

Etude de l'efficacité de sprays ascendants et descendants utilisés comme écran radiatif.

Sullivan LECHENE^{1*}, Gilles PARENT¹, Anthony COLLIN², Pascal BOULET¹

¹Nancy Université, LEMTA – UMR 7563 / Equipe Transfert Radiatif
Faculté des Sciences et Techniques, BP 70239
54506 Vandoeuvre Cedex

²LEMTA – UMR 7563 / Equipe Feux de Forêt
2, avenue de la Forêt de Haye, BP 160
54504 Vandoeuvre Cedex

* (auteur correspondant : sullivan.lechene@lemta.uhp-nancy.fr)

Résumé – Nous étudions les brouillards d'eau pour leur capacité à limiter la propagation du rayonnement. Deux stratégies de pulvérisations, ascendante et descendante, ont été étudiées. Nous avons simulé tout particulièrement les transferts radiatifs à travers les sprays. L'analyse a été menée en termes d'épaisseur optique et de transmission dans les deux cas. Nous avons corrélé les résultats obtenus au niveau rayonnement à la dynamique des sprays visualisée grâce à l'étude de trajectoires de gouttes. Un important gain d'atténuation du rayonnement est observé sur l'injection ascendante.

1. Introduction

Les brouillards sont des milieux semi-transparents constitués de gouttelettes d'eau dispersées dans l'air. Placés entre une source radiative et une cible à protéger, ils agissent comme des boucliers radiatifs limitant la propagation du rayonnement [1-5] grâce notamment au caractère absorbant et diffusant des gouttelettes d'eau. En parallèle de cette application comme bouclier, des études sont menées sur l'interaction entre le spray et une flamme dans l'optique d'extinction de celle-ci (on peut citer notamment les travaux récents de Nmira [6]) mais nous nous consacrons ici à l'effet « bouclier » et ne traitons pas des interactions feu-spray. Plusieurs stratégies de pulvérisations sont envisageables. La configuration descendante où les gouttes sont projetées vers le sol a déjà fait l'objet de travaux dans notre équipe tant au niveau numérique [4] qu'expérimental [7]. Pourtant, le niveau d'atténuation du rayonnement infrarouge obtenu n'est pas aussi fort que nous l'espérons. Ceci est en particulier dû à la diffusion qui est fortement anisotrope vers l'avant. Plusieurs solutions peuvent être envisagées afin d'améliorer la capacité du spray à atténuer le rayonnement, par exemple une modification du débit d'eau ou de la taille des gouttes. Pour l'étude présentée ici, nous avons étudié un spray en configuration ascendante où les gouttes sont alors éjectées vers le haut. L'idée de départ est de trouver un moyen d'augmenter le niveau d'atténuation du rayonnement infrarouge tout en gardant la même buse et les mêmes conditions initiales d'injection (débit, angles, granulométrie). Quand elles sont éjectées vers le haut, nous pouvons nous attendre à ce que les gouttes contribuent deux fois à l'atténuation du rayonnement : une fois en phase ascendante et une fois en phase descendante.

Dans ce qui suit, le mode opératoire sera d'abord détaillé. Il permettra de cibler les paramètres nécessaires à la modélisation numérique dont une description succincte sera présentée. Les résultats numériques seront ensuite discutés. Ils concerneront la comparaison notamment au niveau dynamique et transfert radiatif entre deux stratégies de pulvérisations : l'injection descendante et l'injection ascendante.

2. Description du problème

La simulation numérique a été effectuée avant l'achèvement des expérimentations sur l'atténuation du rayonnement par les sprays. Néanmoins, une description du banc expérimental est nécessaire puisque les caractéristiques prévues servent de paramètres d'entrée à la modélisation, menée ici à titre préparatoire.

