

Caractérisation expérimentale de la protection par film d'eau ruisselant d'une paroi soumise à un flux radiatif.

Adrien AUBERT¹, Fabien CANDELIER², Camille SOLLIEC^{1*}

¹GEPEA, Ecole des Mines de Nantes, Département Systèmes Energétiques et Environnement
4 rue Alfred Kastler, BP 20722, Nantes, Cedex 3

²IUSTI, Université de la Méditerranée, Technopôle de Château-Gombert
5 rue Enrico Fermi, 13453, Marseille cedex 13

* (auteur correspondant : camille.solliec@mines-nantes.fr)

Résumé – Du fait de la réglementation en cas d'incendie, certains matériaux ne peuvent être utilisés dans la construction navale. Nous nous intéressons ici à la protection qu'engendre un film d'eau ruisselant sur une paroi verticale. Nous présentons un travail expérimental. Il consiste en l'étude de l'influence du débit du film, du flux rayonnant incident ainsi que la nature de la paroi sur les températures atteintes. Nous montrons que ces paramètres ont tous une influence importante sur les résultats.

Nomenclature

C	Capacité thermique de l'eau, kJ/kg K	ΔT	Variation de température, K
IR	Infrarouge,	φ	Densité de flux, W m ⁻²
P_{th}	Puissance thermique, W	<i>Indices</i>	
Q_m	Débit massique, kg s ⁻¹	<i>bas</i>	Au bas de la paroi
T	Température, K	m_{paroi}	Par unité de largeur de paroi
		<i>res</i>	Dans le réservoir

1. Introduction

La recherche de nouveaux matériaux de construction est une thématique qui suscite de nombreuses études. Elle constitue en effet un point clé dans une démarche industrielle d'optimisation économique et énergétique. Dans le domaine de la construction navale, un matériau composite a été conçu afin d'être substitué à certaines parois en acier. Cependant, bien que satisfaisant d'un point de vue mécanique, ce matériau dégage des gaz toxiques lorsqu'il est soumis à de fortes températures. Il ne peut donc satisfaire aux critères de certification [1]. Pour pallier ce problème de combustibilité, nous nous intéressons à la protection thermique engendrée par le ruissellement d'un film d'eau sur une telle paroi. L'idée est de tirer partie des échanges thermiques importants avec le fluide afin de garantir la non détérioration du panneau lorsqu'il est soumis à une source de chaleur distante.

Les films d'eau sont utilisés dans de nombreuses applications, pour le moins variées. On les trouve par exemple à la base de dispositifs de dessalement d'eau de mer [2] et de systèmes de refroidissement de composants électroniques [3]. Ils sont aussi utilisés dans des contextes de protection incendie de cuves d'hydrocarbures [4], de parois en verre [5] et de parois métalliques [6]. A la vue de ces études, il apparaît qu'ils possèdent, pour une masse restreinte, d'excellentes qualités d'extraction de la chaleur par convection. La valeur élevée de la chaleur latente de l'eau, lui permet aussi d'évacuer d'importantes quantités de chaleur par le biais du changement d'état. Enfin, l'eau possède de bonnes capacités d'absorption du rayonnement de type infrarouge. Cependant les études restent assez limitées à des analyses de faisabilité et le plus souvent dans des situations unidimensionnelles.

Nous proposons ici une étude expérimentale de la protection par film d'eau vis-à-vis d'un flux radiatif. Deux types de parois sont considérés : l'une est en aluminium, l'autre est faite du matériau composite. L'influence du débit du film ainsi que du flux radiatif sur la protection est étudiée.

2. Matériels et méthodes

Le banc d'essais que nous utilisons est présenté sur les figures 1 et 2. Le film d'eau est créé grâce à une rampe d'injection équipée de trois buses de type sprays plats (LECHLER, voir Fig. 3). Celle-ci est alimentée par une pompe centrifuge dont le débit est mesuré par un débitmètre à effet Coriolis. Le réservoir d'eau est maintenu à un niveau constant ; la température de l'eau y est mesurée. Au bas de la paroi, l'eau ayant ruisselé est évacuée par gravité, nous mesurons également sa température au centre de la paroi.

