



**HAL**  
open science

## Modélisation de l'interaction entre un feu confiné et un brouillard d'eau polydisperse

Fatiha Nmira, Jean-Louis Consalvi, Ahmed Kaiss, Bernard Porterie,  
Jean-Claude Loraud, Henry Neyrand

► **To cite this version:**

Fatiha Nmira, Jean-Louis Consalvi, Ahmed Kaiss, Bernard Porterie, Jean-Claude Loraud, et al..  
Modélisation de l'interaction entre un feu confiné et un brouillard d'eau polydisperse. JITH 2007,  
Aug 2007, Albi, France. 5p. hal-00166794

**HAL Id: hal-00166794**

**<https://hal.science/hal-00166794>**

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.

# MODELISATION DE L'INTERACTION ENTRE UN FEU CONFINÉ ET UN BROUILLARD D'EAU POLYDISPERSE

Fatiha NMIRA<sup>1\*</sup>, Jean-Louis CONSALVI<sup>1</sup>, Ahmed KAISS<sup>1</sup>,  
Bernard PORTERIE<sup>1</sup>, Jean-Claude LORAUD<sup>1</sup>, Henry NEYRAND<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> IUSTI/ UMR CNRS 6595, 5 rue E. Fermi, 13453 Marseille Cedex 13, France  
<sup>2</sup> DESAUTEL, Parc d'entreprises – BP9, 01121 Montluel Cedex  
\* [fatiha.nmira@polytech.univ-mrs.fr](mailto:fatiha.nmira@polytech.univ-mrs.fr)

**Résumé :** Ce travail porte sur l'efficacité d'un brouillard polydisperse dans l'atténuation d'un feu en milieu confiné à l'aide d'un modèle de comportement de feu. La combustion turbulente est décrite par un modèle (Eddy-Break-Up-Arrhenius) EBU-Ar. La description eulérienne de la phase dispersée utilise la méthode des moments d'une fonction de distribution en taille des gouttes sans avoir recours à la différentiation par les classes de taille. Appliqué à un feu de matière thermoplastique en tunnel, le modèle permet d'étudier le rôle du spray en termes de refroidissement, déstratification des fumées, et d'atténuation radiative. L'influence de la ventilation présente dans le tunnel sur la destruction de l'intégralité du brouillard d'eau par entraînement de petites gouttes est examinée.

**Mots clés :** brouillard polydisperse, théorie des moments, feu en tunnel.

## 1. INTRODUCTION

Le brouillard d'eau constitue une bonne alternative aux Halons dans la plupart des applications. Les mécanismes avec lesquels le brouillard d'eau agit sur le feu ont été identifiés [1]. Il s'agit du refroidissement de la phase gazeuse et de la surface du combustible, de la dilution de l'oxygène, et de l'atténuation du rayonnement. La nature polydisperse du brouillard d'eau est décrite par le modèle de Beck et Watkins [2] basé sur la théorie des moments, sans avoir recours à la différentiation par les classes de taille [3]. Cette approche nous a permis d'avoir un nombre réduit d'équations à résoudre. On résout les équations de transport pour deux moments représentant la masse du liquide et la surface spécifique des gouttes et leur vitesse moyenne respective. Les deux autres moments qui représentent le nombre de gouttes et la somme des rayons sont obtenus à partir d'une fonction de distribution prédéfinie. Le but de ce travail est d'étudier les interactions entre un brouillard d'eau et un feu thermoplastique en tunnel ainsi que les mécanismes principaux d'extinction. Une étude de sensibilité aux paramètres du brouillard d'eau est effectuée ainsi que l'influence de la ventilation sur la structure du brouillard.

## 2. MODELE MATHEMATIQUE

Le comportement de la phase gazeuse est décrit par les équations de Navier-Stokes couplées à des sous-modèles de turbulence, de combustion, de formation des suies, et de rayonnement [3]. Les termes d'interaction entre phases sont inclus.

## 2.1. Modèle du spray

Ce modèle développé par Beck et Watkins [2] est basé sur les moments de la fonction de distribution en taille des gouttes. Les propriétés de la phase liquide sont exprimés à partir des quatre premiers moments de cette distribution donnés par,

$$\int_0^{\infty} n(r)r^k dr = Q_k, \quad k = 0,1,2,3 \quad (1)$$

où  $n(r)$  est la distribution en taille des gouttes.

