

# Modélisation de la protection radiative par rideaux d'eau mouillants

Jean-Marie BUCHLIN

Institut von Karman de Dynamique des Fluides  
Chaussée de Waterloo, 72, B-1640, Rhode-Saint-Genèse, Belgique

**Résumé** – L'étude traite de la protection par rideaux d'eau de réservoirs de stockage soumis à un fort flux radiatif émis par un feu. Le type d'écran radiatif étudié est formé de rangées de pulvérisations d'eau horizontales qui forment à leur impact sur la paroi un film ruisselant. Cette technique de protection s'inscrit dans le cadre des moyens de mitigation des conséquences de risques majeurs industriels. Le papier présente une modélisation thermohydraulique et radiative suivie d'une série de simulations qui montrent que cette technique se caractérise par des facteurs d'atténuation très élevés qui peuvent en contre partie s'accompagner d'un échauffement notable du film liquide.

## Nomenclature

$A$	facteur d'atténuation	<i>Symboles grec</i>	
$C$	chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$\alpha$	coefficient d'extinction, $m^{-1}$
$d_{32}$	diamètre moyen des gouttelettes, $m$	$\Phi$	densité de flux thermique, $W.m^{-2}$
$D$	diamètre du spray, $m$	$\dot{I}$	densité de flux massique, $kg.s^{-1}.m^{-2}$
$e$	épaisseur du film d'eau, $m$	$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$
$\dot{m}$	débit massique par envergure, $kg.s^{-1}.m^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>	
$T$	température, $^{\circ}C$	$b$	buse
$U$	vitesse moyenne, $ms^{-1}$	$f$	final
$x$	coordonnée latérale, $m$	$g$	gouttelettes
$y$	distance normale à la paroi, $m$	$o$	incident
$z$	abscisse verticale, $m$	$sp$	spray

## 1. Introduction

L'atténuation des risques associés à la formation de feux de nappe ou de réservoirs dans des lieux de stockage est une préoccupation majeure dans le monde industriel de la pétrochimie et du gaz.

De nos jours, la technique de mitigation par rideaux d'eau tend à se répandre sur les sites industriels compte tenu de sa simplicité, sa flexibilité et son efficacité [1]. Le principe consiste à placer dans le chemin du flux radiatif incident une barrière d'eau pulvérisée qui joue le rôle d'écran thermique et préserve ainsi l'environnement situé en aval.

Le rideau d'eau peut opérer verticalement. Il est alors placé parallèlement à la façade à protéger. Ce type d'écran thermique a fait l'objet d'une étude approfondie à l'Institut von Karman dans le cadre du programme commun Européen *Environment* sous le nom du projet ASTRRE mené en étroite collaboration avec l'Université Claude Bernard et le Centre de Thermique de l'INSA (CETHIL) de Lyon ainsi qu'avec les partenaires industriels Elf-Total et Gaz de France [2]. Le produit final est un code d'ingénierie CASIMIRE (Code pour l'Aide à la Simulation de la Mitigation par Rideaux d'Eau). Cet outil permet de dimensionner un système à rideau d'eau efficace pour un scénario de feu donné.

Dans la présente étude le rideau d'eau est orienté horizontalement et dirigé vers la paroi à protéger pour former tout d'abord un brouillard de gouttelettes puis un film d'eau ruisselant comme le schématise la figure 1. Ce type de protection est en voie de développement à l'Institut von Karman [3]. Le papier présente une modélisation radiative et thermohydraulique suivie de simulations illustratives qui mettent en exergue les performances attendues de cet écran radiatif.

