

# Le rôle de la nature polydisperse d'un brouillard d'eau sur l'extinction d'un feu

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

\* (auteur correspondant : [fatiha.nmira@polytech.univ-mrs.fr](mailto:fatiha.nmira@polytech.univ-mrs.fr) )

**Résumé** - On présente un modèle d'interaction entre un brouillard d'eau polydisperse et un feu de matière thermoplastique. La phase dispersée est traitée par une approche Eulérienne couplée à une méthode des moments de la fonction de distribution en taille de goutte pour décrire la nature polydisperse du spray. La combustion turbulente est décrite par un modèle Eddy-Break Up-Arrhenius (EBU-Ar). Une équation de transfert radiatif multiphasique incluant les contributions des gouttes, des produits de combustion et des particules de suies est utilisée pour modéliser le rayonnement. Le modèle est utilisé pour étudier l'influence des principales caractéristiques d'un brouillard sur l'atténuation du feu. Les résultats soulignent l'importance de la polydispersivité du brouillard. Un rayon moyen de Sauter optimal et le débit minimal d'eau nécessaires à l'extinction sont évalués.

## Nomenclature

$\vec{F}$	force de traînée	<i>Symboles grecs</i>	
$\vec{g}$	gravité	$\mu$	viscosité
$h$	enthalpie	$\rho$	densité
$Q$	moments, flux de chaleur	<i>Indices et exposants</i>	
$n(r)$	distribution en taille	32	Rayon moyen de Sauter
$p$	pression	conv	convectif
$r$	rayon	$l$	phase liquide
$\vec{u}$	vitesse de la phase liquide	rad	radiatif
		ref	référence
		vap	vapeur d'eau

## 1. Introduction

Le brouillard d'eau constitue une bonne alternative aux Halons. 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. Le but de ce travail est d'étudier les interactions entre un brouillard d'eau et un feu thermoplastique ainsi que les mécanismes principaux d'extinction. Une étude de sensibilité aux paramètres du brouillard d'eau est effectuée.

## 2. Modèle mathématique

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 :

$$\vec{u}_{lk} = \frac{1}{Q_k} \int_0^{\infty} n(r)r^k \vec{u}_k dr \quad k = 2,3 \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_l Q_3 u_{l3i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_l Q_3 u_{l3j} u_{l3i}) = -Q_3 \frac{\partial p}{\partial x_i} + Q_3 \rho_l g_i + F_i - S_m u_{l3i} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(Q_2 u_{l2i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(Q_2 u_{l2j} u_{l2i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(Q_2 (u_{l3i} - u_{l2i})(u_{l3j} - u_{l2j})) \\ = -\frac{Q_2}{\rho_l} \frac{\partial p}{\partial x_i} + Q_2 \rho_l g_i + F_{Q_2} - S_{Q_2} u_{l2i} \end{aligned} \quad (6)$$

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

Les termes sources  $S_m, S_{Q_2}$  représentent les transferts de la masse dus à l'évaporation entre les deux phases. Les termes  $F_i, F_{Q_2}, Q_{conv}, Q_{radl}$  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:

$$n(r) = \frac{16r}{r_{32}^2} \exp\left(-\frac{4r}{r_{32}}\right) \quad (8)$$

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  $Q_1$  sont calculés donc à partir de cette distribution tronquée. Ce principe nous garantit un comportement monodisperse à la périphérie du spray, en évitant les instabilités des vitesses.

## 3. Résolution numérique

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(X\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(X\rho\phi u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(X\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}\right) + S_\phi \quad (10)$$

Où  $\phi$  représente la quantité conservée,  $\Gamma$  est coefficient de diffusion,  $S_\phi$  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. Résultats

Les calculs ont été réalisés dans une configuration axisymétrique de dimension (2m×4m) avec un brouillard d'eau à cône plein placé à 2.8m directement au-dessus d'une flamme de diffusion issue de la dégradation thermique d'une plaque de PolymethylMethacrylate (PMMA) de diamètre 0.2m. Le débit et la vitesse d'injection sont respectivement de 0.08 l/s et de 15m/s. L'angle d'ouverture du spray est de 80°. Dans un premier temps, une flamme stationnaire issue de la combustion du PMMA a été établie (Cf. figure 1). La puissance de la flamme est de 26.5 kW. Par la suite l'injecteur est activé. Une analyse est effectuée pour étudier l'influence du rayon moyen des gouttes injectées. Pour cela, trois SMRs de référence, sont considérés : 25, 50 et 100µm. Le rayon de référence est le rayon moyen initial défini à la sortie de l'injecteur. 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.

