

Détermination du coefficient de transfert de chaleur lors du refroidissement d'une bande métallique mobile par pulvérisations d'eau

Jean-Marie BUCHLIN¹, Jean-Baptiste GOURIET¹, Mathieu DELSIPÉE¹,
Olivier PENSIS², Pietro SABLONE² et Michel RENARD²

¹ Institut von Karman de Dynamique des Fluides, Rhode-Saint-Genèse, Belgique.

² DREVER International, Angleur (Liège), Belgique.

*(auteur correspondant : buchlin@vki.ac.be)

Résumé - L'étude concerne une technique de détermination du coefficient de transfert de chaleur lors du refroidissement d'une bande mobile par pulvérisations d'eau. Une installation d'essais, prototype semi industriel SprayCooling, a été réalisée. L'évolution spatiale de la température de la bande, mesurée par thermographie infrarouge, est combinée à un modèle thermique du type feuillet mince pour en déduire la distribution du coefficient de transfert de chaleur dû aux pulvérisations liquides. Les résultats de la première campagne d'essais sont présentés. La courbe d'ébullition caractéristique du refroidissement de surface chaude par des sprays est retrouvée.

Nomenclature

C	chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
e	épaisseur, m	ε	émissivité
h	Coefficient convectif, $Wm^{-2}K^{-1}$	ϕ	flux massique, $kg.s^{-1}m^{-2}$
k	conductivité thermique, $Wm^{-1}K^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
q	densité de flux de chaleur, Wm^{-2}	<i>Indice</i>	
T	température, $^{\circ}C$	o	initial
U	vitesse de bande, $m.s^{-1}$	l	final
W	largeur de bande, m	s	spray
x	abscisse longitudinale, m		
y	abscisse transversale, m		

1. Introduction

L'innovation dans l'industrie automobile demande de développer de nouveaux aciers à haute résistance. Pour obtenir les propriétés métallurgiques et mécaniques requises, DREVER International poursuit ses recherches sur l'utilisation des batteries de trempe composées de pulvérisations et/ou brouillards d'eau. L'objectif est de réaliser des taux de refroidissements très élevés tout en contrôlant les températures initiale et finale de la bande d'acier. La technique est illustrée par le schéma repris à la figure 1

Dans le but d'optimiser la conception de ces unités de trempe l'Institut von Karman (VKI) avait développé un code d'ingénierie en collaboration avec DREVER International [1]. Le modèle numérique fait appel à une généralisation de la courbe d'ébullition propre au refroidissement de surfaces très chaudes par des sprays d'eau [2-7]. Afin d'étendre l'applicabilité de cet outil de dimensionnement à une plus grande variété de buses et d'arrangements et de déterminer les coefficients d'échange de chaleur, un projet nommé SprayCooling a été entrepris au VKI. La présente communication décrit l'installation d'essais

mise en jeu, la technique de mesure et la méthode de détermination du coefficient de transfert de chaleur produit par les pulvérisations d'eau. Des résultats caractérisant les performances de refroidissement obtenues sont ensuite présentés. Ils sont suivis d'un résumé conclusif de l'état d'avancement de l'étude et des travaux à venir.

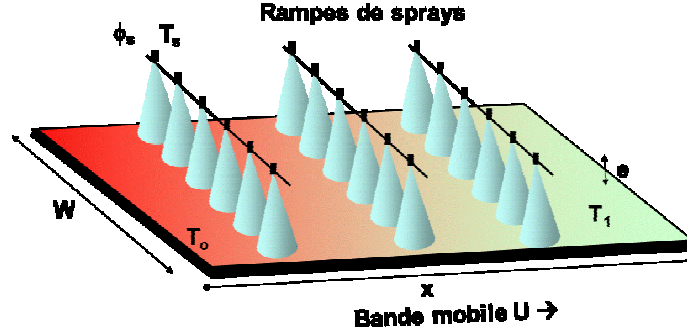


Figure 1: Schéma de principe de la trempe par pulvérisations d'eau

2. Modèle thermique

Durant son passage dans l'unité de trempe la tôle d'acier est sujette à plusieurs mécanismes thermiques. Le déplacement de la bande implique un transport par advection. La présence de gradients de température conduit à des effets de conduction. Viennent se superposer les échanges par rayonnement thermique et enfin par convection dont le plus important reste celui provoqué par les gouttelettes d'eau. D'une manière générale et en s'aidant de la figure 1, le bilan énergétique peut se formuler comme suit :

$$\rho C U e \frac{\partial T}{\partial x} = e \nabla \cdot (k \nabla T) + q_{spray} + q_{rad} \quad (1)$$

Où \$\rho\$, \$C\$, \$k\$ et \$U\$ sont respectivement la masse volumique, la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la vitesse de la bande.

