

Modélisation du refroidissement de tôles épaisses par pulvérisations d'eau

Jean-Marie BUCHLIN^{1*}, Javier SANZ¹, Anne GOSSET¹ et Michel RENARD²

¹ Institut von Karman de Dynamique des Fluides
Chaussée de Waterloo 72, B-1640 Rhode-Saint-Genèse, Belgium

² Drever International S.A.
Parc Scientifique du Sart-Tilman, 4030 Angleur, Belgium

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

Résumé - Une modélisation du refroidissement de bandes d'acier par pulvérisations d'eau est présentée. La méthodologie repose sur la résolution numérique de l'équation de la conduction tridimensionnelle qui régit le comportement thermique de la tôle en mouvement et sur la caractérisation expérimentale des sprays industriels. Un accent plus particulier est placé sur la formulation adimensionnelle de la courbe d'ébullition qui gouverne ce procédé de trempe. Le code d'ingénierie qui en résulte est illustré par quelques applications industrielles.

Nomenclature

C	chaleur massique, $J.kg^{-1}K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>	
E	épaisseur, m	ε	émissivité
h	coef. de transfert de chaleur, $W.m^{-2}K^{-1}$	ϕ	flux massique, $kg.s^{-1}m^{-2}$
k	conductivité, $W.m^{-1}K^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
L	longueur, m	σ	C ^{te} de Stefan-Boltzmann, $W.m^{-2}K^{-4}$
q	densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$	<i>Indices et exposants</i>	
T	température, K	a	ambient
U	vitesse, $m.s^{-1}$	b	bande d'acier
W	largeur, m	e	eau

1. Introduction

Pour posséder certaines propriétés métallurgiques et mécaniques, les bandes d'acier inoxydables subissent des procédés de recuit et de décapage après que l'unité de roulage à chaud ait produit l'épaisseur de tôle désirée. Pour ce faire la bande est chauffée à une température aussi élevée que 1150°C pour être refroidie par étapes successives jusqu'aux conditions ambiantes.

La méthode de refroidissement traditionnelle se base sur une combinaison séquentielle de système à jets d'air, de brouillards et de sprays d'eau. Avec la demande croissante des taux de production, les batteries à pulvérisations d'eau tendent à remplacer les autres techniques de trempe.

Cette technique consiste à faire passer la bande au travers d'une série d'unités de refroidissement constituées par des rampes de sprays d'eau placées de part et d'autre (haut et bas) de la tôle en mouvement. L'article décrit un outil d'ingénierie qui permet le dimensionnement et l'optimisation de tels systèmes de refroidissement.

La méthodologie suivie combine à la fois la simulation numérique du comportement thermique de la bande d'acier et la caractérisation expérimentale des pulvérisations d'eau généralement installées sur les lignes industrielles.

2. Modélisation

La figure 1 propose un schéma de principe d'une unité de refroidissement par sprays. Elle précise aussi les principaux paramètres d'entrée du modèle. Une unité de trempe de longueur L , asperge par-dessus et dessous une bande mobile de largeur W et d'épaisseur e , qui se déplace à la vitesse U . La tôle entre avec une température $T_{b,0}$ et sort avec une température $T_{b,1}$. Les buses de pulvérisations sont disposées sur les deux faces de la bande suivant un arrangement régulier ou en quinconce. Les propriétés pertinentes de la bande sont la masse volumique ρ_b , la conductivité thermique k_b et la chaleur spécifique C_b du métal; ces deux derniers paramètres dépendent de la température. L'état de surface de la bande est caractérisé par l'émissivité ε . L'eau est pulvérisée à la température T_e sous un flux massique ϕ_e . L'ambiance est à la température constante T_a .

