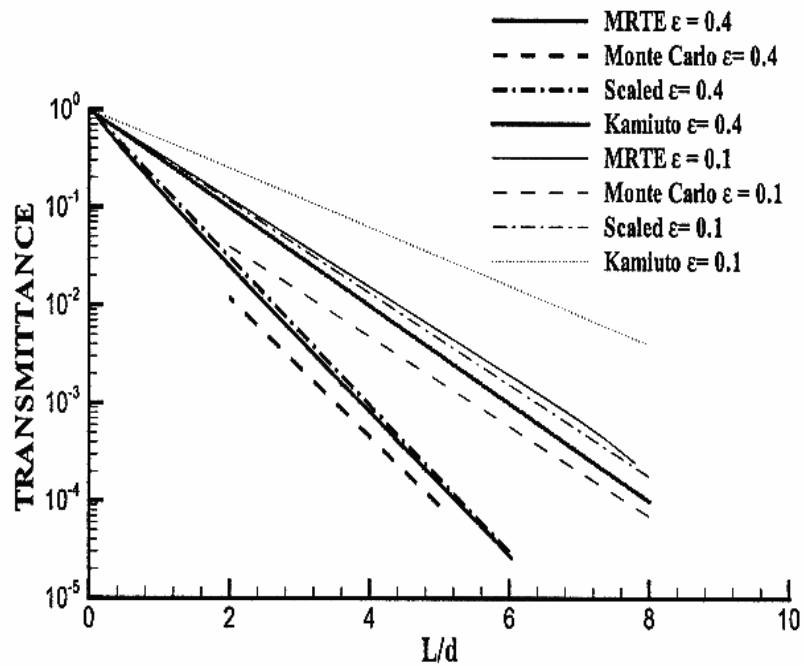


Fig. 2: Transmittance à travers un milieu de sphères opaques à réflexion diffuse pour une porosité de 0.476

#### 4. CONCLUSION

Les transferts radiatifs dans un milieu gazeux composé de particules larges et opaques sont traités par une équation de transfert radiatif multiphasique s'appuyant sur la méthode des moyennes pondérées d'Anderson et de Jackson. Cette équation permet de prendre en compte plusieurs familles de particules ayant localement des propriétés physiques et radiatives différentes et les effets de réflexions multiples qui mettent en échec la théorie indépendante dans le cas de grosses particules et de fortes porosités. Les résultats obtenus par l'ETRM sont en bon accord avec ceux obtenus par la méthode directe de Monte Carlo qui fait office de référence dans le domaine. Ils sont très proches de ceux obtenus par le modèle empirique de Singh et Kaviany.

L'ETRM constitue une alternative rigoureuse dans la modélisation des transferts radiatifs en milieux particulaires. La forme de cette équation permet une résolution numérique par les méthodes classiques de résolution des équations de transfert radiatif. De plus, les couplages radiatifs qui apparaissent dans les équations de l'énergie de la phase gazeuse et des phases particulaires s'expriment de manière directe. Une extension de l'ETRM à des particules semi-transparentes de toutes tailles a été effectuée et une validation de ce modèle est en cours.

#### REFERENCES

- [1] B.P. Singh and M. Kaviany, '*Independent Theory Versus Direct Simulation of Radiation Heat Transfer in Packed Beds*', Int. J. Heat Mass Transfer 34, 2869, 1991.
- [2] C.L. Tien and B.L. Drolen, '*Thermal Radiation in Particulate Media with Dependent and Independent Scattering*', A. Rev. Numer. Fluid Mech. Heat Transfer, 1, pp. 1-32, 1987.
- [3] T.B. Anderson and R. Jackson, '*A Fluid Mathematical Description of Fluidized Beds*', Ind. Eng. Chem. Fund. 6, 527, 1967.
- [4] W.A. Fiveland, '*Discrete Ordinates Methods for Radiative Heat Transfer in Isotropically and Anisotropically Scattering Media*', J. Heat Transfer, 109, pp. 809-812, 1987.
- [5] J.L. Consalvi, B. Porterie and J.C. Loraud, '*Model of Radiative Heat Transfer in Particulate Media*', Soumis à Int. J. Heat Mass Transfer.