

Evaluation des échanges radiatifs dans un assemblage d'un réacteur nucléaire lors de la phase de renoyage d'un APRP

Jonathan GERARDIN^{(1,2)*}, Amine HASSINI^(1,2), Pascal BOULET⁽¹⁾, Nathalie SEILER⁽²⁾, Pierre RUYER⁽²⁾, Georges REPETTO⁽²⁾

¹LEMMA, Faculté des Sciences et Techniques, BP 70239, 54506 Vandœuvre cedex

² IRSN/DPAM/SEMCA/LEMAR, BP3 - 13115 Saint Paul lez Durance

* (auteur correspondant : jonathan.gerardin@lemta.uhp-nancy.fr)

Résumé – Nous avons simulé les échanges radiatifs dans un milieu vapeur-gouttelettes dans des conditions représentatives d'un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire dans un Réacteur à Eau sous Pression. En combinant une méthode de résolution type IDA, dérivée de l'approximation P1, à un calcul de propriétés radiatives par méthode de Mie et modèle C-k, des densités de flux radiatifs de plusieurs dizaines de kW/m² ont été évaluées, confirmant le rôle non négligeable du rayonnement dans ce problème. L'hypothèse du milieu gris pour simuler le mélange vapeur-gouttelettes a également été évaluée, montrant des écarts relatifs atteignant 40%, niveau d'imprécision à prendre en considération en dépit d'une réduction attractive des temps de calcul.

1. L'accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP)

Dans le cadre de ses programmes de recherche en sûreté nucléaire, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) étudie l'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP). Il s'agit d'un accident de dimensionnement de référence d'un Réacteur à Eau sous Pression (REP), correspondant à la rupture d'une tuyauterie du circuit primaire et conduisant à un assèchement du cœur du réacteur. La pression dans le cœur va diminuer tandis que la température va augmenter et provoquer une déformation des gaines des crayons de combustibles. Des systèmes de secours permettent alors une injection d'eau borée qui vient refroidir le cœur. Lors de cette phase de l'accident, le cœur du réacteur présente des crayons très chauds et une forte vaporisation d'eau a lieu, impliquant un fort arrachement de gouttelettes au niveau du front de trempe. Un milieu vapeur+gouttelettes est donc formé autour des crayons chauds. Un des critères de sûreté est de maintenir la gaine qui entoure les crayons à une température inférieure à 1204°C. A ce niveau de température, le rayonnement thermique ne peut pas être négligé et peut atteindre le même ordre de grandeur que les autres modes de transfert comme l'ont montré Peak[1] ou Wong et Hochveiter[2]. Une évaluation plus fine de la contribution du rayonnement reste nécessaire. Nous avons pour cela lancé une étude (2D dans un premier temps, avec pour objectif de l'étendre en 3D) visant à quantifier les flux et divergences de flux radiatifs dans un écoulement vapeur et gouttes correspondant aux conditions d'un APRP. Une des difficultés est la nature du milieu : un mélange vapeur-gouttelettes absorbant, diffusant de façon anisotrope, émissif, et non-gris. Ce type de milieu semi-transparent nécessite des méthodes de résolution de l'Equation du Transfert Radiatif (ETR) souvent coûteuses en temps alors qu'à terme le module de calcul radiatif réalisé devra être couplé à un logiciel de simulation de l'écoulement (logiciel Neptune_CFD). Pour cette raison, nous avons retenu une méthode dite IDA (Improved Differential Approximation) dérivée de l'approximation P1, réputée comme un bon compromis précision - temps de calcul. Dans les paragraphes qui suivent nous discuterons successivement des propriétés radiatives, de la méthode de calcul, des résultats obtenus et de nos perspectives de travail.