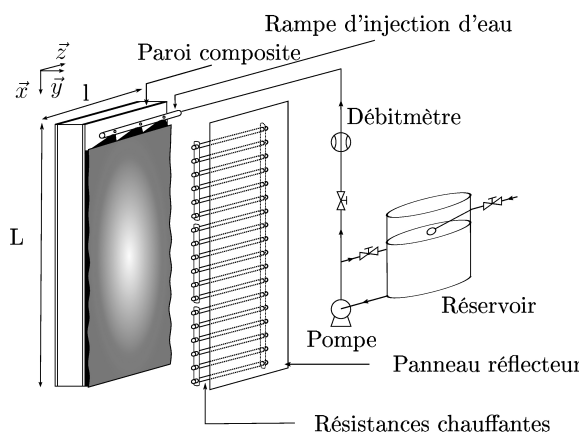


Figure 1 : Schéma du banc d'essais.

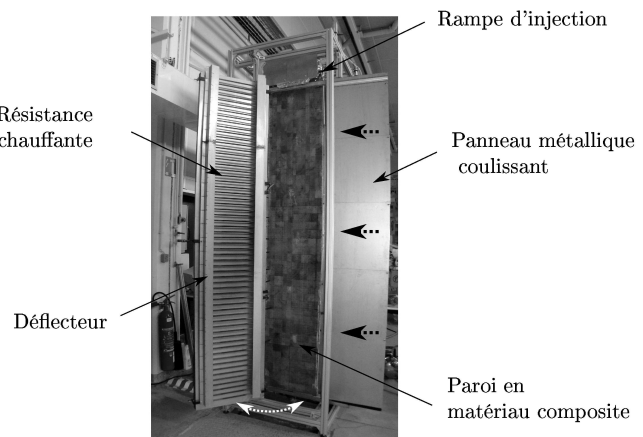


Figure 2 : Photographie du banc d'essais.

Le flux rayonnant est produit par 60 résistances chauffantes (totalisant 15kW de puissance électrique). Les densités de flux radiant reçues par la paroi sont mesurées par un fluxmètre CAPTEC. Elles sont présentées sur la figure 4 en fonction de la hauteur pour différentes puissances. On observe des variations de densité de flux aux extrémités hautes et basses de la paroi, assimilable à l'effet du facteur de forme. Au centre de la paroi, les variations peuvent s'expliquer par la disparité des résistances ohmiques des éléments chauffants.

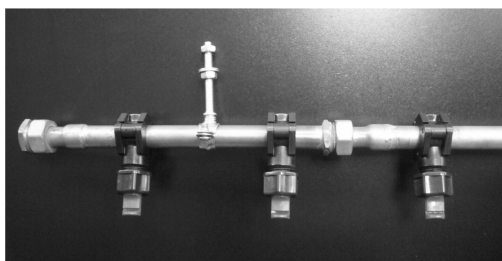


Figure 3 : Rampe d'injection d'eau.

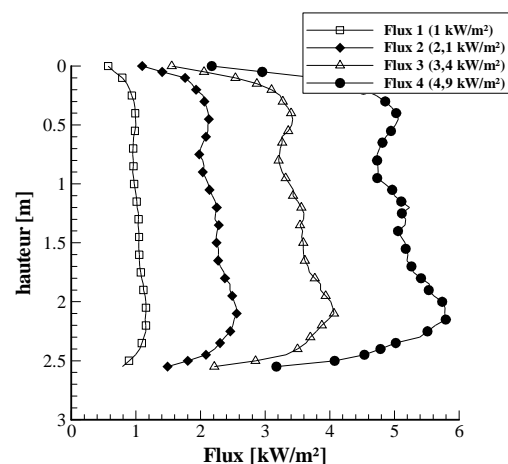


Figure 4 : Densités de flux reçues par la paroi.