2.1. Banc expérimental

Le schéma de principe utilisé pour la simulation numérique est représenté sur la Figure 1. Le spray est généré par une buse fonctionnant à faible débit (TP400067 de Spraying Systems). La géométrie du spray est un cône plat. La buse est installée sur une rampe permettant d'une part d'étudier toutes les directions d'injections possibles et d'autre part de mesurer le rayonnement infrarouge transmis dans n'importe quelle position dans le spray (la variation peut aussi bien être faite suivant la verticale que suivant l'horizontale). Nous pouvons donc expérimenter la configuration descendante ou ascendante. Un circuit d'eau ouvert couplé à une arrivée d'air sous pression permet d'alimenter la buse. La pression est contrôlée par un capteur placé à proximité de la buse permettant ainsi de conserver les mêmes conditions d'injection dans les différents cas étudiés. La source de rayonnement infrarouge utilisée est une plaque de type Infraline (de Itech System) de dimensions 19.5 cm par 6.5 cm, chauffée à la température de 1000 K et se comportant approximativement comme un corps noir. Le faisceau incident, après avoir traversé la zone de spray, est analysé avec un spectromètre à transformée de Fourier (FTIR) de type Matrix, de Bruker, comprenant un double détecteur, un interféromètre de Michelson, une séparatrice en KBr, et un port émission dédié à l'utilisation de la source externe.

Les conditions d'injection sont maintenant détaillées. Le débit de la buse est de 0.25L/min. La distribution granulométrique obtenue se comporte comme une loi log normale avec un diamètre moyen de 110 μm et un paramètre de dispersion de 0.4 ; les angles d'ouverture du spray de section elliptique sont de 17.4° et 40.4° respectivement. Toutes ces données ont été mesurées expérimentalement. Celles concernant le débit et les angles ont été déterminées par notre laboratoire alors que la granulométrie est reprise de mesures effectuées par l'Institut Von Karman sur la même buse avec la même pression. Ces conditions d'injections seront utilisées comme paramètres d'entrées dans notre simulation numérique et resteront identiques lorsque la direction d'injection changera, ce qui, en considérant le fait que la pression d'alimentation est contrôlée et gardée identique dans les deux cas (descendant et ascendant), semble être une bonne supposition.

2.2. Code numérique

La méthode numérique ne sera présentée que succinctement dans la mesure où elle a déjà fait l'objet d'une description plus détaillée dans la littérature [4]. Deux codes fortement liés entre eux sont à distinguer : celui assurant le calcul sur la dynamique du spray et celui évaluant les transferts radiatifs à travers ce même spray.

La dynamique du spray est établie par un code couplé Euler-Lagrange. Le suivi lagrangien permet de suivre chaque particule en enregistrant leurs tailles, températures, vitesses et positions successives. Les gouttelettes sont soumises aux forces de traînée et gravité ainsi qu'aux phénomènes d'évaporation, de convection et de dispersion turbulente. Ensuite, après le suivi d'un grand nombre de gouttes, nous pouvons établir par traitement statistique les caractéristiques moyennes de la phase dispersée. La simulation eulérienne permet de modéliser la phase fluide environnant le spray en résolvant les équations de bilan sur la

masse, la quantité de mouvement, l'énergie et l'humidité par la méthode des volumes finis. Pour caractériser la turbulence du fluide, nous utilisons un modèle k-ε standard.

Les transferts radiatifs à travers le spray sont évalués après convergence du code sur la dynamique. Cette méthode est rendue possible car la faible énergie absorbée due au rayonnement ne provoque pas de modifications sur les caractéristiques des gouttes et n'a donc aucune influence sur la dynamique du spray. Les propriétés radiatives sont évaluées au préalable par additivité simple des coefficients issus de la théorie de Mie pour les gouttes et du modèle C-k pour les gaz environnants. La propagation du rayonnement est traitée par la méthode de Monte-Carlo. Elle consiste en un suivi de quanta avec une distance d'interaction évaluée sur le coefficient de diffusion, l'absorption étant redistribuée tout au long du trajet optique. Après convergence du calcul basée sur la variance des flux radiatifs, le rapport entre la nombre de quanta transmis avec et sans spray définit la transmission à travers le spray :

$$T_r = \frac{\text{Flux calculé avec spray}}{\text{Flux calculé sans spray}} \quad (1)$$

3. Résultats numériques

Le domaine numérique est une boîte de 3m x 1,5m x 3m (une symétrie est présente suivant l'axe y) dans le cas spray descendant et de 4m x 2m x 4m pour le spray ascendant. Cet agrandissement du domaine a été effectué afin d'éviter que les gouttes impactent la paroi supérieure. Un maillage structuré, resserré dans la zone de spray et près des parois, est utilisé avec 48 x 24 x 40 cellules pour le cas descendant et 60 x 30 x 50 cellules pour le cas ascendant. La buse est placée en milieu de boîte lorsque les gouttes sont projetées vers le bas et à 30 cm du sol dans l'autre cas (conformément aux dispositions expérimentales prévues).