#### 4.1. Effet de la distribution en taille des gouttelettes

La figure 2 montre les champs de température, de vitesse de la phase gazeuse pour des rayons de Sauter initiaux de 25, 50, et 100 $\mu\text{m}$  à différents instants après l'activation de la buse d'injection. On observe que l'atténuation est contrôlée par l'écoulement induit par le spray qui entraîne les gaz chauds vers le bas et les refroidit. On note également que le comportement du spray relatif à 100 $\mu\text{m}$  est différent des deux autres cas dans la mesure où les gouttes pénètrent dans le panache et que le spray enveloppe la flamme. L'extinction de la flamme est due à l'insuffisance du rayonnement de la flamme vers le combustible solide; ce qui provoque l'arrêt de la pyrolyse. L'atténuation du panache de feu se divise en deux étapes : dans un premier temps l'écoulement est dominé par le panache de fumée et les grosses gouttes sont les plus efficaces pour entraîner le panache vers le bas dans la mesure où elles réussissent à surmonter la force de traînée exercée par les gaz chauds. Lorsque le spray se développe on transite vers un régime dominé par le spray où les petites gouttes sont plus efficaces à entraîner les gaz chauds vers le bas du fait de leur plus grande surface spécifique.

#### 4.2. Le rôle de la polydispersité du brouillard d'eau

Une comparaison est effectuée pour mettre en évidence l'importance de la nature polydispersée d'un brouillard sur l'extinction du feu, en utilisant des sprays polydispersés et monodispersés avec une gamme de rayons moyens initiaux de 25 à 150 $\mu\text{m}$ . La figure 3 montre le temps d'extinction en fonction du SMR de référence. On remarque d'une part, l'existence d'un système optimal de spray de 50 $\mu\text{m}$ . Ce dernier représente un compromis entre des gouttelettes suffisamment petites pour pousser et refroidir efficacement le panache chaud quand le spray contrôle l'écoulement et assez grandes pour minimiser le temps requis pour transiter d'un écoulement dominé par le panache vers un écoulement dominé par le spray. D'autre part, on a observé que le centre du spray polydispersé est composé par des gouttes ayant de SMR local plus petit que celui du spray monodispersé. L'efficacité des petites gouttes pour entraîner les gaz chauds vers le bas et pour les refroidir favorise la performance des sprays polydispersés pour supprimer le feu.

#### 4.3. Effet du débit d'aspersion

La figure 4 montre l'influence du débit d'aspersion sur le temps requis pour l'extinction du feu. Pour cela, une étude paramétrique a été menée en utilisant les débits compris entre 0.02 à 0.21/s, pour des SMR de référence de 25, de 50, et de 100 $\mu\text{m}$ . Le temps d'extinction diminue lorsque le débit d'injection augmente. De plus, en deçà d'un certain débit d'aspersion, l'extinction du feu n'est pas obtenue.

### 5. Conclusion

Un modèle diphasique a été développé pour simuler les interactions entre un brouillard d'eau et un feu de matière thermoplastique. Dans la configuration où la buse d'injection est placée directement au-dessus du panache, les résultats montrent que l'atténuation du feu est contrôlée par l'écoulement induit par le spray qui entraîne les gaz chauds vers le bas et les refroidit. L'arrêt de la pyrolyse du fait d'un feedback insuffisant de la flamme vers le combustible solide

est nécessaire pour assurer l'extinction du feu. Une étude paramétrique a permis de mettre en évidence, d'une part, l'existence d'un rayon moyen optimal, et d'autre part, le fait que les sprays polydisperses sont globalement plus efficaces que les sprays monodisperses.

### Références

- [1] G. GRANT, J. BRENTON, and D. DRYSDALE, Fire Suppression by Water Sprays, Prog. Ener. Combust. Sci., 26 (2000), 79-130.
- [2] J. C. BECK, A. P. WATKINS, On the Development of Spray Sub-Models Based on Droplet Size Moments, J. Comp. Phys., 182 (2002), 568-621.
- [3] J.L. CONSALVI, B. PORTERIE, J. C. LORAUD, Dynamic and Radiative Aspects of Fire-Water Mist Interactions, Combust. Sci. Tech., 176 (2004), 721-752.
- [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 (2003), 1365-1394.