2.1. Description et instrumentation des parois

Les deux parois étudiées sont de dimensions identiques : 2,80 m de hauteur et 0,5 m de largeur. L'une est constituée d'une plaque en aluminium de 5 mm d'épaisseur isolée en face arrière par de la laine de roche. La seconde paroi est en matériau composite (voir Fig. 6). Elle est formée d'une âme (partie centrale) en balsa de 40 mm d'épaisseur et de deux peaux en résine de polyester et fibres de verre de 3 mm d'épaisseur disposées sur les deux faces.

Afin d'étudier la protection apportée par le film d'eau, nous réalisons des mesures de températures dans ces parois. Concernant la paroi aluminium, nous avons réalisé des thermocouples de surface en suivant les spécifications de la norme FTP de l'Organisation Maritime Internationale (pour les tests de résistance incendie). Les fils de thermocouples (de diamètre 0,5 mm) sont brasés de part et d'autre d'un disque de cuivre de diamètre 12 mm et d'épaisseur 0,2 mm (Cf. Fig. 5). Le thermocouple est ensuite simplement appliqué sur la face non exposée de la plaque en aluminium et maintenu en position par l'isolant (laine de roche) fixé par une colle de type céramique. Nous avons installé au total quatorze thermocouples.

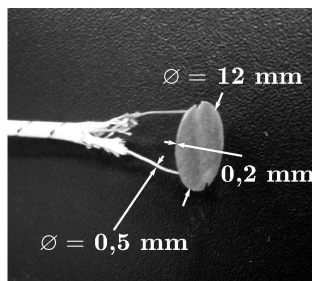


Figure 5 : Photographie d'un thermocouple de surface pour la paroi aluminium.

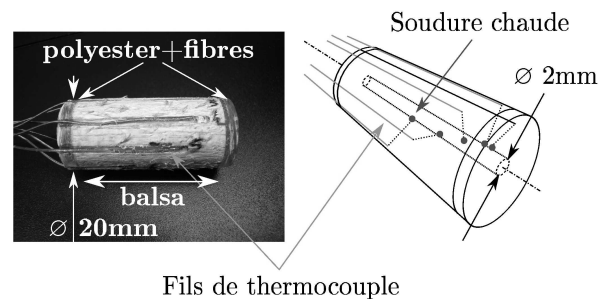


Figure 6 : Photographie et schéma d'une sonde de température pour le composite.

Pour garantir un bon positionnement des thermocouples pour différentes profondeurs dans le matériau composite, 7 cylindres de 20 mm de diamètre ont été prélevés dans une paroi composite similaire à celle de notre étude (voir Fig. 6). Des perçages sont réalisés dans la direction radiale des cylindres et décalés de manière hélicoïdale (45°) dans le sens de la longueur. La profondeur est restreinte à 9 mm, pour éviter l'alignement des soudures chaudes. Les thermocouples sont positionnés à 1, 2, 4, 8, 14, 24, 34 et 45 mm dans le composite (relativement à la paroi exposée au flux radiatif). Les sondes de température sont ensuite introduites dans la paroi composite d'essais, l'étanchéité est assurée par de la résine de polyester.

Les thermocouples de surface ont été répartis selon le schéma présenté sur la figure 7. Deux séries de sept thermocouples espacés verticalement de 42,5 cm sont situées de part et d'autre de l'axe central (à 2,5 cm). Les sondes de température dans le matériau composite ont été réparties de manière alternée afin d'en réduire le nombre, tout en conservant la possibilité d'observer des phénomènes tridimensionnels (cercles noirs sur la Fig. 7).

2.2. Méthodes expérimentales

Le film d'eau ruisselle sur la paroi et l'ensemble est soumis à un flux radiatif constant. Nous présentons ici les valeurs relevées en régime permanent. Concernant la paroi en composite, nous présentons les valeurs mesurées par le thermocouple le plus proche de la paroi exposée au flux radiatif (à 1 mm de profondeur).