3.1. Etude des trajectoires

Le spray a d'abord été reconstruit expérimentalement grâce à la visualisation des trajectoires de deux classes de gouttes (parmi les vingt simulées dans la polydispersion utilisée) : des petites gouttes (59 μm) et des grosses gouttes (258 μm). L'injection descendante est représentée sur la figure 2a et l'injection ascendante sur la figure 2b. Plusieurs comportements sont à observer. Dans le cas du spray descendant, les grosses gouttes chutent au sol avec des trajectoires monotones sous les seules influences de la gravité et de la force de traînée. Du fait de leur grande inertie, la dispersion turbulente n'a aucun effet sur ces gouttes. Elles vont constituer une sorte de cône creux dans lequel les petites gouttes, plus fortement soumises à la turbulence de l'air, vont tomber au sol. La forme du spray ascendant est beaucoup plus complexe. Les gouttes sont d'abord éjectées vers le haut et décélèrent rapidement sous l'effet de la gravité et de la traînée. Une fois leur point haut atteint, elles vont redescendre à partir d'une vitesse nulle dans un air à contre-courant. Passant deux fois dans la zone de spray, cette configuration devrait fournir une meilleure atténuation du rayonnement infrarouge. Les petites gouttes sont aussi perturbées par les effets de dispersion et suivent des trajectoires plus aléatoires alors que les grosses gouttes suivent des trajectoires beaucoup plus régulières.

Sur la base d'un traitement statistique après suivi de quanta, des trajectoires typiques de quanta sont maintenant présentées sur la Figure 3a pour l'injection descendante et sur la Figure 3b pour le cas ascendant. Il s'agit en fait d'une autre méthode pour visualiser le spray à partir de ses interactions avec le rayonnement. Chaque cercle correspond à la localisation d'un événement de diffusion par un quantum dans la zone de spray (les autres cercles en dehors de la zone de spray correspondent majoritairement aux quanta quittant le domaine). Pour une meilleure visualisation du spray, la source émettrice a été étendue sur la toute la hauteur du

spray, ce qui explique la présence d'un rectangle sombre sur la surface en $x = 3\text{m}$ ($x = 4\text{m}$ pour le spray ascendant). Celui-ci correspond aux quanta transmis directement à travers le spray et quittant le domaine. En dehors de cette zone, les autres cercles sont représentatifs de quanta qui ont subi un événement de diffusion les déviant de leur direction initiale. Afin de mieux visualiser ce phénomène, quelques trajectoires typiques de quanta diffusés ont été ajoutées sur les figures. A noter que les quanta ont été simulés à une longueur d'onde de $2\ \mu\text{m}$. En mettant les deux cas étudiés en parallèle, nous remarquons que la forme du spray ascendant est plus compliquée et étendue. Les événements de diffusion sont beaucoup plus importants, ce qui s'explique par le fait que les gouttes peuvent y contribuer dans leur phase ascendante ou descendante. Cette plus forte accumulation tend à penser que le spray ascendant fournirait une meilleure atténuation.

3.2. Etude de transmission

La transmission, calculée dans les deux cas à $20\ \text{cm}$ du point d'injection (à $z = 1.3\ \text{m}$ en configuration descendante et $z = 0.5\ \text{m}$ en configuration ascendante), est représentée sur la Figure 4 en fonction du nombre d'onde. Les conditions utilisées sont calquées sur le dispositif expérimental, à savoir une surface d'émission noire de dimensions $19.5 \times 6.5\ \text{cm}^2$ et un angle solide de détection du rayonnement équivalent à $7.10^{-4}\ \text{sr}$. La variation quasi-monotone des courbes est une conséquence de l'atténuation régulière par les gouttes. Les deux singularités présentes près de $1500\ \text{cm}^{-1}$ et de $3800\ \text{cm}^{-1}$ sont dues à la vapeur d'eau. La pente des transmissions est due à une modification du caractère anisotrope de la diffusion quand le nombre d'onde augmente. En effet, le paramètre de taille des gouttes augmente avec le nombre d'onde, ce qui provoque une baisse de l'anisotropie de la diffusion (la fonction de phase devient plus pointue et favorise la diffusion vers l'avant). Cette figure apporte la confirmation des suppositions faites lors du paragraphe précédent : la transmission est beaucoup plus faible dans le cas du spray ascendant. Si on compare en termes d'atténuation, celle déduite pour l'injection ascendante est environ 4 fois plus grande que celle du spray descendant.