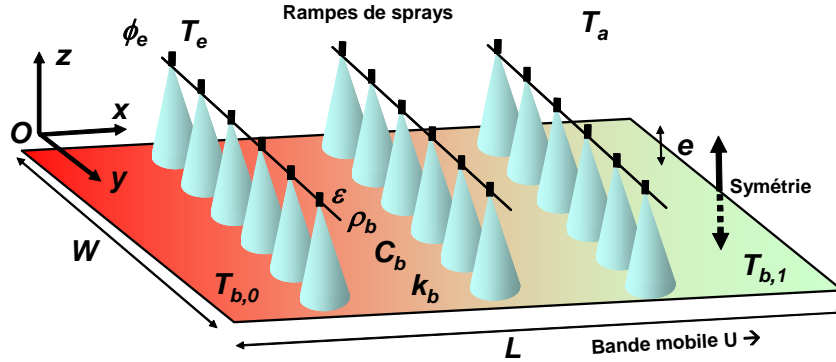


Figure 1 : Schéma d'une unité de trempe par pulvérisations d'eau

Le champ de température dans la bande métallique est décrit par l'équation classique de la thermocinétique :

$$\rho_b C_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = \rho_b C_b U \frac{\partial T_b}{\partial x} = \nabla \cdot (k_b \nabla T_b) \quad (1)$$

Le modèle mathématique se complète par les conditions aux limites suivantes :

- Condition de symétrie: $\left. \frac{\partial T_b}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$ (2)

- Condition aux rives: $-k_b \left. \frac{\partial T_b}{\partial y} \right|_{y=\frac{W}{2}} = q_{rive}$ (3)

- Conditions de surface: $-k_b \left. \frac{\partial T_b}{\partial z} \right|_{z=\frac{e}{2}} = q_{gaz} + q_{ray} + q_{spray}$ (4)

Les pertes de chaleur aux rives sont modélisées par un coefficient convectif basé sur la température de l'eau: $q_{rive} = h_w(T_b - T_e)$. Par contre, dans les zones éventuellement non recouvertes par un film d'eau, l'évacuation de chaleur s'effectue par convection gazeuse, $q_{gaz} = h_{gaz}(T - T_a)$ et par rayonnement thermique avec l'environnement à la température ambiante, $q_{ray} = \varepsilon \sigma (T_b^4 - T_a^4)$.

La contribution principale au refroidissement de la bande est de loin l'action des pulvérisations d'eau. La modélisation de la densité de flux de chaleur q_{spray} prend en compte les différents régimes d'ébullition qui dépendent essentiellement de la température de bande et du flux massique d'eau locaux [1-7]. Sous la température de saturation ($T_{sat} \sim 100^\circ\text{C}$ à la pression atmosphérique), le transfert de chaleur entre la tôle et l'eau se fait en simple phase. L'ébullition nucléée démarre dès que T_b excède de quelques degrés T_{sat} . Dans ce régime des bulles de vapeur se forment sur la surface chaude avec laquelle le liquide reste encore bien en contact; le taux de

refroidissement augmente rapidement avec la surchauffe $\Delta T_s = T_b - T_{sat}$, jusqu'au flux critique q_c atteint pour des températures de bande généralement comprises entre $T_c \sim 120^\circ\text{C}$ à 160°C pour l'acier inox car la valeur de ce maximum dépend du matériau solide. Si la température de bande est supérieure à T_c , la formation de bulles de vapeur devient si importante que le film liquide ne persiste que par intermittence sur la tôle. Apparaît alors la crise d'ébullition qui marque la transition de l'ébullition nucléée vers l'ébullition en film où la surface chauffante est alors recouverte par un matelas de vapeur quasi continu séparant la bande du liquide. Ce phénomène de caléfaction devient pleinement développé quand la température de la tôle dépasse un niveau de température dit de Leidenfrost. La présence de la couche de vapeur introduit une forte résistance thermique qui se concrétise par une diminution significative de l'évacuation de chaleur.