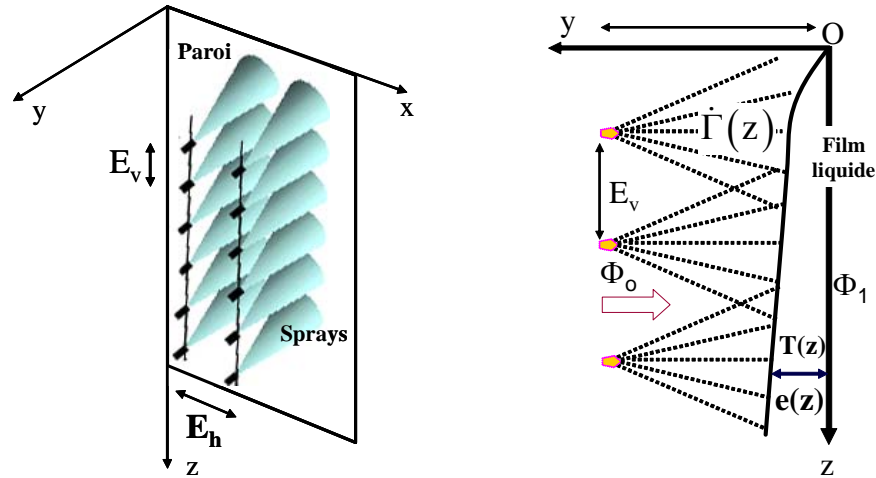


Figure 1 : Principe de l'écran thermique par rideau d'eau.

## 2. La modélisation

Le rideau d'eau se compose de plusieurs rampes de buses de pulvérisation. Ces rampes sont séparées horizontalement de la distance  $E_h$  et verticalement de la distance  $E_v$ . Elles sont placées à la distance  $Y$  de la paroi à protéger. Chaque rampe est équipée de  $n_b$  buses par mètre courant. La pulvérisation est un écoulement diphasique polydispersé décrit par la granulométrie des gouttelettes qui suit en général une loi lognormale et qui se caractérise par le diamètre moyen de Sauter,  $d_{32}$ .

L'impact des sprays sur la paroi se traduit par la formation d'un film liquide ruisselant dont l'épaisseur  $e$  et le débit massique par unité d'envergure  $\dot{m}$  varient avec l'abscisse verticale  $z$ . L'équation de la masse dans le film liquide s'écrit donc:

$$\frac{d\dot{m}}{dz} = \rho \frac{deU}{dz} = \dot{\Gamma}(z) \quad (1)$$

Où  $\dot{\Gamma}$  est la densité de flux massique des pulvérisations à l'impact et  $U$  la vitesse moyenne débitante du film liquide à l'altitude  $z$ .

L'équation de la quantité de mouvement appliquée à un petit volume de contrôle  $dx dy dz$  est:

$$-\left( \mu + K^2 \rho y^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \right) \frac{du}{dy} = \rho g (y - e) \quad (2)$$

Dans l'expression (2)  $u$  est la composante verticale de la vitesse locale à l'altitude  $z$  dans l'épaisseur du film liquide, et la contrainte turbulente se modélise selon le concept de la longueur de mélange proposée par Prandtl;  $K$  est la constante de von Karman. On a montré

lors d'une étude précédente [3] que la solution numérique de l'équation (2) peut être approchée par une loi en puissance entre la vitesse débitante et l'épaisseur du film ce qui, dans le cas d'une densité de flux massique constante, aboutissait à :

$$e(z) = \left[ \frac{\dot{\Gamma} z}{B\rho} \right]^\beta \quad (3)$$

Dans ce modèle hydraulique la constante dimensionnelle  $B$  et l'exposant  $\beta$  prennent des valeurs qui diffèrent selon le régime de l'écoulement.

L'ensemble, phase dispersée et film liquide, est assimilé à deux milieux semi transparents en série. L'écran thermique est tout d'abord produit par les gouttelettes qui interceptent la densité de flux radiatif incident  $\Phi_0$  et qui l'atténuent au travers de mécanismes de diffraction et d'absorption. Par la suite le film liquide absorbe une partie du flux thermique restant. Adoptant une formulation basée sur la loi Beer-Lambert, le facteur d'atténuation totale s'exprime ainsi :

$$A(z) = 1 - \exp(-\kappa_{sp}) \exp(-\alpha.e(z)) \quad (4)$$

Des simulations numériques effectuées avec le code ASTRRE [5] ont montré que l'épaisseur optique  $\kappa_{sp}$  de la phase pulvérisée pouvait se modéliser comme suit :

$$\kappa_{sp} = \frac{3}{2} \left( \frac{n_b \dot{m}_b}{U_g D} \right) \cdot \frac{Y}{\rho d_{32}} \quad (5)$$

Où  $\dot{m}_b$  le débit liquide d'une buse,  $D$  le diamètre de l'empreinte du spray à l'impact et  $U_g$  est la vitesse moyenne des gouttelettes.