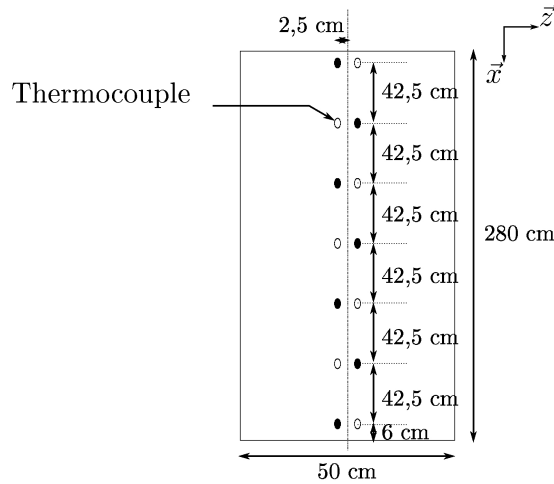


Figure 7 : Schéma de positionnement des thermocouples (en noir pour le composite).

Pour faciliter la comparaison entre les expériences, la température à une altitude donnée est comparée à une référence donnée par le thermocouple placé le plus haut sur la paroi. On obtient donc une différence de température, notée : ΔT . Nous définissons aussi la puissance nette évacuée par le film :

$$P_{th} = Q_m C (T_{eau,bas} - T_{eau,res}). \quad (1)$$

3. Résultats expérimentaux

De nombreuses expériences ont été réalisées, en faisant varier des paramètres tels que le débit et la densité de flux imposée par la source de rayonnement. L'intégralité des résultats n'est pas présentée ici dans un souci de concision. Les figures 8, 10 et 12 (colonne de gauche) sont obtenues pour des expériences avec la paroi aluminium, tandis que les figures 9, 11 et 13 (colonne de droite) sont obtenues avec la paroi composite.

Sur les figures 8 et 9 nous présentons la température mesurée en régime permanent en fonction de la hauteur. On observe, à l'exception du débit de 120 kg/h m_{paroi} (présenté fig. 8), que la température évolue de manière quasi-linéaire en fonction de la hauteur. L'eau arrivant au bas de la paroi ayant été exposée au rayonnement pendant plus longtemps, sa température est plus importante qu'en haut de la paroi, d'où une paroi plus chaude. Le débit de 120 kg/h m_{paroi} (Fig. 8) présente aussi un profil de température linéaire en fonction de la hauteur, mais dévie proche du bas de la paroi (vers 2,55 m). Ce comportement est très sûrement dû à l'apparition d'une évaporation significative. En effet, l'eau y atteint 65,8°C et un dégagement de vapeur au bas de la paroi est observable.

Si l'on reporte les valeurs de température mesurées au bas de la paroi en fonction du débit, on obtient les figures 10 et 11. On observe une décroissance hyperbolique de la température en fonction du débit pour les deux types de parois. A faibles flux, les ordres de grandeur des températures pour la paroi aluminium et composite sont comparables. A flux plus importants, les différences s'accroissent.

Notons que dans le cas de la paroi composite, le film à faible débit « s'ouvre » localement sous l'effet du flux radiatif (il s'assèche). Vu la valeur des températures le phénomène n'est pas lié à l'évaporation mais probablement à la convection de Marangoni. Dans les essais présentés ici, le débit le plus faible pour chaque flux est celui où commence à apparaître ce phénomène.

Paroi aluminium :

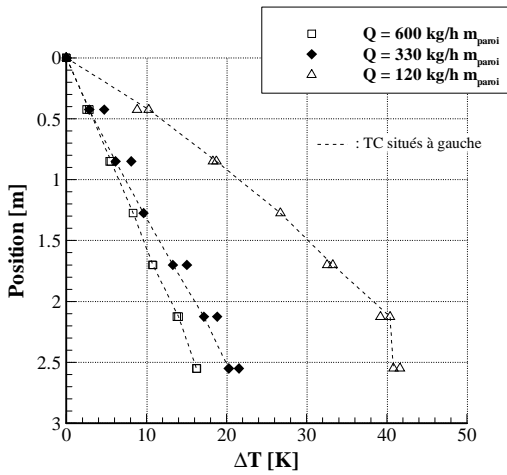


Figure 8 : Variation de la température en fonction de la hauteur : $\phi=4,9 \text{ kW/m}^2$.