2. Propriétés radiatives du milieu

Lors de la phase de renoyage d'un APRP, le cœur du réacteur est composé de crayons très chauds entourés d'un milieu composé de vapeur d'eau et de gouttelettes. L'ensemble peut être considéré comme un faisceau de cylindres de 12,22mm de diamètre séparés par une distance moyenne de 3,93mm. Le domaine est simplifié en considérant les différents plans de symétries observables si les crayons sont supposés isothermes. Nous considérons ensuite une coupe horizontale 2D du domaine. Les dimensions et autres données caractéristiques du milieu sont définies dans le tableau suivant :

Gouttelettes d'eau	Diamètre D_g (μm)	50-1000
	Température ($^{\circ}\text{C}$)	100
	Fraction volumique F_v (m^3 d'eau / m^3)	10^{-4} - 10^{-2}
Vapeur d'eau	Température T_v ($^{\circ}\text{C}$)	100-800
	Pression (bar)	1-2

Tableau 1 : Dimensions et grandeurs caractéristiques

Les propriétés radiatives du milieu sont évaluées par additivité simple des propriétés radiatives des différents composants : celles des gouttelettes et celles de la vapeur, évaluées selon les méthodes présentées ci-dessous. L'additivité simple se justifie par les valeurs de fraction volumique des gouttes, qui correspondent à une gamme où on est en situation de diffusion indépendante.

Pour calculer les propriétés radiatives des gouttelettes, la méthode la plus précise est la théorie de Mie, utilisée ici d'après une formulation de Bohren et Huffman [3]. Un calcul du facteur d'asymétrie g est effectué pour caractériser l'anisotropie de la diffusion (voir Modest [4]). Cela nous permettra par la suite d'obtenir un coefficient caractéristique d'une diffusion anisotrope linéaire, condition nécessaire au calcul par la méthode P1. Les propriétés radiatives de la vapeur sont calculées à l'aide d'un modèle C-k en suivant la méthode présentée par Soufiani et Taine [5]. Cette méthode précise assure une bonne description du comportement non gris de la vapeur d'eau pour un coût en calcul raisonnable (correspondant à une discrétisation spectrale basée sur un modèle 43 bandes, avec utilisation d'un découpage par bande selon une quadrature de Gauss à sept points). Afin d'éviter de recalculer les propriétés radiatives du milieu pour chaque cas, nous avons créé une base de données. 951 calculs de Mie ont été effectués afin d'avoir les propriétés des gouttelettes d'eau pour 951 diamètres différents (de $50\mu\text{m}$ à $1000\mu\text{m}$ tous les $1\mu\text{m}$) et 165 calculs du modèle C-k nous ont permis d'obtenir le coefficient d'absorption de la vapeur pour 11 pressions (1bar à 2bars tous les 0.1 bar) et 15 températures (374K à 1074K tous les 50K). Nous effectuons une interpolation des propriétés de la base de données afin d'obtenir les propriétés du milieu. L'interpolation s'effectue en quelques millièmes de seconde au lieu d'une vingtaine de secondes pour le calcul complet.

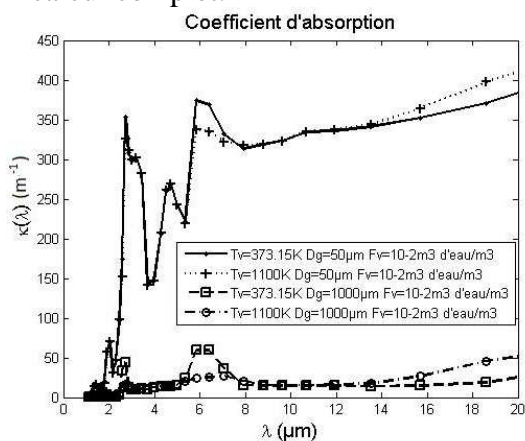


Figure 1 : Coefficients d'absorption pour différentes configurations en fonction de la longueur d'onde

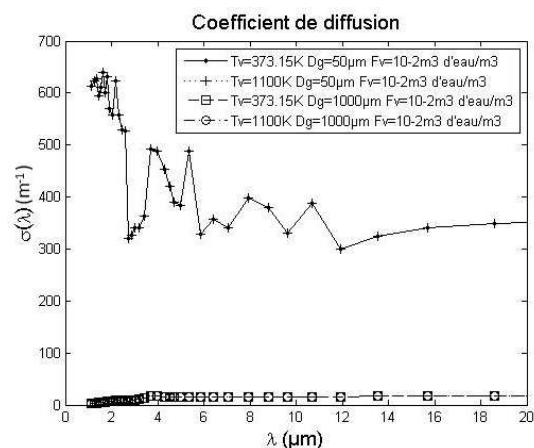


Figure 2 : Coefficients de diffusion pour différentes configurations en fonction de la longueur d'onde