Dans le cas présent nous envisageons des tôles très minces, dont l'épaisseur \$e\$ n'excède pas \$0,5\text{mm}\$. Malgré les fortes valeurs attendues du coefficient convectif des sprays, le nombre de Biot reste assez petit devant \$1\$; ceci nous permet de considérer une température quasi constante au travers de l'épaisseur de la tôle. En tenant compte de cette condition, en considérant une approche unidirectionnelle selon \$Ox\$ (profil de température uniforme selon la largeur de la bande), en négligeant la variation éventuelle des propriétés physiques avec la température et en adoptant la formulation de la radiosité, l'équation (1) devient :

$$\rho C U e \frac{dT}{dx} = ek \frac{d^2T}{dx^2} + h_s [T_s - T] + \varepsilon \sigma (T_{env}^4 - T^4) \quad (2)$$

L'équation (2) introduit le coefficient de transfert de chaleur des sprays, \$h_s\$, la température de l'environnement, \$T_{env}\$, que nous assimilerons à celle de l'eau, et l'émissivité de la tôle, \$\varepsilon\$. De plus des simulations effectuées avec le code SprayCool [1] montrent que les termes de conduction et de rayonnement thermiques sont au plus de trois ordres de grandeur plus faibles que le terme de convection. Ceci nous amène à réduire l'équation (2) à la forme finale suivante :

$$h_s = \frac{\rho C U e \frac{dT}{dx}}{[T_s - T]} \quad (3)$$

On constate que la mesure de $T(x)$ et le calcul de la dérivée locale donneront directement accès à la distribution spatiale de $h_s(x)$.

3. Installation expérimentale

Les figures 2 et 3 proposent respectivement un synoptique et une vue d'ensemble de l'installation d'essais SprayCooling, prototype semi industriel.

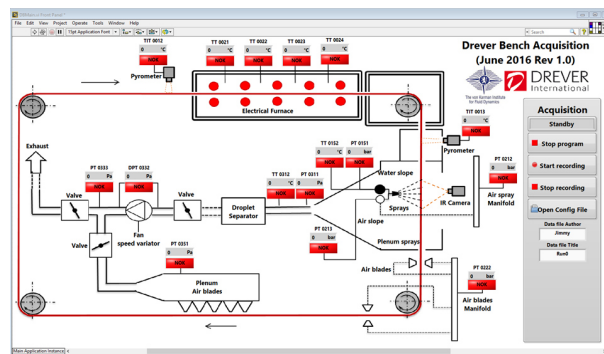


Figure 2: *Synoptique de l'installation SprayCooling*

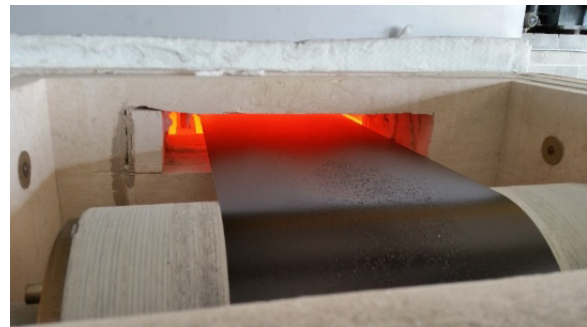


Figure 3: *Vue d'ensemble de l'installation SprayCooling.*

Une bande métallique de 0.25mm d'épaisseur et 0.33m de largeur, peinte en noir (émissivité comprise entre 0.9 et 0.97 dans la gamme spectrale 7.5-14 μm), se déplace en continu avec une vitesse constante et réglable entre 0,2m/s et 0,4 m/s . Elle est chauffée dans un four radiatif jusqu'à une température maximum de 800°C. Elle est ensuite refroidie dans une chambre de trempage composée de pulvérisations d'eau qui n'impactent qu'un seul côté de la bande comme l'indique la figure 3. La bande est séchée en aval de l'unité de trempage par des jets d'air pour retourner dans l'unité de chauffe aussi propre que possible.