Paroi composite :

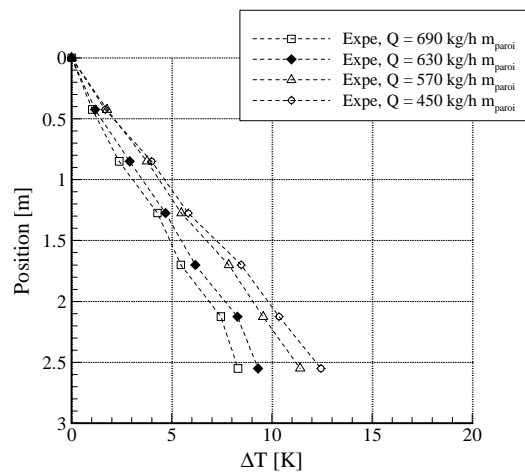


Figure 9 : Variation de la température en fonction de la hauteur : $\phi=4,9 \text{ kW/m}^2$.

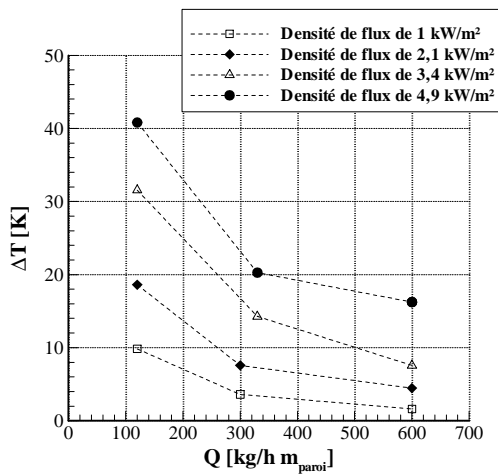


Figure 10 : Variation de la température en bas de la paroi en fonction du débit.

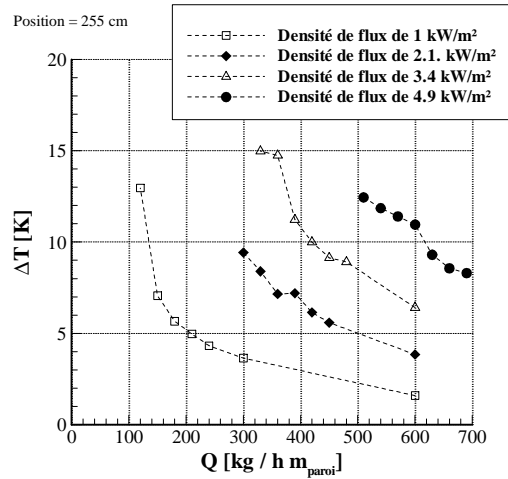


Figure 11 : Variation de la température en bas de la paroi en fonction du débit.

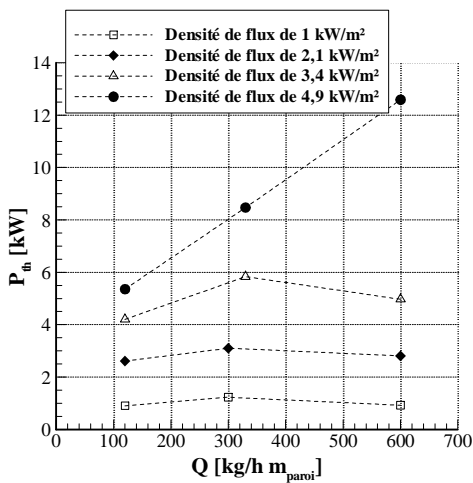


Figure 12 : Variation de la puissance évacuée par le film en fonction du débit.

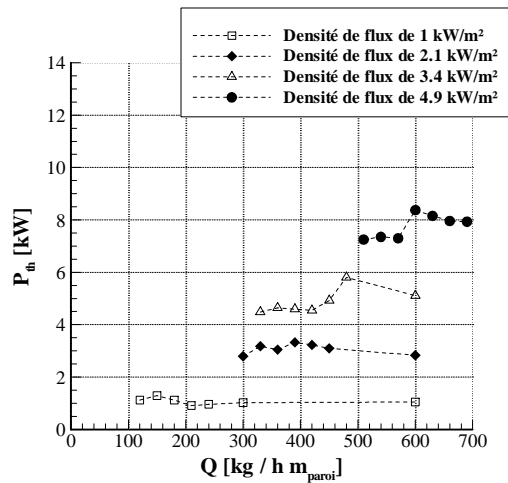


Figure 13 : Variation de la puissance évacuée par le film en fonction du débit.