Dans la relation (4)  $\alpha$  est le coefficient d'extinction de l'eau dans l'infrarouge; il a été modélisé suivant une approche radiative spectrale puis déterminé en laboratoire lors d'essais menés sur une plaque plane verticale instrumentée de fluxmètres et d'une sonde à triangulation laser pour la mesure de l'épaisseur du film liquide [4].

On notera à la relation (4) que le facteur d'atténuation  $A$  dépend de la coordonnée  $z$  au travers d'une part de la distribution pas nécessairement uniforme des buses ( $n_b$ ) et d'autre part de l'évolution de l'épaisseur  $e$ . Par ailleurs, la relation (4) indique aussi que l'extinction radiative dans le film liquide correspond à une quantité énergétique absorbée égale à  $A(z)\Phi_0$ . Cette puissance élèvera la température du film alors que l'apport d'eau fraîche des sprays aura l'effet inverse. Compte tenu de ces deux mécanismes antagonistes, l'équation de l'énergie du film devient :

$$\frac{d(\dot{m}CT)}{dz} = A(z)\Phi_0 + \dot{\Gamma}CT_{sp} \quad (6)$$

Dans l'équation (6) on considère une température moyenne et on néglige l'échange de chaleur entre le film liquide et la paroi.

### 3. La simulation

Pour un arrangement de buses et une alimentation en eau donnés, on calcule dans un premier temps la répartition de la densité de flux massique à l'impact puis l'évolution de l'épaisseur du film liquide (Eq. 3). La variation verticale du facteur d'atténuation totale est

ensuite déterminée (Eq.4) moyennant la connaissance complémentaire des caractéristiques des pulvérisations (Eq.5). L'équation thermique (6) peut alors être résolue par une méthode de type Runge-Kutta.

L'évolution de l'épaisseur du film liquide le long de la paroi est tracée à la figure 2 pour des densités de flux massique représentatives de l'application concernée. La figure 3 montre la distribution verticale du facteur d'atténuation qui en résulte. On constate que cette technique de protection peut fournir un facteur de protection très intéressant puisque très rapidement l'atténuation dépasse les 80% pour atteindre facilement 95% après quelques mètres de film liquide. La figure 3 souligne aussi l'apport des pulvérisations dans l'écran thermique. Cette contribution n'est marquée qu'au début de la formation du film liquide. Elle devient négligeable quand celui-ci est bien développé.