Après sommation des contributions respectives des deux phases, notre milieu semi-transparent, absorbant, diffusant anisotrope, émissif présente globalement des propriétés fortement dépendantes de la taille des gouttelettes ainsi que de leur fraction volumique. Le milieu peut donc être optiquement fin ou optiquement épais suivant les différents cas. C'est ce que l'on constate sur les figures 1 et 2 où les coefficients d'absorption et de diffusion sont représentés en fonction de la longueur d'onde dans différentes situations de températures de vapeur, tailles et concentration en gouttes. Le caractère non gris est évident. La valeur des coefficients est quant à elle clairement gouvernée par le type de gouttelettes. En particulier les petites gouttes sont réputées pour induire une forte atténuation en rayonnement, comparées aux grosses gouttes (à quantité d'eau égale), ce que l'on observe avec des niveaux d'absorption et diffusion clairement supérieurs ici pour les gouttes de 50 μ m.

3. Méthode de calcul du transfert radiatif

Le module radiatif testé ici sera inséré dans le logiciel Neptune_CFD, un logiciel permettant de simuler localement l'écoulement diphasique de vapeur chargée en gouttes entre les crayons du cœur d'un REP dans la problématique de l'APRP. Il devra permettre de calculer les flux de chaleur par rayonnement dans le cœur à différents pas de temps. Il donnera aussi le terme de divergence de flux radiatif, à intégrer dans l'équation de conservation de l'énergie pour simuler de façon plus fine le transitoire de refroidissement. Vue la complexité globale du problème, le calcul radiatif doit être rapide. La méthode de Monte-Carlo, par exemple, ne peut pas être utilisée pour des raisons de temps de calcul prohibitif, mais elle a servi de référence pour la validation de notre module radiatif basé sur la méthode IDA.

3.1. Approximation P1+IDA

L'approximation P1 est une méthode basée sur une décomposition de la luminance en harmoniques sphériques qui permet d'obtenir une approximation de la solution de l'ETR en la transformant en un système d'équations différentielles. Pour l'approximation P1, nous utilisons une troncature d'ordre 1 de la formulation générale. Cependant, l'approximation P1 n'est suffisamment précise que lorsque le milieu est optiquement épais. Cela pose problème parce que notre milieu est optiquement fin dans certaines conditions, ou parce que la solution risque d'être imprécise près des frontières. L'approximation IDA permet de découper la luminance en une somme de deux contributions : une part représentative du rayonnement du milieu (calculé par la méthode P1) et une part correspondant au rayonnement des parois, atténué le long de son trajet optique. Ainsi, lorsque le milieu est optiquement épais, la solution tend vers la luminance du milieu (calculée par approximation P1, qui donne de bons résultats dans ce cas) et lorsque le milieu est optiquement fin, la luminance calculée est corrigée grâce à la contribution radiative issue des parois (voir détail de la formulation selon Modest [4]). Numériquement, la résolution repose sur une méthode type éléments finis, implémentée sur un maillage non structuré avec mailles triangulaires en employant une méthode de gradient conjugué comme méthode itérative pour la résolution.

3.2. Validation de la méthode

Une étude préliminaire de validation a été entreprise en comparant les résultats obtenus avec la méthode IDA et une solution de référence par méthode de Monte Carlo. Ces tests ont été fait dans la situation présentée plus loin (valeurs de flux et de divergence de flux dans une section transversale en situation réaliste d'APRP), mais aussi sur des cas plus académiques, notamment lorsque la méthode P1 devrait être mise en défaut : pour un milieu optiquement mince ou d'épaisseur optique intermédiaire. Dans une cavité carrée aux parois chauffées à 1173 K remplie d'un milieu absorbant diffusant à 373 K, un écart relatif maximal de 4% a été observé sur les divergences de flux pour une épaisseur optique τ (définie comme le produit de la largeur de la cavité par le coefficient d'extinction) égale à 1. Cet écart est même plus faible,

1%, pour un milieu optiquement fin ($\tau = 0,1$). Cela donne une indication de la précision de la méthode IDA lorsque les propriétés radiatives sont données. Il reste donc ensuite l'incertitude imputable à la description spectrale des propriétés radiatives, qui sera discutée plus loin. Typiquement, les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus avec un maillage triangulaire comprenant 200 mailles, avec une densité plus grande près des parois, et après vérification que la solution converge vers le même résultat pour un maillage plus fin. Le nombre de mailles est donc volontairement réduit, mais la perspective d'une extension en 3D doit être gardée à l'esprit et explique notre souhait de conserver un nombre de mailles limité.

