

# Etude expérimentale de la transmission du rayonnement à travers des sprays descendants et ascendants associés en rampe

Sullivan LECHENE\*, Zoubir ACEM, Gilles PARENT, Bernard MONOD, Pascal BOULET

LEMTA – Laboratoire d’Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, Nancy Université, CNRS. Faculté des Sciences et Techniques.

BP 70239, 54506 VANDOEUVRE cedex

\* (auteur correspondant : [sullivan.lechene@lemta.uhp-nancy.fr](mailto:sullivan.lechene@lemta.uhp-nancy.fr))

**Résumé** - Nous avons mis au point et utilisé un banc expérimental de caractérisation de l’atténuation du rayonnement thermique par un rideau d’eau. Différents rideaux générés par des buses associées en rampes ont été étudiés à l’échelle du laboratoire (débits et pressions réduits). Les résultats obtenus permettent d’étudier l’influence de la direction d’injection des gouttes - ascendante ou descendante -, des angles d’injection, et de la distance entre les buses. En dépit de débits réduits (typiquement 0,3 L/min par buse), des atténuations allant au-delà de 50 % ont été observées. Le rôle crucial de la dynamique du spray apparaît clairement, indiquant en particulier qu’une injection ascendante qui favorise le temps de séjour des gouttes, donne pour la même quantité d’eau des atténuations deux à trois fois supérieures à ce que l’on observe en injection descendante classique.

## Nomenclature

$A$	Atténuation	<i>Symboles grecs</i>	
$T$	Transmittance	$\Phi$	flux, $W.m^{-2}$
$L_{\nu}$	Luminance spectrale, $W.m^{-2}.sr^{-1}.cm$	$\nu$	nombre d’onde, $cm^{-1}$

## 1. Introduction

Les rideaux d’eau présentent des particularités qui permettent leur utilisation comme écran radiatif. Composés de gouttelettes en suspension dans de l’air humide, ils peuvent en effet absorber et diffuser le rayonnement thermique issu d’une source donnée (incendie ou simplement paroi ou procédé à haute température). Ils induisent de ce fait une atténuation des flux thermiques rayonnés et peuvent protéger une cible (personne ou matériel, ou encore infrastructure). Cette application potentielle repose sur des bases théoriques bien connues en transfert radiatif : la théorie de Mie permet de quantifier la capacité à atténuer le rayonnement pour des gouttes d’eau données. Elle prédit même, à quantité d’eau égale, une atténuation plus forte pour les gouttes de petite taille, ce qui tendrait à promouvoir des techniques de pulvérisation produisant un brouillard de fines gouttelettes. Ces éléments ont été discutés dans les années 90 par Coppalle [1], ou Dembélé et col. [2] entre autres. Notre groupe travaille sur ce type de milieux depuis plusieurs années et a en particulier caractérisé expérimentalement et numériquement des sprays de gouttelettes d’eau [3-4]. Il ressort de ces études que la dynamique des sprays doit impérativement être couplée dans l’analyse au transfert radiatif lui-même. Des gouttes trop petites, bien qu’idéales sur un plan radiatif, peuvent constituer un rideau instable et inefficace du fait d’une dé-structuration ou d’une évaporation massive. Des gouttes trop grosses, à l’opposé, garantiront une bonne stabilité mais auront des propriétés radiatives moins intéressantes et un temps de séjour trop faible du fait d’une grande inertie, pour permettre une application efficace. L’application de l’écran radiatif nécessite donc des travaux visant à son optimisation. Différents paramètres peuvent être adaptés : la taille des gouttes, le débit des buses, leur orientation, la géométrie du spray qu’elles génèrent,

l'influence de la combinaison de plusieurs buses, etc... Nous avons travaillé dans cette étude sur deux types de buses générant un spray conique et nous avons comparé le rideau d'eau créé par une association de ces buses dans différentes configurations, en particulier en comparant les cas où les gouttes sont injectées vers le bas ou vers le haut. Les effets inverses de la gravité sur la dynamique des gouttes modifient totalement leur trajectoire, et par conséquent leur temps de séjour dans le rideau d'eau, ce qui affecte les propriétés d'atténuation résultantes.