En parallèle, sur les figures 12 et 13, nous présentons les puissances accumulées par le film d'eau durant ces mêmes expériences (P_{th}). Pour $\phi = 1$ et $2,1 \text{ kW/m}^2$, on observe que P_{th} est quasi-constante en fonction du débit, tandis que pour $\phi = 3,4$ et $4,9 \text{ kW/m}^2$, ses variations sont beaucoup plus importantes. Pour comprendre cette tendance, il faut revenir aux propriétés de semi-transparence de l'eau. En effet, son absorptivité dépend fortement de la longueur d'onde (transparente dans le visible, opaque dans l'IR). Or, la distribution spectrale du rayonnement émis tend vers le visible quand ϕ augmente (loi de Planck appliquée aux résistances). Aux faibles ϕ , le film est donc opaque au rayonnement et en absorbe la majeure partie, alors que pour des ϕ importantes, l'absorption du rayonnement est fonction de l'épaisseur du film (loi de Beer-Lambert). L'augmentation du débit amène donc des puissances absorbées plus grandes. Pour les débits les plus forts, la puissance semble diminuer, peut être par augmentation des transferts interfaciaux par convection. Ce comportement n'est cependant pas observable pour la paroi en aluminium pour $\phi = 4,9 \text{ kW/m}^2$.

4. Conclusion et perspectives

A l'issue de cette étude, nous avons pu obtenir plusieurs résultats concernant la protection par film d'eau d'une paroi exposée à un flux radiatif incident. Pour les deux parois étudiées, on observe une variation quasi-linéaire de la température en fonction de la hauteur. Cette température suit une décroissance hyperbolique en fonction du débit et ce pour différents flux. La puissance extraite par le film d'eau apparaît dépendre fortement du débit pour les flux les plus importants. Dans le cas particulier de la paroi aluminium, on observe un phénomène d'évaporation à faibles débits et fortes densités de flux. Il n'a pas pu être observé dans le cas de la paroi composite, du fait de l'apparition d'un autre phénomène : l'assèchement par effet Marangoni. Les perspectives de ce travail sont de réaliser des mesures mettant en jeu des flux plus importants (type incendie). D'autre part de concevoir des expériences permettant de découpler les modes de transferts pour permettre la quantification des échanges thermiques.

Références

- [1] International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), consolidated edition (2009).
- [2] Ben Jabrallah, S., Belghith, A. et Corriou, J. P. Convective heat and mass transfer with evaporation of a falling film in a cavity. *International Journal of Thermal Sciences*, (2006), 45(1):16–28.
- [3] Kabov, O. A., Scheid, B., Sharina, I. A. et Legros, J.-C. Heat transfer and rivulet structures formation in a falling thin liquid film locally heated. *International Journal of Thermal Sciences*, (2002), 41(7):664 – 672.
- [4] Buchlin, J.-M. Thermal shielding by water spray curtain. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, (2005), 18(4-6):423–432.
- [5] Wu, C.-W. et Lin, T.-H. Full-scale evaluations on heat resistance of glass panes incorporated with water film or sprinkler in a room fire. *Building and Environment*, (2007), 42(9):3277–3284.
- [6] Lev, Y. et Strachan, D. C. A study of cooling water requirements for the protection of metal surfaces against thermal radiation. *Fire Technology*, (1989), 25(3):213–229.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet MP08 « tenue au feu des composites ». Nous tenons à remercier la Région Pays de La Loire et l'Etat Français pour son soutien financier, ainsi que les partenaires qui nous ont accompagnés : Bureau Veritas, DCNS, LNE, ISMANS, STX Europe.