4. Résultats

Les résultats obtenus sur les flux de chaleur et les divergences de flux sont maintenant présentés pour notre problème. Les calculs sont d'abord effectués pour un milieu non gris avec un modèle à 43 bandes, puis pour un milieu gris avec des propriétés moyennes équivalentes établies par une moyenne de Planck, dans l'idée de réduire si possible au maximum les temps de calcul (réduction par un facteur tout à fait intéressant, de l'ordre de 300 dans le cas présent), tout en connaissant le niveau d'imprécision introduit par une telle hypothèse.

4.1. Flux de chaleur

Les flux de chaleur obtenus sont présentés sur la figure 3 pour un ensemble de crayons à une température de 1173K entourés par un milieu composé de gouttelettes de $50\mu\text{m}$ avec une fraction volumique de $10^{-2} \text{ m}^3 \text{ d'eau} / \text{m}^3$ et de vapeur à 373K et 1bar (conditions de saturation). Le milieu est de ce fait très absorbant et diffusant. De plus l'écart de température entre les crayons et le milieu va impliquer de forts flux de chaleur. Compte tenu du traitement 2D du problème et des symétries observables, un quart de crayon est représenté et le flux est représenté dans une coupe transversale XY. Une comparaison avec un calcul réalisé pour un milieu gris supposé équivalent est proposée sur la figure 4, la différence entre les résultats des deux méthodes étant donnée sur la figure 5 par l'intermédiaire du rapport des flux prédits.

Le flux radiatif est orienté de façon logique, vu les niveaux de température, des parois vers le milieu avec une intensité maximale près des crayons. Les valeurs obtenues sont de l'ordre de 10 à 80kW/m^2 , ce qui confirme le rôle non négligeable du transfert radiatif dans la phase de refroidissement des crayons.

On remarque sur la figure 5 que le flux calculé avec l'hypothèse du milieu gris, bien qu'étant du même ordre de grandeur et avec une évolution semblable, est surestimé de 20% au niveau des parois, mais à tendance à être sous-estimé loin des parois (jusque 40% pour les plus faibles valeurs de flux). L'utilisation d'une telle hypothèse afin de réduire les temps de calcul devra prendre en compte ce niveau d'imprécision.