Pour cela, nous avons mis en place un banc de mesures spectroscopiques permettant d'évaluer expérimentalement la transmission spectrale à travers un brouillard d'eau. Il est basé sur un spectromètre Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF) et une association de deux détecteurs couvrant la gamme de l'infrarouge court et moyen. Différentes associations de buses ont été étudiées permettant d'une part d'établir un panel de données expérimentales varié et d'autre part, de comparer les efficacités obtenues en fonction des diverses stratégies de pulvérisations considérées. Dans les sections suivantes, nous verrons une description rapide du dispositif expérimental, l'essentiel du mode opératoire (traitement des données, incertitudes), puis nous commenterons les résultats principaux, notamment en ce qui concerne la comparaison entre injection ascendante et descendante.

## 2. Dispositif expérimental

Les éléments essentiels qui composent le dispositif expérimental sont présentés sur la photographie de la figure 1. Le brouillard d'eau est généré par des buses espacées le long d'une rampe, elle-même fixée sur une barre mobile pouvant pivoter et se déplacer sur un axe vertical. Cette disposition permet d'une part d'étudier toutes les directions d'injection possibles et d'autre part de mesurer le rayonnement infrarouge transmis à n'importe quelle position dans le spray en modifiant la ligne de visée du spectromètre. L'alimentation en eau de la rampe est réalisée grâce à un circuit d'eau ouvert. Un compresseur est utilisé pour stocker de l'air sous une pression de 10 bars dans un réservoir tampon qui permet de stabiliser la pression en eau. La réserve en eau qui sert à l'alimentation des buses est de 30 litres, assurant l'autonomie nécessaire à la réalisation de nos essais compte tenu d'un débit réduit au niveau des buses utilisées (typiquement  $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  par buse sous une alimentation de 4 bars. Les installations grandes natures peuvent impliquer des débits allant de  $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  à  $400 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  d'après Grant [5]. Nos essais se situent clairement à échelle réduite). L'intérêt est d'éviter toute fluctuation de pression qui peut engendrer une variation des paramètres, notamment du débit ou de la granulométrie des buses utilisées. Le contrôle de cette pression est réalisé par un capteur placé sur la rampe. Une vanne de régulation, placée à la sortie du réservoir d'air comprimé, permet de régler l'alimentation en eau à la pression souhaitée. Deux types de buses ont été étudiées ici (réf. TP400067 et TP1100067 de *Spraying Systems and co.*), se différenciant par l'ouverture du jet conique qu'elles produisent : avec un grand angle de  $40^\circ$  pour l'une et  $110^\circ$  pour l'autre (voir la photographie des jets sur la figure 2 pour le cas de la buse TP400067 dans un cas typique d'utilisation présenté plus loin). Une caractérisation de la granulométrie a été réalisée en parallèle par PDPA (Phase Doppler Particle Analyzers) afin de fournir les données d'entrée pour la simulation numérique des cas étudiés. Le diamètre de Sauter des sprays pulvérisés en configuration descendante est de  $101 \mu\text{m}$  à  $20 \text{ cm}$  sous le point d'injection.

La mesure de transmission du rayonnement infrarouge à travers le spray est réalisée en utilisant comme source de rayonnement un corps noir étendu de dimensions  $30 \text{ cm}$  par  $35 \text{ cm}$ , de température  $773 \text{ K}$ . Le rayonnement, après avoir traversé la zone de spray, est analysé avec un spectromètre à transformée de Fourier (FTIR) de type Matrix de Bruker. Le spectromètre utilise de manière classique un interféromètre de Michelson et une séparatrice en KBr. Un double détecteur InSb/HgCdTe est combiné à l'appareil. Le détecteur HgCdTe analyse le

rayonnement reçu dans la gamme de nombre d'onde  $600\text{-}2000\text{ cm}^{-1}$  alors que le détecteur InSb est utilisé dans la gamme comprise entre  $1900\text{ cm}^{-1}$  et  $5000\text{ cm}^{-1}$ . La gamme commune allant de  $1900\text{ cm}^{-1}$  à  $2000\text{ cm}^{-1}$  permet dans la pratique le raccordement des deux spectres. La résolution spectrale est prise égale à  $4\text{ cm}^{-1}$ . Le rayonnement est reçu à l'entrée du spectromètre dans un angle solide de  $9.10^{-4}\text{ sr}$ . Une mesure avec et sans spray dans les mêmes conditions géométriques permet la caractérisation du rideau en transmission.