Deux autres études vont confirmer cette tendance. La première concerne l'épaisseur optique τ qui est calculée avec le coefficient d'extinction β de manière cumulative suivant les abscisses x croissantes :

$$\tau = \int_0^x \beta(x) dx \quad (2)$$

Elle est évaluée à différentes hauteurs dans le spray à une longueur d'onde de $2\ \mu\text{m}$ et elle est représentée sur les Figures 5a et 5b. La rapide augmentation observée représente l'endroit où le rayonnement incident va « croiser » le spray. La zone d'augmentation est plus large pour l'injection ascendante. A $20\ \text{cm}$ de l'injection, la différence entre le spray descendant et ascendant équivaut à un facteur supérieur à 4 en faveur du deuxième cas. Celle-ci est une conséquence du comportement des gouttes. En effet, comme nous l'avons expliqué précédemment, les gouttes éjectées vers le haut vont décélérer rapidement jusqu'à atteindre leurs positions maximales. Puis, elles vont retomber sous l'effet de la gravité avec une vitesse initiale nulle dans un air à contre-courant. En revanche, dans l'injection descendante, elles vont être projetées vers le sol avec une forte vitesse initiale (environ $18\ \text{m/s}$). Le temps de séjour des gouttes dans la zone de spray va donc être beaucoup plus important dans le cas du spray ascendant. Elles vont donc contribuer plus longtemps à l'atténuation du rayonnement. Pour les deux classes dont nous avons représenté les trajectoires, le temps de séjour moyen dans le domaine a été calculé (les statistiques ont été effectuées sur un échantillon de 100 gouttes choisies aléatoirement dans chacune des deux classes). Les résultats confirment nos

prévisions. Les grosses gouttes (258 μm) restent moins de 0.6 s dans le domaine pour l'injection descendante et 1.7 s pour l'injection ascendante. Pour les petites gouttes (59 μm), les temps moyens calculés sont de 1.2 s et 5.5 s respectivement. Le pourcentage de gouttes évaporées a aussi été évalué. Seules les petites gouttes subissent réellement ce phénomène. Pour le spray descendant, 1% d'entre elles sont évaporées alors qu'on atteint les 53% pour l'injection ascendante. Le fort lien entre le transfert radiatif et la dynamique du spray est clairement visible d'après ces résultats.

4. Conclusion

La capacité du spray ascendant à mieux atténuer le rayonnement que l'injection descendante a été confirmée numériquement. Les conditions d'injection ont été gardées constantes dans les deux cas et ont été calquées sur des données mesurées expérimentalement. La comparaison des deux configurations a été effectuée d'une part au niveau rayonnement avec l'analyse de la transmission et de l'épaisseur optique et d'autre part avec l'étude de la dynamique du spray à travers la représentation de trajectoires pour différentes classes de gouttes. D'ailleurs, un fort lien a été mis en évidence entre le transfert radiatif et la dynamique du spray. Il apparaît clairement qu'étudier d'autres directions d'injections peut conduire à une meilleure utilisation des brouillards en tant que bouclier radiatif. Toutefois, une confirmation par des résultats expérimentaux doit maintenant être menée à bien.