Le premier moment  $Q_0$  est le nombre total des gouttes par unité de volume,  $Q_1$  est la somme totale des rayons des gouttes,  $4\pi Q_2$  est la surface spécifique des gouttelettes par unité de volume, et  $4\pi Q_3/3$  est la fraction volumique du liquide.

La vitesse moyenne des moments d'ordre 2 et 3 est donné par :

$$u_{lk} = \frac{1}{Q_k} \int_0^{\infty} n(r)r^k u_l dr, \quad k = 2,3 \quad (2)$$

Ces deux concepts (moments, et vitesses moyennes) fournissent une représentation du comportement du brouillard polydisperse. En effet, le premier donne la distribution en taille à chaque point, et le second caractérise les variations spatio-temporelles de cette distribution.

Le système des équations de transport est donc écrit pour les deux moments représentant la masse du liquide et la surface spécifique des gouttes

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l Q_3) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_l Q_3 U_{l3j}) = -S_m \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(Q_2) + \frac{\partial}{\partial x_j}(Q_2 U_{l2j}) = -S_{Q_2} \quad (4)$$

Les deux autres moments qui représentent le nombre de gouttes et la somme des rayons sont obtenus en supposant une forme prédéfinie de la fonction de distribution en taille afin de compléter la description du spray. Les équations pour les vitesses moyennes  $U_{l3i}$ ,  $U_{l2i}$  relatifs respectivement à  $Q_3$ ,  $Q_2$  et pour l'enthalpie sont donnés par

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l Q_3 U_{l3i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_l Q_3 U_{l3i} U_{l3j}) = -Q_3 \frac{\partial P}{\partial x_i} + Q_3 \rho_l (1 - \frac{\rho_{\infty}}{\rho_l}) g_i + F_i - S_m U_{l3i} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(Q_2 U_{l2i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(Q_2 U_{l2i} U_{l2j}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(Q_2 (U_{l3i} - U_{l2i})(U_{l3j} - U_{l2j})) = \\ -\frac{Q_2}{\rho_l} \frac{\partial P_d}{\partial x_i} + Q_2 (1 - \frac{\rho_{\infty}}{\rho_l}) g_i + F_{iQ_2} - S_{Q_2} U_{l2i} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l Q_3 h_l) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_l Q_3 h_l U_{l3j}) = Q_{conv} + Q_{radl} - S_m h^{vap} \quad (7)$$

Les termes sources  $S_m$ ,  $S_{Q_2}$  représentent les transferts de masse dus à l'évaporation entre les deux phases. Les termes  $F_i$ ,  $F_{iQ_2}$ ,  $Q_{conv}$ ,  $Q_{radl}$  correspondent respectivement à la force de traînée, et aux échanges de chaleur entre les deux phases liés à la convection et au rayonnement. Ces termes

sont calculés en fonction des moments et de leur vitesse moyenne. Ces équations sont détaillées dans [4].

## 2.2 Principe de la troncature

Le Rayon Moyen de Sauter (SMR)  $r_{32}$  correspond au rapport volume/surface équivalent à celui de l'échantillon total pulvérisé. Il est très important pour définir la distribution de taille. En effet, Beck [1] a utilisé le SMR pour produire une distribution de taille analogue à celle de Rosin-Rammler:

$$n(r) = \frac{16r}{r_{32,ref}^2} \exp\left(-\frac{4r}{r_{32,ref}}\right) \quad (9)$$

Où  $r_{32,ref}$  est le rayon moyen initial défini à la sortie de l'injecteur.

Le principe consiste à considérer (9) comme une distribution de référence avec un SMR de référence  $r_{32,ref}$  invariant. Les changements du SMR local sont obtenus en tronquant la distribution. On obtient les valeurs supérieures en enlevant les petites gouttelettes de la distribution, et les valeurs inférieures en supprimant les grosses gouttelettes de la distribution. Les autres moments  $Q_0$  et  $Q_I$  sont calculés à partir de cette distribution tronquée. Ce principe nous garantit un comportement monodisperse à la périphérie du spray, en évitant les instabilités des vitesses. Le seuil de la troncature  $c'$  est défini comme suit :

$$c' = \frac{c}{r_{32,ref}} \quad (10)$$

où  $c$ , est le rayon maximum ou minimum des gouttes dans un volume de contrôle.