L'ensemble de ces mécanismes se représente au travers d'une courbe d'ébullition qui s'exprime de façon compacte par au moyen des variables adimensionnelles suivantes :

$$\hat{T} = \frac{T_b - T_e}{T_c - T_e} \quad \text{et} \quad \hat{q} = \frac{q_{\text{spray}}}{q_c} \quad (5)$$

A l'aide des ces définitions, les données expérimentales appropriées à l'application envisagée et relevées dans la littérature [1-7] se regroupent bien sur une seule et même courbe comme le montre la figure 2 qui souligne par ailleurs qu'un lissage analytique adéquat permet de déduire facilement une corrélation couvrant les quatre régimes possibles

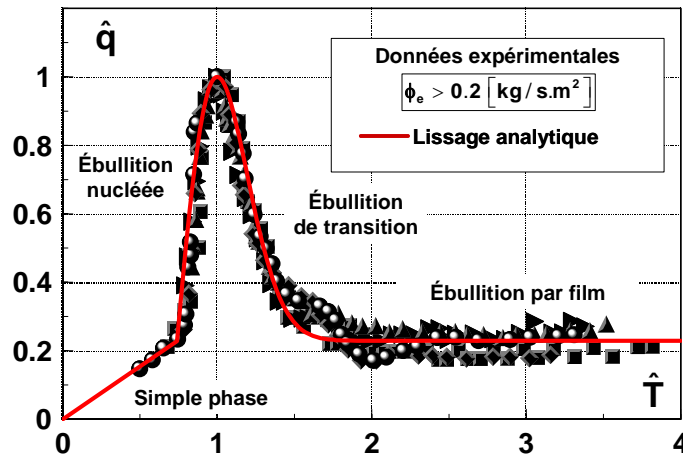


Figure 2 : Courbe d'ébullition pour des pulvérisations d'eau.

La distribution du flux massique à l'impact de la pulvérisation sur la bande doit être aussi modélisée. Elle dépend fortement du type de buse utilisée (sprays à cône plein, cône creux ou à jet plat). Elle est tout d'abord déterminée sur l'installation Water-Spray de l'IVK. Ce banc d'essais permet de tester des pulvérisateurs pressurisés jusqu'à des débits de $1 \ell/s$ sous 1000 kPa. Il est équipé avec un anémomètre à phase Doppler pour les mesures de vitesse et de taille des gouttelettes et possède un plateau d'éprouvettes calibrées pour la détermination de la cartographie du débit d'eau comme le montre la figure 3a. Par ailleurs, la distribution de flux massique est mathématiquement décrite par l'expression suivante :

$$\phi_e = \phi_{e0} \sum_i \left[\prod_j C_{i,j} e^{-\left(\frac{x-x_0-x_e}{\delta_{xj}}\right)^2} e^{-\left(\frac{x-y_0-y_e}{\delta_{yj}}\right)^2} \right] \quad (6)$$

La formulation (6) prend en compte au travers des coefficients $C_{i,j}$ et des facteurs d'étalement δ_{xj} et δ_{yj} , les effets de la distance d'élévation et des différents angles de positionnement des buses. A titre d'exemple la figure 3b fournit une comparaison entre une mesure et la modélisation du flux massique pour le cas d'un spray à cône creux.

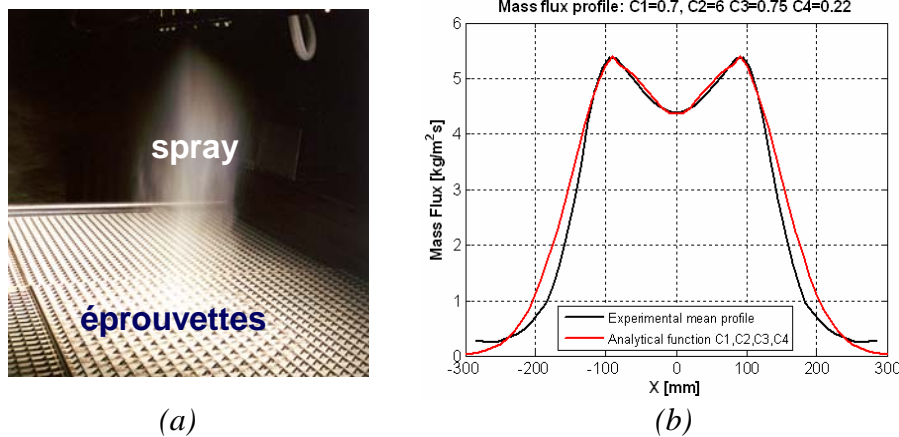


Figure 3 : Montage pour la cartographie du flux massique et résultat typique.