Références

- [1] A. Coppalle *et col.*, Fire protection : water curtains, *Fire Safety Journal*, 20, 3, 241-255, 1993.
- [2] J.M. Buchlin, Thermal shielding by water sprays curtain, *J. Loss Prev. Process Ind.*, 18, 4-6, 423-432, 2005.
- [3] S. Dembélé, A. Delmas, J.F. Sacadura, A method for modeling the mitigation of hazardous fire thermal radiation in water spray curtains, *Journal of Heat Transfer*, 119, 4, 746-753, 1997.
- [4] A. Collin, P. Boulet, G. Parent, D. Lacroix, Numerical simulation of a water spray – Radiation attenuation related to spray dynamics, *Int. J. of Thermal Sciences*, 46, 9, 856-868, 2007.
- [5] S. Hostikka, K. Mac Grattan, Numerical modeling of radiative heat transfer in water sprays, *Fire Safety Journal*, 41, 1, 76-86, 2006.
- [6] F. Nmira, A. Kaiss, J.L. Consalvi, B. Porterie, Predicting fire suppression efficiency using polydisperse water sprays, *Numerical Heat Transfer A*, 53, 132-156, 2008.
- [7] G. Parent *et col.*, Experimental investigation of radiation transmission through a water spray. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 97, 126-141, 2006.

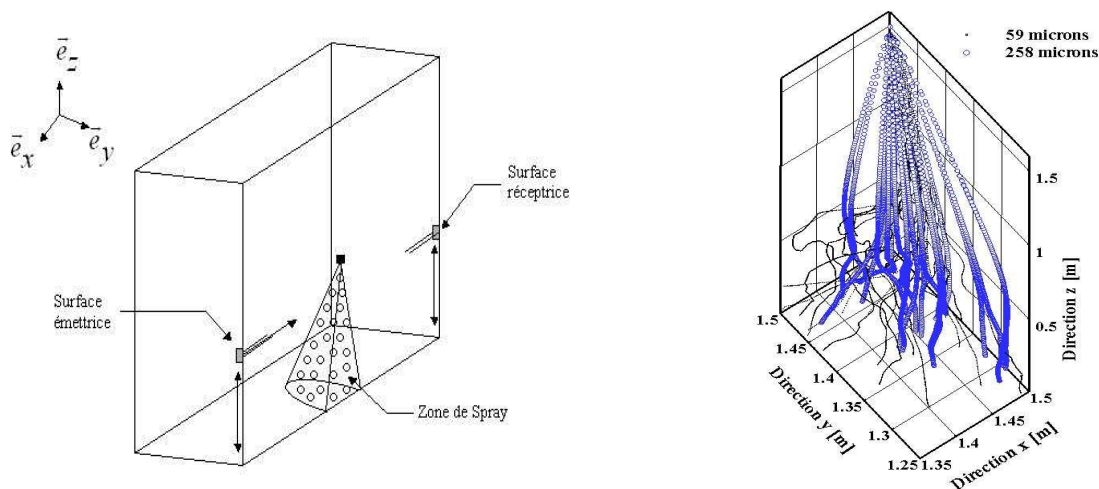


Figure 1 : Schématisation d'un cas étudié : Figure 2a : Visualisation de trajectoires pour deux classes de gouttes en spray descendant.

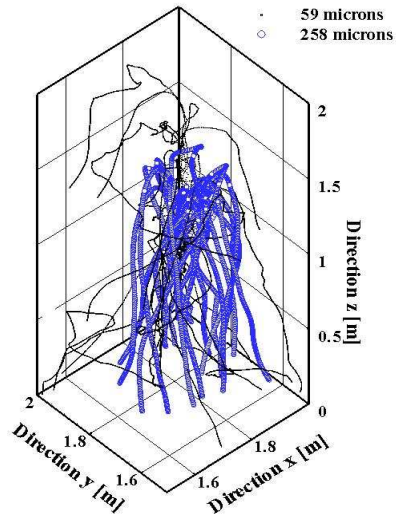


Figure 2b : Visualisation de trajectoires pour deux classes de gouttes en spray ascendant.

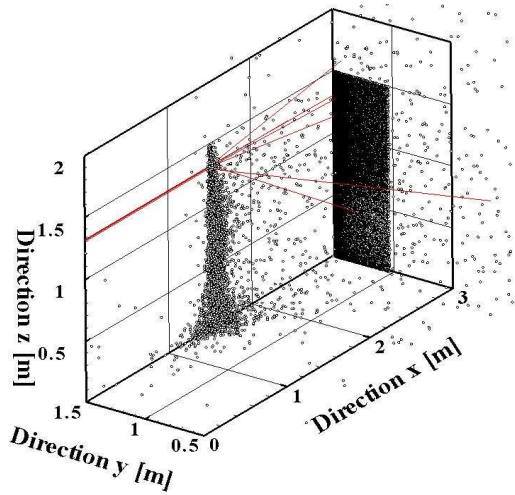


Figure 3a : Spray descendant ; localisation des événements de diffusion et de sortie durant le processus de lancer de rayons. Exemples de trajectoires de quanta à travers le milieu ($\lambda=2 \mu\text{m}$).