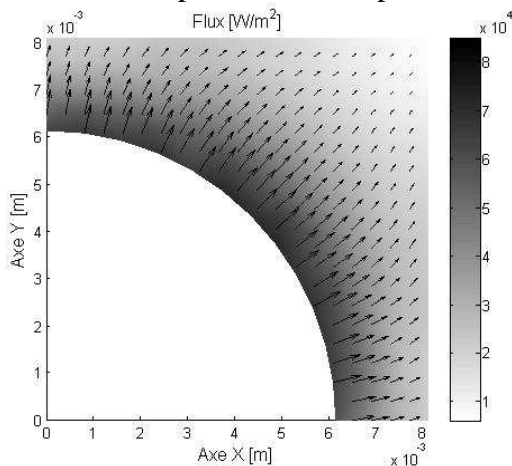


Figure 3 : Flux de chaleur calculé pour le milieu non gris

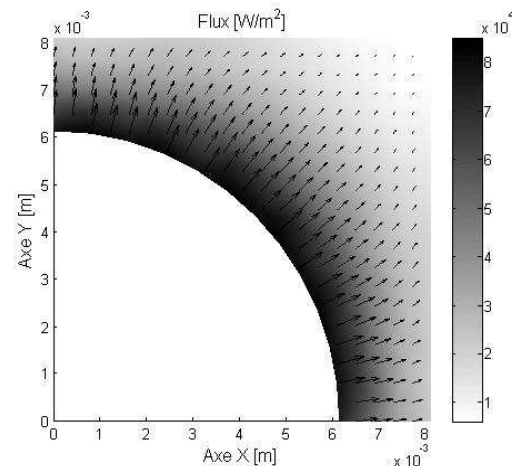


Figure 4 : Flux de chaleur calculé pour le milieu gris équivalent

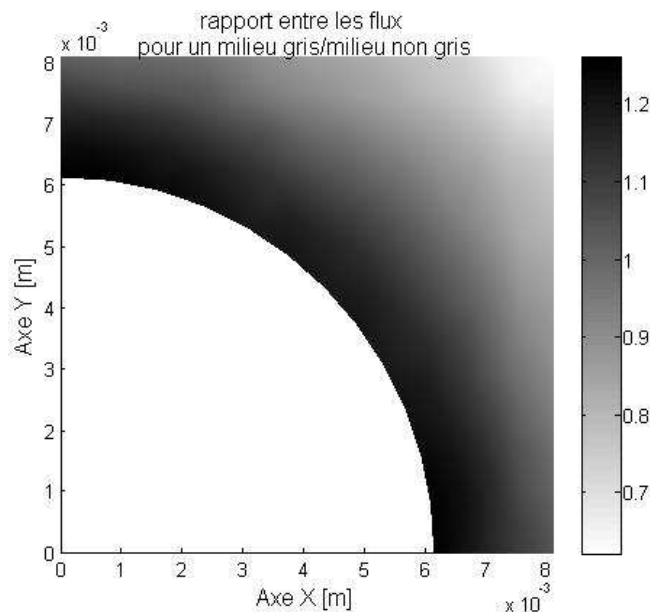


Figure 5 : Rapport entre les flux avec l'hypothèse du milieu gris et non gris

4.2. Divergence de flux

La même représentation est proposée pour la divergence du flux radiatif sur les figures 6 à 8. Cette grandeur constitue un terme source dans l'équation de conservation de l'énergie, et correspond à la différence entre le rayonnement émis et le rayonnement absorbé dans chaque élément du milieu. Le résultat est négatif dans le milieu puisque celui-ci est plus froid et absorbe plus d'énergie qu'il n'en émet. Intégré dans un code de calcul complet, il induira une source d'énergie modifiant les propriétés du milieu (taille des gouttes en lien avec le phénomène d'évaporation, propriétés du mélange, etc...). Là aussi les résultats obtenus pour le milieu gris équivalent mettent en évidence le niveau d'approximation de ce calcul puisque la divergence de flux est surestimée près de la paroi de l'ordre de 10% et sous-estimée loin de la paroi jusque 40%.