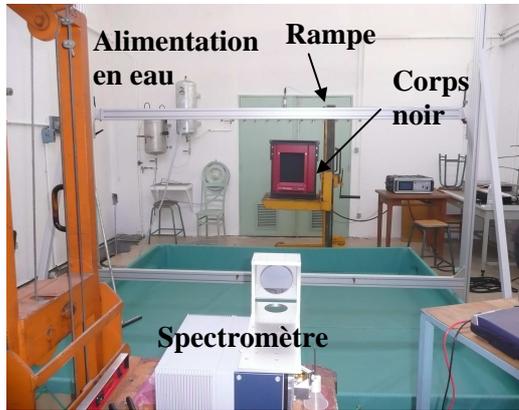


Figure 1 : Dispositif de mesure.

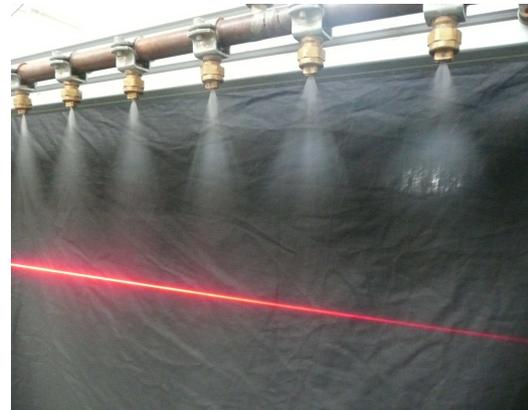


Figure 2 : Exemple typique de rampe. Mise en évidence du phénomène de diffusion (dans le visible ici) à l'aide d'un laser He-Ne.

### 3. Mode opératoire

#### 3.1. Traitement des données, premiers résultats bruts

Les différentes stratégies de pulvérisations étudiées sont comparées en terme de transmission. Les mesures de flux  $\phi$  réalisées avec et sans rideau d'eau sont référencées en indice avec l'indication « avec spray » et « sans spray » respectivement. A noter que chacun des flux spectraux obtenus avec le spectromètre est le résultat d'une moyenne réalisée sur trois essais consécutifs, chaque essai étant lui-même caractérisé par un spectre résultat d'une moyenne effectuée sur 100 balayages. Après prise en compte d'une mesure de « zéro » (notée  $\phi_0$ ), réalisée sans rideau d'eau et sans corps noir (permettant de prendre en compte l'éventuelle émission de rayonnement due au milieu environnant), le rapport des deux flux donne la transmittance spectrale à travers le rideau d'eau considéré :

$$T_v = \frac{\phi_{avec\ spray} - \phi_0}{\phi_{sans\ spray} - \phi_0} \quad (1)$$

Avec une moyenne de Planck réalisée sur l'intervalle de nombres d'onde qui nous concerne ( $\Delta\nu$ ) à partir de la luminance spectrale  $L_{\nu,\theta}^0$  du corps noir à la température  $\theta$ , nous pouvons également déterminer la transmittance totale :

$$T = \frac{\int_{\Delta\nu} L_{\nu,\theta}^0 T_v d\nu}{\int_{\Delta\nu} L_{\nu,\theta}^0 d\nu} \quad (2)$$

L'efficacité du rideau d'eau face au rayonnement peut enfin être estimée grâce à l'atténuation spectrale qui est le complémentaire de la transmission :