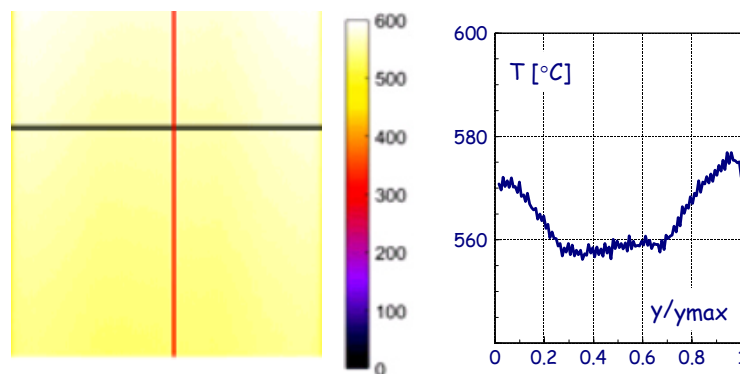
Un pyromètre bi-chromatique mesure la température de la bande en un point à l'entrée de la zone de refroidissement. Cette mesure de température permet la régulation du four de chauffe. Une caméra infrarouge scanne en permanence le coté extérieur de la bande au droit des pulvérisations d'eau. Deux caméras peuvent être utilisées, soit la ThermaCam SC3000 de FLIR Systems dont le détecteur donne une résolution de 320x240 pixels et opère dans la gamme spectrale 8-9 μ m, soit la caméra FLIR A655sc qui opère dans la gamme spectrale 7.5-14 μ m avec une fréquence de 50Hz et une résolution de 640x480 pixels.

4. Résultats illustratifs

Les campagnes d'essais ont été menées avec une unité de sprays pneumatiques produisant un brouillard d'eau. Les tuyères sont du type jet plat. Une rampe se compose de 10 buses équiréparties. La pression d'alimentation en eau est celle du réseau de distribution. Celle de l'air est respectivement de 250 kPa dans le cas d'une rampe et de 100kPa dans le cas de deux rampes en fonctionnement. La bande défile à une vitesse de 0.3m/s et la température des résistances du four est stabilisée à 900°C.

Dans une première série d'essais la caméra SC3000 est utilisée. La figure 4a montre une cartographie du champ thermique résultante d'une moyenne de 72 thermogrammes infrarouges obtenus au droit de la batterie de refroidissement sans que les pulvérisations d'eau soient mises en action. Lors de ces essais, la distance entre la caméra et la bande était de +/- 2m. La fréquence d'acquisition des thermogrammes était fixée à 1Hz.

Le but est ici de vérifier la bonne uniformité de la chauffe dans le four. La figure 4b trace le profil de température transversal (ligne horizontale sur la figure 4a). On note que la différence entre le maximum et le minimum normalisé par la valeur moyenne du profil ne dépasse pas les 4%, ce qui est très satisfaisant. Par ailleurs on constate que la partie centrale de la bande présente une parfaite uniformité. L'exploitation se fera sur la base des mesures effectuée dans cette région.



(a) Cartographie thermique

(b) Profil de température

Figure 4: Cartographie IR et profil transversal de la température (ligne en bleu).

Mesures sans spray.

La cartographie présentée à la figure 5a est obtenue après que l'action des sprays d'eau soit en régime établi. Elle résulte d'une moyenne de 60 thermogrammes. On observe que le refroidissement est transversalement uniforme et rapide. Ce refroidissement est quantifié à la figure 5b où l'on trace l'évolution longitudinale de la température de la bande (ligne verticale sur la figure 5a). Les profils de

température longitudinaux résultent d'un filtrage des mesures IR brutes effectué avec un filtre digital passe-bas à réponse impulsionnelle finie avec fenêtrage.

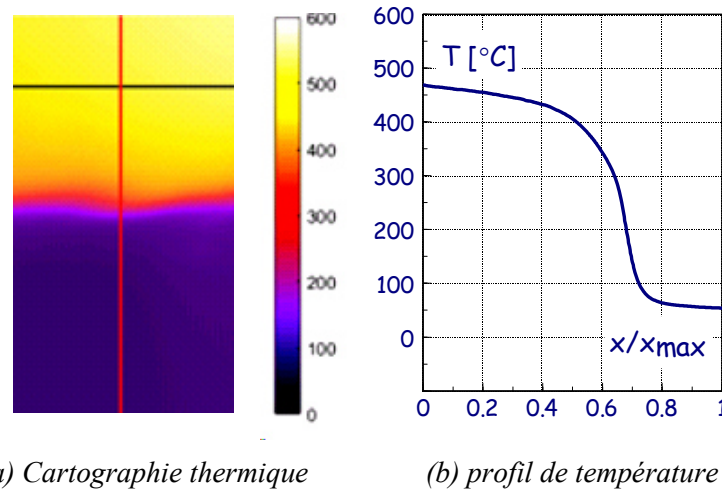


Figure 5: Cartographie IR et évolution longitudinale de la température (ligne verticale).