## 3. RESOLUTION NUMERIQUE

Chacune des équations aux dérivées partielles précitées peut s'écrire sous la forme compacte :

$$\frac{\partial}{\partial t}(X\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(X\rho\phi U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(X\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_j}\right) + S_\phi \quad (11)$$

où  $\phi$  représente la quantité conservée,  $\Gamma$  est le coefficient de diffusion, et  $S_\phi$  est le terme source.

On a utilisé la méthode des volumes finis avec un maillage décalé. Un schéma décentré d'ordre élevé QUICK associé à un limiteur de flux ULTRA-SHARP intervient pour calculer les flux convectifs, tandis que les flux diffusifs sont approchés par un schéma centré d'ordre 2. La discrétisation temporelle est réalisée par un schéma d'Euler décentré d'ordre 2. Pour l'étape de couplage vitesse/pression, l'algorithme PISO est utilisé.

## 4. RESULTATS

Les calculs ont été réalisés dans une configuration tridimensionnelle (25m×3m×5m). La combustion d'une plaque de PolymethylMethacrylate (PMMA) en feu est simulée par un brûleur poreux de dimensions (1.3m×1m). Il est localisé au sol à 10m de la frontière Ouest du tunnel et

délivre une puissance de 1.2MW avec une ventilation longitudinale de 1.5m/s venant de la droite du tunnel. Le brouillard d'eau à cône plein est placé 0.2m au-dessous du plafond et à 5m du foyer du feu. Le débit et la vitesse d'injection sont respectivement de 0.02 l/s et de 15m/s. L'angle d'ouverture du spray est de 80°. La buse d'injection est activée à  $t=100s$  sur une flamme stationnaire (Cf. fig1) pour une durée de 50s. Une analyse est effectuée pour étudier l'influence du rayon moyen des gouttes injectées. Pour cela, trois SMR à l'injection sont considérés : 25, 50 et 100 $\mu m$ . On suppose que l'extinction du feu a lieu lorsque le transfert d'énergie de la flamme vers le combustible n'est plus suffisant pour assurer la pyrolyse.

La figure 2 montre les champs de température de la phase gazeuse et de la fraction volumique de la phase liquide à différents instants. Dans tous les cas l'écoulement induit par le spray repousse la flamme vers l'aval. Du fait d'une grande surface spécifique, le brouillard relatif au SMR le plus faible (25 $\mu m$ ) est entraîné par l'écoulement induit par la ventilation et est ensuite transporté le long de la flamme. Lorsque le SMR augmente le comportement du brouillard passe d'un régime contrôlé par la traînée à un régime contrôlé par l'inertie. Par conséquent dans le cas d'un SMR de 50 $\mu m$  une quantité plus importante de liquide atteint la base de la flamme et provoque une extinction locale. Le brouillard relatif SMR de 100 $\mu m$  atteint majoritairement le sol avant d'arriver à la flamme ce qui limite son efficacité.

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Un modèle numérique est présenté pour décrire l'interaction entre un feu et un brouillard d'eau polydisperse. Le caractère polydisperse du brouillard est décrit par la méthode des moments. Ce modèle est appliqué dans une configuration de feu en tunnel. Une étude paramétrique sur le rayon moyen de Sauter à l'injection a montré que le brouillard relatif à un SMR de 50 $\mu m$  est le plus efficace. Une étude sur l'effet de la ventilation, du débit d'injection des gouttes et sur la distance entre la buse d'injection et le foyer est actuellement en cours.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE avec la société DESAUTEL.

## Références

- [1] G. Grant, J. Brenton, and D. Drysdale, Fire suppression by water sprays, *Prog. Ener. Comb. Sci.*, 26, pp 79-130, 2000.
- [2] J. C. Beck, A. P. Watkins, On the development of spray sub-models based on droplet size moments, *J. Comp. Phys.*, 182, pp 568-621, 2002.
- [3] J.L. Consalvi, B. Porterie, J. C. Loraud, Dynamic and radiative aspects of fire-water mist interactions, *Combust. Sci. Tech.*, 176, pp 721-752, 2004.
- [4] J. C. Beck, A. P. Watkins, On the Modelling of Polydisperse Sprays Without Segregation Into Droplet Size Classes. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 459, pp 1365-1394, 2003.