$$A = 1 - T \quad (3)$$

Un résultat typique est proposé sur la figure 3. La transmittance spectrale est tracée en fonction du nombre d'onde pour un spray unique, et pour une association de sprays avec un espacement de 10 cm et 20 cm, en configuration d'injection descendante, 80 cm sous le point d'injection (en dessous du spray unique ou de l'un des sprays générés par la buse). Comme cela a été observé dans [2] ou [4], le niveau moyen d'atténuation est dû aux gouttes tandis que la vapeur d'eau produit des pics d'absorption spécifiques. En toute logique, la transmission diminue lorsque le nombre de buses augmente (donc la quantité d'eau injectée augmente). Le niveau d'atténuation reste toutefois limité et multiplier la quantité d'eau par deux en réduisant la distance entre buses par ce même facteur ne double évidemment pas le potentiel d'atténuation. De façon plus rigoureuse, le doublement de la quantité d'eau injectée pourrait affecter simplement la transmission, mais l'effet est aussi non-linéaire : avec une transmission de 89% environ pour un espacement de 20 cm, on n'obtient qu'une transmission de 85% avec un espacement de 10 cm (et non pas  $0.89 \times 0.89$ , soit 79%). L'explication provient d'effets couplés entre le rayonnement et la dynamique des sprays. L'augmentation du débit s'accompagne d'une vitesse locale supérieure pour les gouttes, au détriment de leur temps de séjour.

### 3.2. Répétabilité et incertitudes de mesure

Le mode opératoire présenté plus haut fait état de moyennes sur plusieurs balayages et sur plusieurs essais pour améliorer le rapport signal sur bruit. Pour donner une idée de la répétabilité des mesures et des incertitudes correspondantes, la figure 4 présente un ensemble de 10 mesures typiques (en configuration ascendante cette fois), leur moyenne et l'écart-type calculé autour de 2% pour illustrer l'intervalle de confiance de nos mesures.

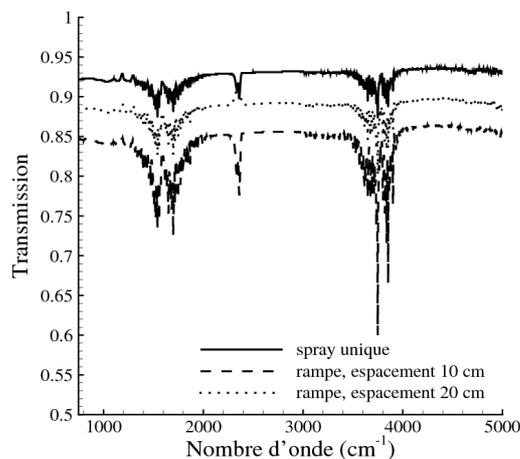


Figure 3 : Comparaison spray unique – rampe pour une injection descendante à 80 cm sous la buse (TP400067 sous 4 bars).

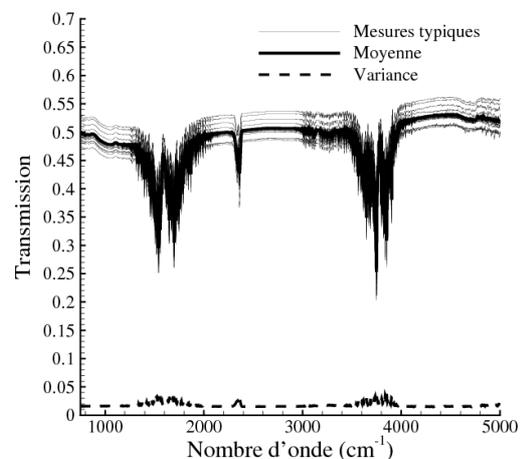


Figure 4 : Répétabilité et incertitudes sur la mesure. Cas d'une rampe en configuration ascendante.

## 4. Résultats et analyse

Les figures 5 à 8 présentent une synthèse des résultats obtenus à travers les rideaux d'eau générés en rampe, en pulvérisation ascendante et descendante, pour différents espacements entre buses. Les transmittances spectrales ont globalement toujours la même allure (celle observée aux figures 3 et 4) avec un niveau de transmission qui évolue toutefois en fonction de la capacité d'atténuation du rideau. Les données sont proposées sous la forme des transmittances totales, après intégration selon la relation (2). Les figures 5 et 6 proposent d'abord l'évolution de la transmission en fonction de la hauteur, selon un axe vertical sous la