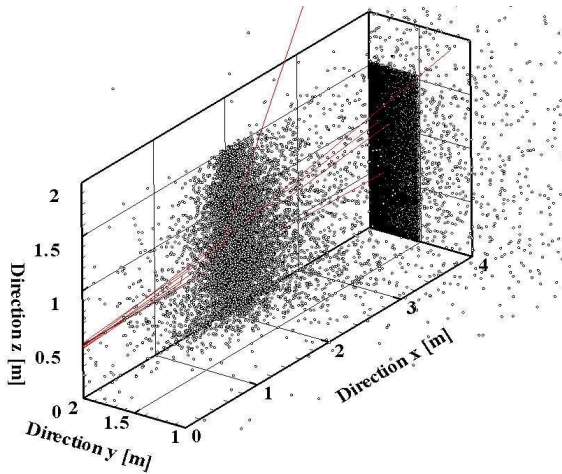


Figure 3b : Spray ascendant ; localisation des événements de diffusion et de sortie durant le processus de lancer de rayons ($\lambda=2 \mu\text{m}$).

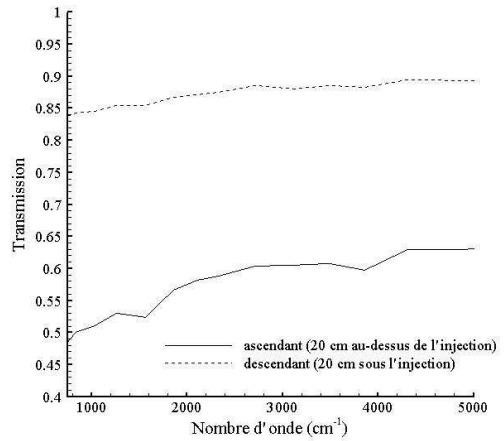


Figure 4 : Transmissions spectrales à 20 cm du point d'injection en spray descendant et spray ascendant.

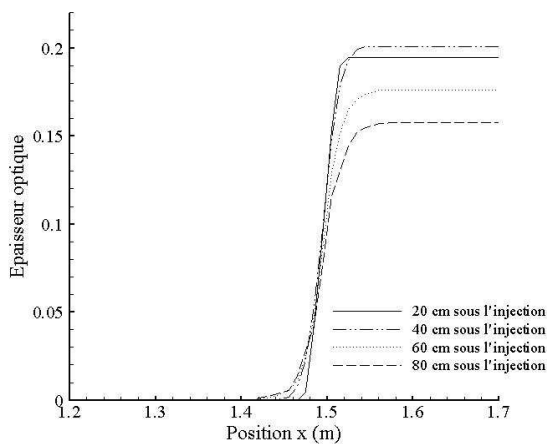


Figure 5a : Epaisseur optique suivant différentes positions verticales en spray descendant.

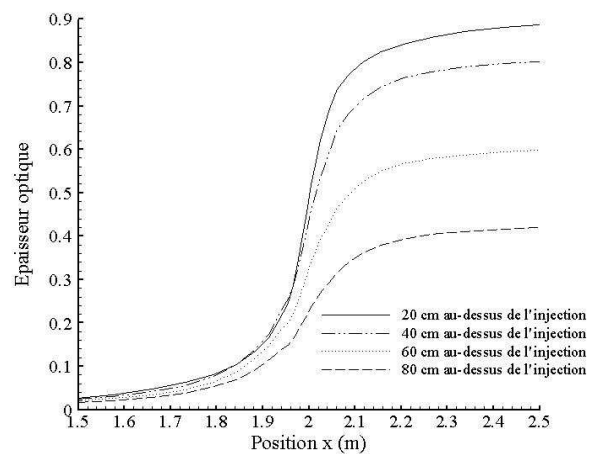


Figure 5b : Epaisseur optique suivant différentes positions verticales en spray ascendant.