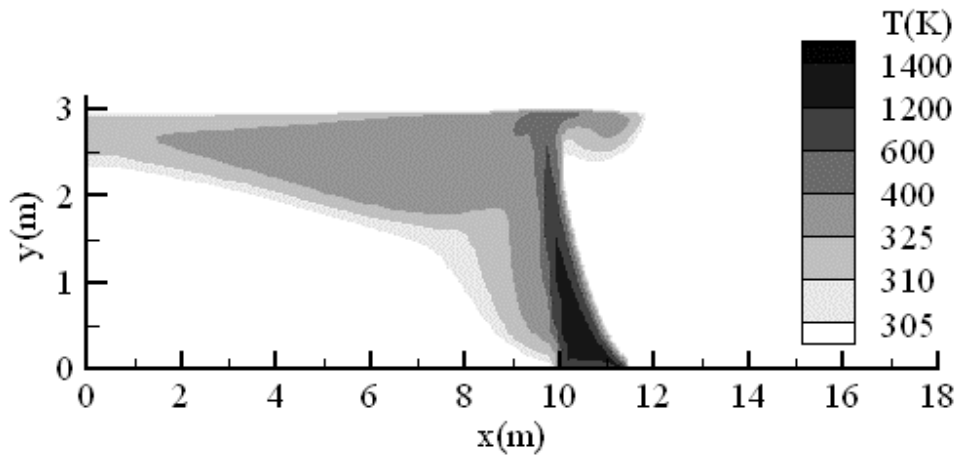


Figure 1 : Champs de température de gaz à l'état stationnaire dans le plan central ( $z=0$ ).

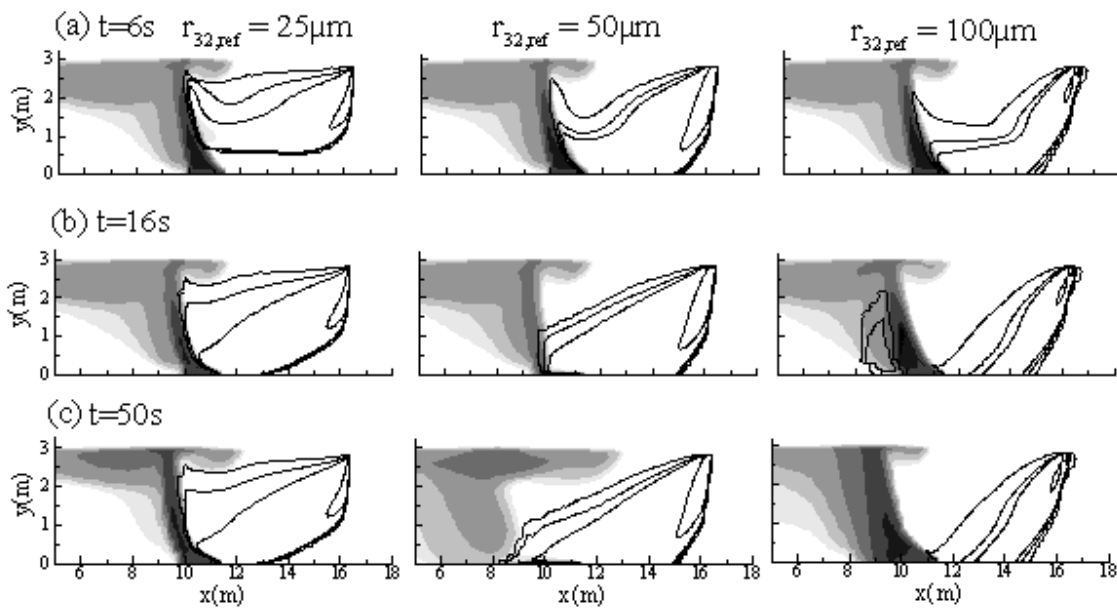


Figure 2: Champs de température de la phase gazeuse et de la fraction volumique de la phase liquide à différents instants pour un débit d'aspersion de  $0.021/s$  et des SMRs de référence de 25, 50 et  $100\mu m$ .