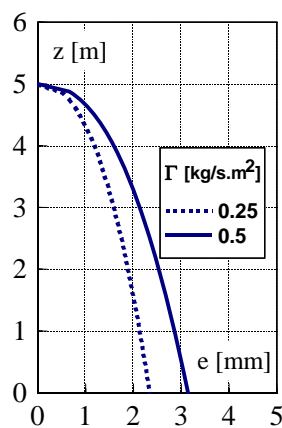


Figure 2 : Epaisseur du film liquide

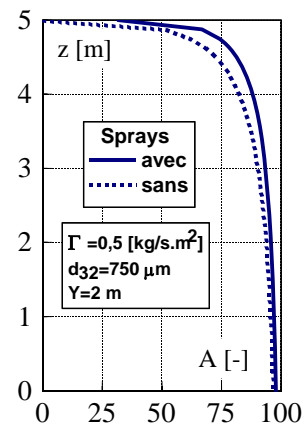


Figure 3: Facteur d'atténuation

Étant donné que la majorité de l'absorption s'effectue dans le film il faut donc s'attendre à un échauffement significatif de l'eau ruisselante. La figure 4 montre l'élévation de la température de l'eau le long de la paroi pour les mêmes conditions hydrauliques que celles des figures 2 et 3 et pour trois valeurs de la densité de flux de chaleur incidente. Un plateau se dessine très vite; sa valeur augmente linéairement avec la densité de flux incidente  $\Phi_0$  et la température des pulvérisations  $T_{sp}$  comme le précise la figure 5. Les niveaux de température atteints pour des densités de flux de chaleur dépassant les 75 kW/m<sup>2</sup> donnent lieu à penser que les effets d'évaporation de l'eau pourraient jouer un rôle non négligeable sur l'épaisseur du film liquide et devraient être évalués ou être pris en considération dans une modélisation future.

On désire protéger la façade d'un bâtiment haut de 11m, soumis à un rayonnement thermique de 44kW émis par d'un feu de nappe de GNL. Une rampe horizontale de buses de type jet plat de diamètre hydraulique égal à 3,5mm et de grand angle, est positionnée au sommet de la façade. Des buses de type cône plein de diamètre hydraulique égal à 5mm sont ensuite disposées sur 7 rampes dans un schéma en quinconce. Toutes les rampes sont distantes de 0,7m de la paroi et travaillent sous une pression de 200kPa. Les simulations sont effectuées en considérant une eau à 20°C. La cartographie de la densité du flux massique d'eau résultante est présentée à la figure 6. Le facteur d'atténuation prend rapidement des valeurs supérieures à 75% pour dépasser même 90% après 4m comme l'indique la figure 7. La cartographie thermique reportée à la figure 8 souligne que ces fortes absorptions radiatives se concrétisent par une élévation de température qui avoisine la condition d'ébullition du film au pied de la façade. Pour se prémunir de l'éventuelle disparition du film dans la région basse

du bâtiment il s'avère donc nécessaire d'optimiser le rideau en relevant par exemple le débit d'eau des rampes inférieures. On note aussi à la figure 8 que la distribution de température latérale n'est pas uniforme: des écarts de température de 7°C à 11°C sont observés.

Afin de valider l'ensemble de ces prédictions une campagne d'essais de type terrain avec feux de nappe est en préparation. L'objectif est d'une part de confirmer les performances d'atténuation mais aussi la bonne tenue de cet écran radiatif.

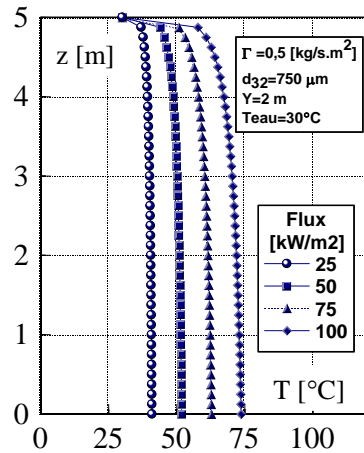


Figure 4 : Elévation de la température du film d'eau

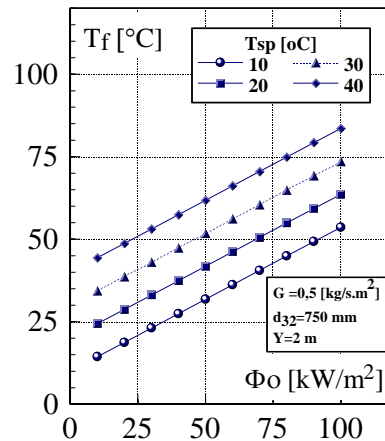


Figure 5 : Effet de la densité de flux incidente et de la température des sprays sur la température plateau