Mesures avec sprays.

La seconde série d'expérience est conduite en employant la caméra FLIR A655sc placée à 0,75m ce qui donne une résolution de 0,5mm/pixel. Les évolutions longitudinales du champ thermique, comme l'illustre la figure 5b, sont utilisées pour déterminer le coefficient de transfert de chaleur local, h_s , au moyen de la relation (3). Il est ainsi aisé de corrélérer la valeur de h_s au regard de celle de la température locale. Cette procédure conduit à la courbe d'ébullition telle que tracée à la figure 6. On présente sur cette figure les résultats pour deux essais conduits dans des conditions assez proches. La figure 6 caractérise le niveau de répétabilité que l'on a obtenu jusqu'à présent dans ce type d'expérience. La différence relative au pic de transfert de chaleur reste inférieure à 10% ; par contre elle avoisine les 20% vers 300°C mais où la densité de flux de chaleur devient faible. Les résultats sont aussi comparés à ceux publiés récemment par Golovko et al [8] qui ont travaillé dans les mêmes plages de température et de densité de flux de chaleur. Vu que les types de buse et conditions d'aspersion étaient légèrement différentes on peut considérer que la comparaison est satisfaisante.

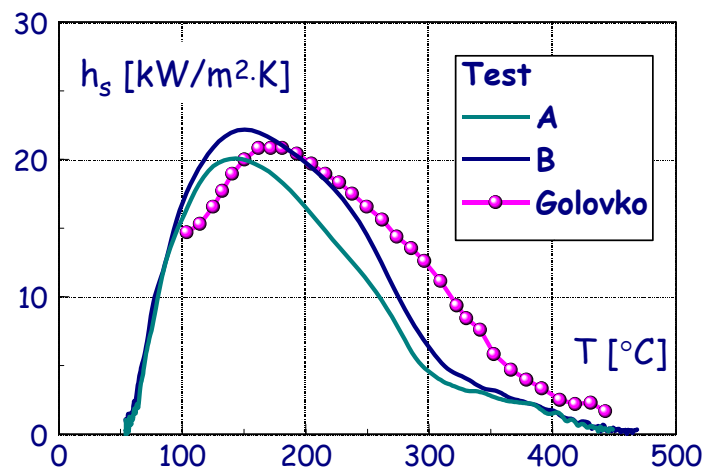


Figure 6 : Courbe d'ébullition : répétabilité des mesures.

La dernière série d'essais est effectuée pour apprécier le refroidissement produit par deux rampes de sprays identiques et successives, mais ne se chevauchant quasiment pas. La figure 7 illustre les résultats. On les compare à ceux obtenus avec une seule rampe qui est celle située plus en aval dans le cas du doublet (la deuxième). Comme attendu le refroidissement arrive plus vite dans le cas des 2 rampes. Le changement de pente observé dans l'évolution de T tracée à la figure 7a, dénote de l'effet

de la seconde rampe. La figure 7b trace l'évolution de la densité de flux de chaleur normalisée. On retrouve bien l'empreinte des deux rampes dans les échanges de chaleur. Le premier maximum prend une valeur plus importante car il se produit à une température de bande plus élevée, donc dans le régime d'ébullition à un $\Delta T = T - T_s$ plus fort que celui du second pic.