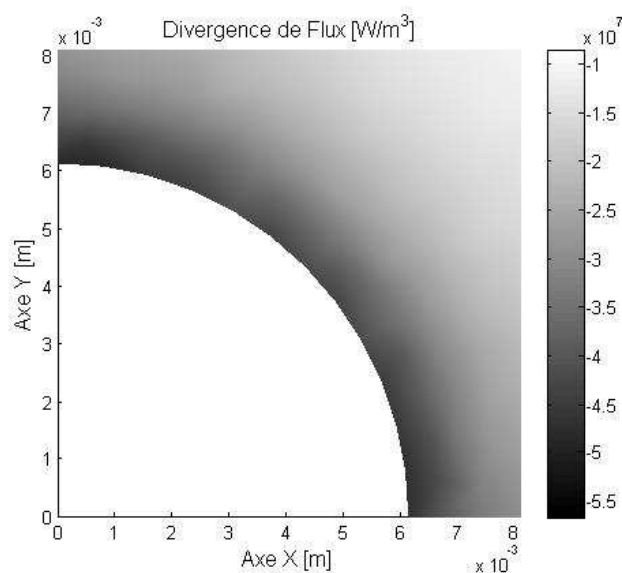


Figure 6 : divergence de flux pour le milieu non gris

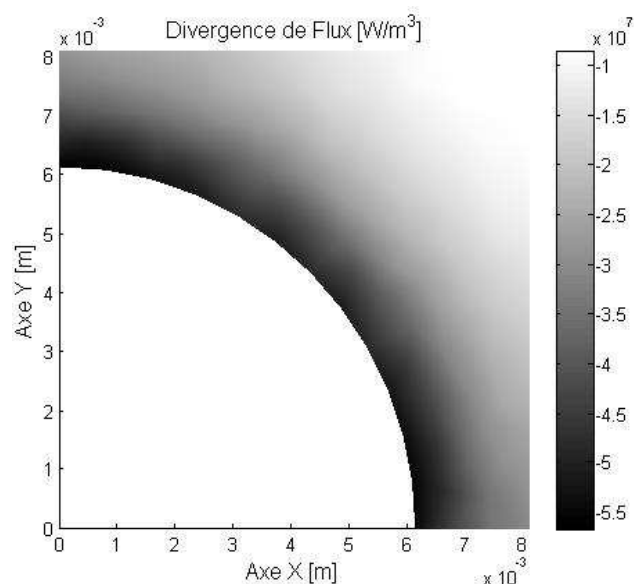


Figure 7 : divergence de flux pour le milieu gris équivalent

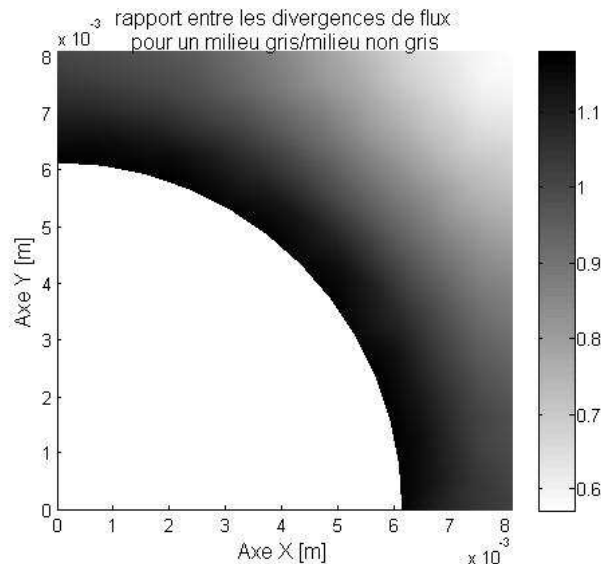


Figure 8 : Rapport entre la divergence de flux du milieu gris et la divergence de flux du milieu non gris

5. Conclusions et perspectives

Nous avons évalué les flux radiatifs échangés dans un milieu vapeur-gouttelettes caractéristiques d'une situation d'APRP dans un réacteur. La méthode IDA utilisée combinée à une détermination précise des propriétés du milieu par théorie de Mie et méthode C-k, a confirmé des ordres de grandeur de flux de plusieurs dizaines de kW/m^2 . Le problème est compliqué par des propriétés radiatives évoluant fortement en fonction des caractéristiques du milieu, mais aussi de la longueur d'onde. Sur ce plan, l'hypothèse d'un mélange se comportant comme un milieu gris réduit le temps de calcul d'un facteur de l'ordre de 300, mais induit en retour des écarts dans les grandeurs simulées atteignant 20 à 40% selon la variable étudiée (divergence de flux ou flux radiatif). Afin de réduire le temps de calcul tout en restant suffisamment précis, nous allons mettre en place un calcul multi-bandes, qui consistera à effectuer plusieurs calculs sur de larges bandes de longueurs d'ondes. Cela implique donc un calcul de propriétés radiatives équivalentes pour chaque bande, dont la caractérisation restera basée sur les données spectrales fines que nous avons discutées. La précision se trouvera donc améliorée par rapport à un calcul pour un milieu gris équivalent sur toute la gamme de longueur d'onde, tout en gardant les temps de calculs raisonnables. La mise en place d'un modèle plus élaboré du type FSKC serait peut être une piste également prometteuse pour optimiser le temps de calcul.

Un calcul 3D sera par la suite mis en place pour calculer les flux de chaleur émis par les parois, permettant notamment de prendre en compte des gradients de température entre le haut et le bas des crayons de combustibles.

Références

- [1] W.T. Peak, Dispersed flow film boiling during reflooding, Thèse de doctorat, University of California, Berkeley, 1979
- [2] S.Wong et L.E. Hochreiter, A model for dispersed flow heat transfer during reflood, 19th National Heat Transfer Conference, 1980.
- [3] C.F. Bohren et D.R. Huffman, Absorption and scattering of light by small particles, John Wiley and Sons, 1983
- [4] M.F. Modest, Radiative Heat Transfer Second Edition, Mechanical Engineering Series, Mc Graw-Hill International Editions, 1993.
- [5] A. Soufiani et J.Taine, High temperature gas radiative property parameters of statistical narrow-band model for H₂O, CO₂ and CO, and correlated-k model for H₂O and CO₂, Int. J. Heat Mass Transfer, 40-4 (1997), 987-991