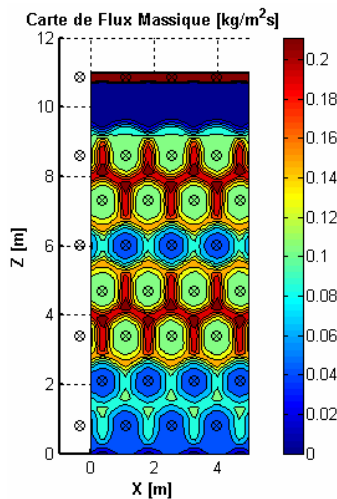


Figure 6 : Carte de la densité de flux massique incident

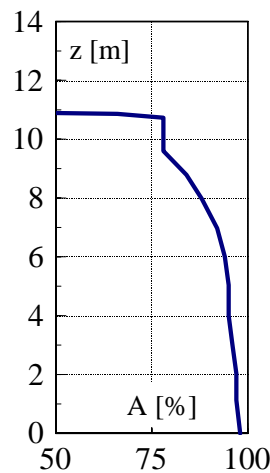


Figure 7: Distribution du facteur d'atténuation

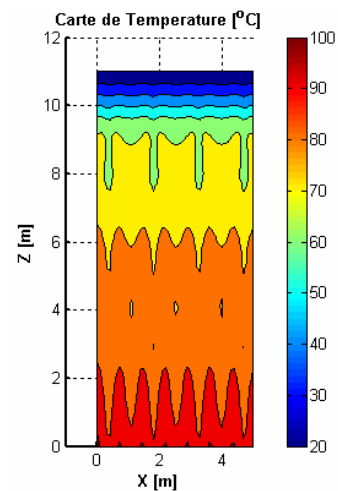


Figure 8: Carte de température du film

## 4. Conclusions

Une modélisation de la protection par sprays frappant une paroi soumise à un flux de rayonnement thermique de forte intensité, est présentée.

L'atténuation du flux radiatif incident est produite par le brouillard de gouttelettes où des phénomènes de diffusion et d'absorption prennent place, puis par le film liquide qui ruisselle sur la paroi où seule l'absorption joue le rôle important d'écran.

La modélisation proposée prend en compte le comportement radiatif de ces deux milieux semi transparents mais aussi le comportement thermohydraulique du film ruisselant le long de la paroi.

La simulation démontre que ce type d'écran thermique se caractérise par un facteur d'atténuation très élevé qui peut facilement atteindre 95% et que la majeure partie de l'absorption radiative s'effectue dans le film liquide. En contre partie l'eau ruisselant sur la paroi subit une élévation de température qui peut conduire à une évaporation notable voire à l'ébullition du film liquide si le dimensionnement du rideau mouillant n'est pas optimisé.

Les étapes suivantes sont l'introduction dans la modélisation des effets d'évaporation et la réalisation d'essais terrain de validation menés avec des feux de nappe.

## Références

- [1] J.-M. Buchlin, *Water Sprays as Mitigation Means*. Invited paper in International Workshop on Multiphase and Complex Flow Simulation for Industry: Physical, Mathematical, Numerical Models and Softwares for Safety and Design Improvements, Cargèse, Corsica, 2003.
- [2] F. Griolet, J. Lieto, S. Dembele, A. Delmas, M. Raynaud, J.-F. Sacadura, H. Prétel, J.-M. Buchlin & M.L. Riethmuller. *Mitigation of hazardous fire radiation by water spray curtain: A co-operative program to obtain engineering predictive model with laboratory and fields tests validation.* " Loss and Safety Promotion in the Process Industries. Proceedings of the International Symposium. Barcelona , Spain, 1998.
- [3] K. Hald & J.-M. Buchlin, *Thermal shielding by impinging water spray curtains*. In Proceedings of the Eurotherm 73 on Computational Thermal Radiation in Participating Media. Mons, Belgium, 15-17 April, 2003. VKI-RP 2003-08.
- [4] J.-M. Buchlin. *Systèmes de Protection Incendie par Rideau d'Eau et Film Liquides - ASTRE II* ". VKI CR 2001-13, 2001.
- [5] H. Pretrel, *Etude du comportement thermohydraulique de pulvérisations liquides sous l'effet d'un rayonnement infrarouge - application à la protection incendie*, Thèse de Doctorat, IVK Belgique - Institut des Sciences Appliquées de Lyon, France, 1997.

## Remerciements

L'auteur tient à remercier les collaborateurs industriels, ARKENA, GDF-SUEZ et TOTAL, pour leur constant soutien dans ce programme de recherche dont le but est de finaliser le code CASIMIRE.