buse d'injection. En pulvérisation descendante (figure 5), la transmission diminue (l'atténuation augmente) quand on s'éloigne du point d'injection. La rampe étant placée à 1,50 m du sol, l'atténuation est donc légèrement meilleure vers le bas du rideau. Le ralentissement des gouttes sous l'effet de la traînée explique ce phénomène en liaison avec un temps de séjour qui augmente. En injection ascendante (figure 6), le niveau d'atténuation est supérieur avec une variation en fonction de la position verticale plus complexe. La rampe est cette fois placée à 30 cm du sol, les gouttes sont pulvérisées vers le haut et on constate un niveau d'atténuation qui reste élevé à plus de 1 m du point d'injection (1,30 m du sol) et qui décroît ensuite, mais reste toujours supérieur à celui de la rampe descendante équivalente. En terme de gain d'atténuation, c'est un facteur 2 voire 3 qui est observé lorsque la pulvérisation est ascendante. L'espacement entre buses (autrement dit la quantité d'eau injectée, puisque chaque buse produit le même débit d'eau) provoque un effet simple en injection descendante : la transmission diminue (l'atténuation est meilleure) lorsque l'espacement entre buses est plus petit (le nombre de buses est plus grand). Le gain n'est pas aussi bon que pourrait le laisser penser le doublement du débit (cf. discussion proposée plus haut) mais il est réel. En injection ascendante, la situation est beaucoup plus complexe. L'atténuation passe par un maximum dont la position verticale varie. Un espacement réduit entre buses permet une protection plus homogène avec une atténuation qui décroît moins vite en partie haute. Par contre, le niveau d'atténuation peut être meilleur ou moins bon selon la position dans le rideau alors que le nombre de buses (donc le débit) est doublé. L'explication vient d'une dynamique complexe des gouttes dont le mouvement ascendant puis descendant, éventuellement à contre-courant dans la phase descendante, est fortement tributaire des modifications d'écoulement de l'air entraîné selon la distance entre buses.

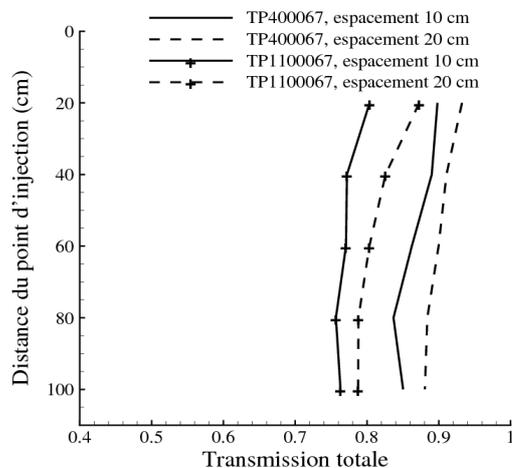


Figure 5 : Transmission du rideau en fonction de la distance par rapport à l'injection. Rampes en configuration descendante (buses TP400067 ou TP1100067). Alimentation en eau de 4 bars.

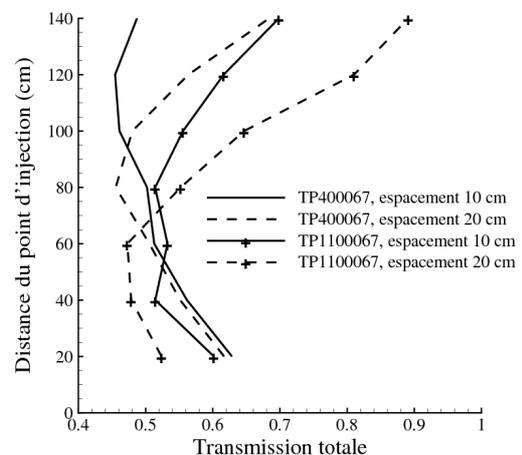


Figure 6 : Transmission du rideau d'eau en configuration ascendante dans les mêmes conditions que la Figure 5.

L'angle d'ouverture du cône d'injection des gouttes est un autre paramètre dont on peut analyser l'influence avec les figures présentées. Le cas d'un angle de 40° (tuyère TP400067), puis de 110° (TP1100067) est présenté. En injection descendante, l'augmentation de l'angle d'ouverture permet d'améliorer la capacité d'atténuation (transmission plus faible sur la figure 5). Là encore, la dynamique des gouttes explique le phénomène : l'injection sur un angle moins ouvert projette les gouttes vers le sol, entraînant un temps de séjour plus faible et par conséquent une moins bonne capacité d'atténuation. On cherchera donc à élargir le spray injecté. En rampe ascendante au contraire, une injection dans un angle réduit permet aux

gouttes d'atteindre un point haut supérieur avant la phase de chute, ce qui résulte en une meilleure atténuation en haut du rideau. Près du point d'injection (en bas du rideau) un angle plus ouvert favorise malgré tout l'atténuation.