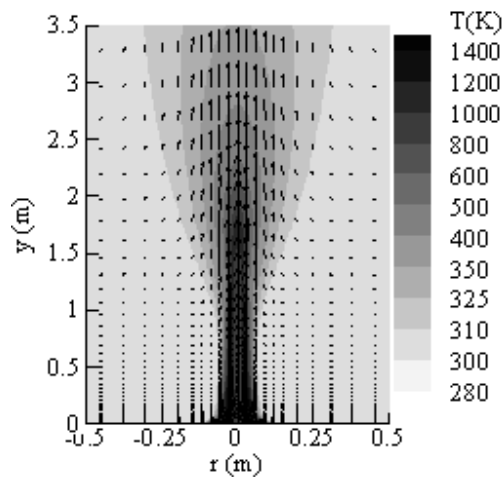


Figure 1: Champs de température et vecteurs vitesse de la flamme à l'état stationnaire

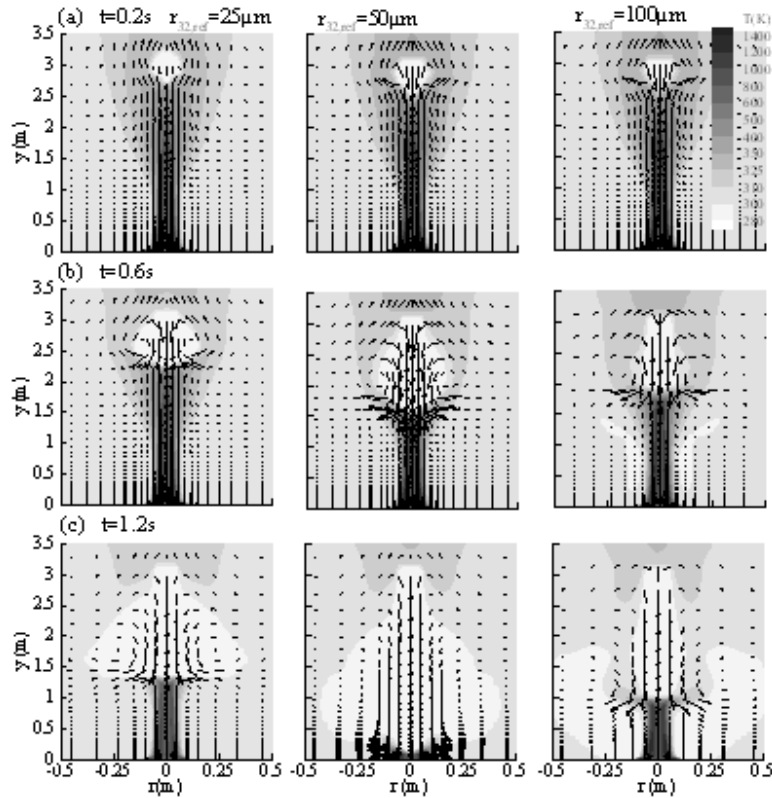


Figure 2 : Champs de température, et de vitesse de la phase gazeuse à différents instants pour un débit d'aspersion de 0.08l/s et des SMRs de référence de 25, 50 et 100µm.

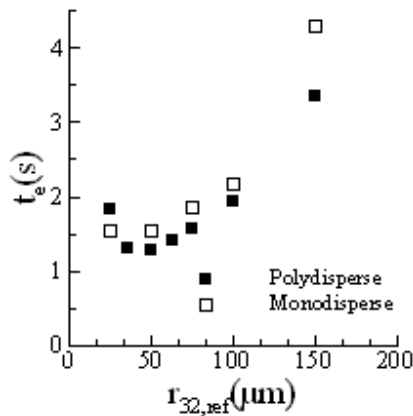


Figure 3 : Le temps requis pour l'extinction en fonction du SMR de référence d'un feu pour un brouillard polydisperse et monodisperse. Le débit d'injection est de 0.08l/s et la vitesse d'injection est de 15m/s.

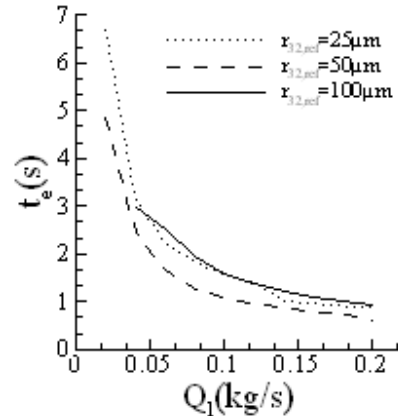


Figure 4 : Temps requis pour l'extinction d'un feu en fonction du débit d'injection pour un brouillard polydisperse de différents SMRs de référence de 25, 50 et 100µm. La vitesse d'injection est de 15m/s.