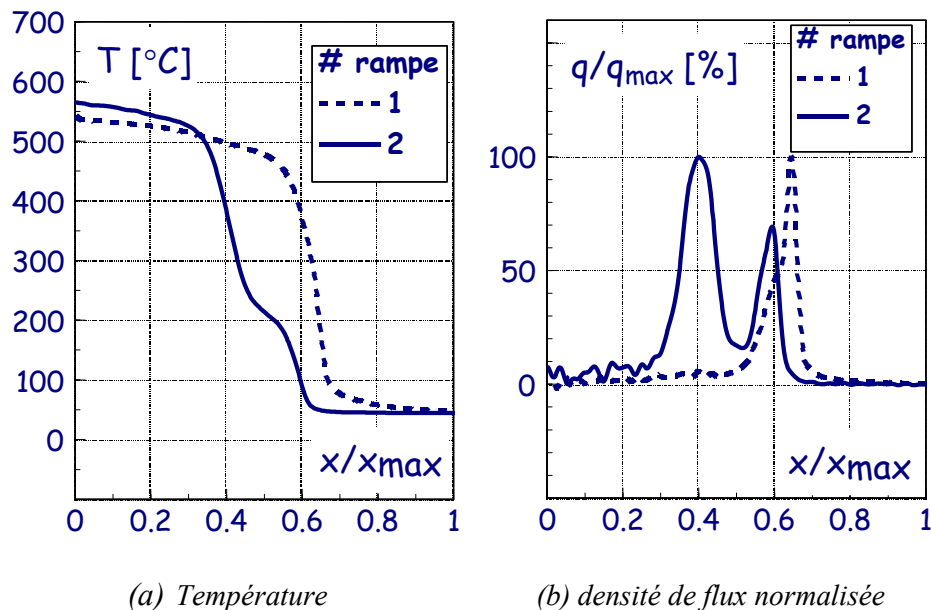


Figure 7: Effet de deux rampes de sprays

5. Conclusions

Une technique de détermination du coefficient de transfert de chaleur résultant du refroidissement d'une bande mobile par pulvérisations d'eau est présentée. Elle est appliquée sur une installation d'essais, SprayCooling, qui simule un prototype semi industriel de trempe de tôles chaudes.

L'évolution spatiale de la température de la bande mesurée par thermographie infrarouge est combinée à un modèle thermique du type feuillet mince pour en déduire la distribution du coefficient de transfert de chaleur dû aux pulvérisations liquides

La première campagne d'essais montre que la précision de mesure du champ thermique est bonne. Les résultats obtenus sont probants: la courbe d'ébullition reconstruite se compare bien avec des données publiées. L'effet de deux rampes de pulvérisation sur le mécanisme de refroidissement est exemplifié.

En tant que perspectives, ce programme de recherche se poursuit maintenant par la caractérisation de différentes configurations mettant en jeu des buses pneumatiques et à eau pressurisée de type jet plat ainsi que cône plein. L'objectif est de construire un catalogue aussi complet que possible.

Références

- [1] J.-M. Buchlin, J. Sanz and M. Renard; Modelling of spray cooling of high-temperature moving metal strips, DITICE Workshop, Bergamo, Italy -19th May 2006.
- [2] Bolle L., and Moureau J.C., 1982, Sprays cooling of hot surfaces, in Multiphase Science and Technology, Vol. 1, pp. 1-97, Hemisphere, New-York.

[3] Mitsutsuka, M. and Fukuda, K.; 1983, Cooling characteristics and heat transfer coefficients during Water-Spray Cooling of Hot Steel Plate, Tetsu-To-Hagane / Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, vol. 69, No. 2, pp. 76-81

[4] Mitsutsuka, M.; 1983, Heat Transfer Coefficients in the Surface Temperature Range of 400 to 800°C during Water Spray Cooling of Hot Steel Product, Tetsu-To-Hagane / Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 69. No. 2, pp. 82-88.

[5] Bamberger, M. and Prinz, B.; 1986, Determination of the heat transfer coefficients during water cooling of metals, Materials Science and Technology, Vol. 2, pp. 410-415.

[6] Yao S.C. and Choi K. J.; 1987, Heat transfer experiments of mono-dispersed vertically impacting sprays, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 13, No. 5, pp. 639-648.

[7] Ciofalo M., Di Piazza I. and Brucato V.; 1999, Investigation of the cooling of hot walls by liquid water sprays, International Journal of Heat and Mass Transfer, 42, pp. 1157-1175.

[8] Golovko O., Frolov I., Rodman D., Nürnberger F., Grydin O. and Schaper M.; 2014, Spray cooling of extruded EN AW-6082 aluminium alloy sheets: spatial heat transfer coefficients, Forsch Ingenieurwes, DOI 10.1007/s10010-014-0181-y, 78, pp. 131-137.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Région Wallonne (DGO6) pour le support dont ce programme de recherche bénéficie.