Les Figures 7 et 8 proposent enfin une évolution de l'atténuation selon deux lignes horizontales situées à 40 cm et 80 cm sous la rampe de pulvérisation. Elles montrent une capacité relativement homogène du rideau à atténuer le rayonnement et confirment les niveaux d'atténuation observés précédemment. On gardera à l'esprit une atténuation globalement meilleure en configuration ascendante.

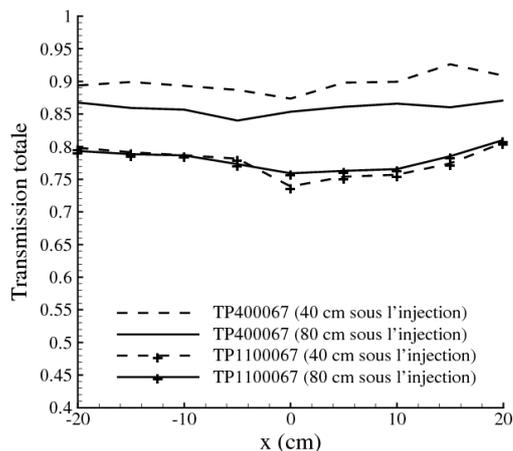


Figure 7 : Evolution transversale de la transmission de rampes en configuration descendante avec des buses espacées de 10 cm.

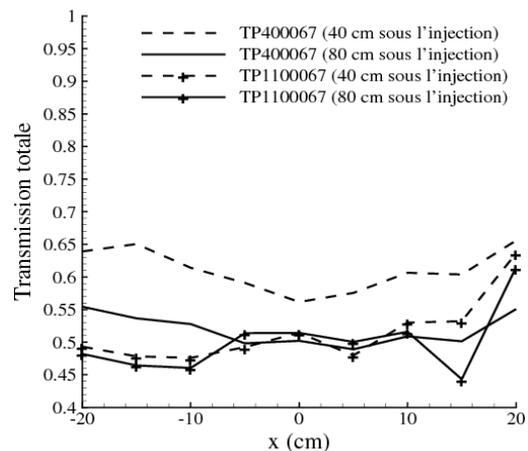


Figure 8 : Evolution transversale de la transmission de rampes en configuration ascendante avec des buses espacées de 10 cm.

## 5. Conclusion

Nous avons mis en place et utilisé un banc de caractérisation expérimentale de rideaux d'eau. Les tests réalisés en rampes confirment le couplage entre la dynamique des gouttes injectées et la capacité d'atténuation globale du rideau. Ils montrent une capacité d'atténuation du rayonnement au-delà de 50% en dépit de l'utilisation de tuyères de laboratoire à faible débit. La configuration ascendante permet d'augmenter par un facteur 2 à 3 la capacité d'atténuation du rideau. Les effets non linéaires associés à la taille des gouttes et au débit d'eau rendent complexe la prévision de l'atténuation en fonction du type de buse et de sa pression d'alimentation. Cela posera problème pour extrapoler les données à échelle du laboratoire et nécessitera probablement des essais supplémentaires à taille réelle. Le travail de simulation que nous menons en parallèle permettra de progresser sur ce plan, en utilisant les données expérimentales présentées ici à titre de validation.

## Références

- [1] A. Coppalle *et col.*, Fire protection : water curtains, *Fire Safety Journal*, 20, 3, 241-255, 1993.
- [2] S. Dombéle, 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.
- [3] 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.
- [4] G. Parent *et col.*, Experimental investigation of radiation transmission through a water spray. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 97, 126-141, 2006.
- [5] G. Grant, J. Brenton, D. Drysdale, Fire suppression by water sprays. *Progress in Energy and Combustion Science* 26, 79-130, 2000.