Le modèle final est donc une équation non linéaire tridimensionnelle résolue numériquement par la méthode des différences finies (vu la simplicité géométrique du domaine considéré) avec application des conditions aux limites qui précisent le problème industriel à traiter. Le code d'ingénierie qui en résulte est muni d'une interface graphique d'utilisateur qui permet d'afficher l'arrangement des buses, les répartitions du flux massique, du coefficient de transfert de chaleur et les champs de température à différentes profondeurs dans la tôle. Le code possède aussi un module d'optimisation qui permet d'itérer sur la pression d'eau pour obtenir la température cible à la sortie de l'unité de refroidissement [8].

3. Applications

Dans une première application illustrative, l'unité de trempe par pulvérisations d'eau doit garantir une chute de température de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec une tolérance de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur une longueur de 13 m. La bande d'acier possède une épaisseur de 10mm, une largeur de 2m et se déplace à la vitesse de 40m/min. L'arrangement des buses résultant est présenté à la figure 4a. Il se compose de 114 pulvérisateurs à cône plein de 4,8mm d'orifice, disposés en quinconce sur 12 rampes et inclinés de 20° vers l'aval. La pression relative d'opération est ajustée alternativement à 300kPa et 350kPa suivant la rampe. Pour assurer un refroidissement le plus uniforme possible aux rives, on place des buses au-delà de la bande.

La figure 4b indique que l'arrosage ainsi obtenu se caractérise par une configuration en rideaux d'eau bien uniformes sur la largeur de la bande. La figure 5a trace la distribution axiale du coefficient de transfert de chaleur pour trois coordonnées latérales. On retrouve l'empreinte d'un arrosage régulier suivant la largeur et cyclique suivant la longueur de la tôle.

L'élévation notable du transfert de chaleur entre 5m et 8m signale le passage aux conditions critiques ce qui se traduit par un changement de gradient de température remarquable dans cette région comme le montre la figure 5b où est tracé le profil axial de température de bande pour trois profondeurs.

On note que la température cible est atteinte (moyenne de $125,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec une déviation de $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) et que logiquement les plus grandes variations axiales s'observent à la surface de la tôle.

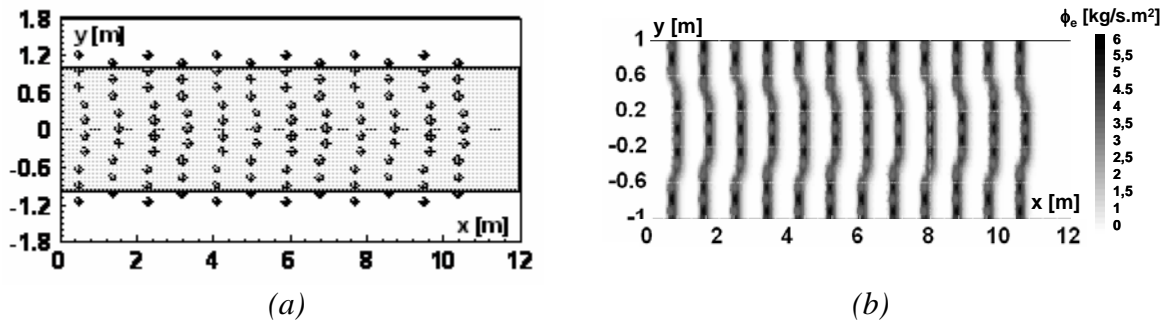


Figure 4 : Arrangement des buses (a) et cartographie du flux massique (b).

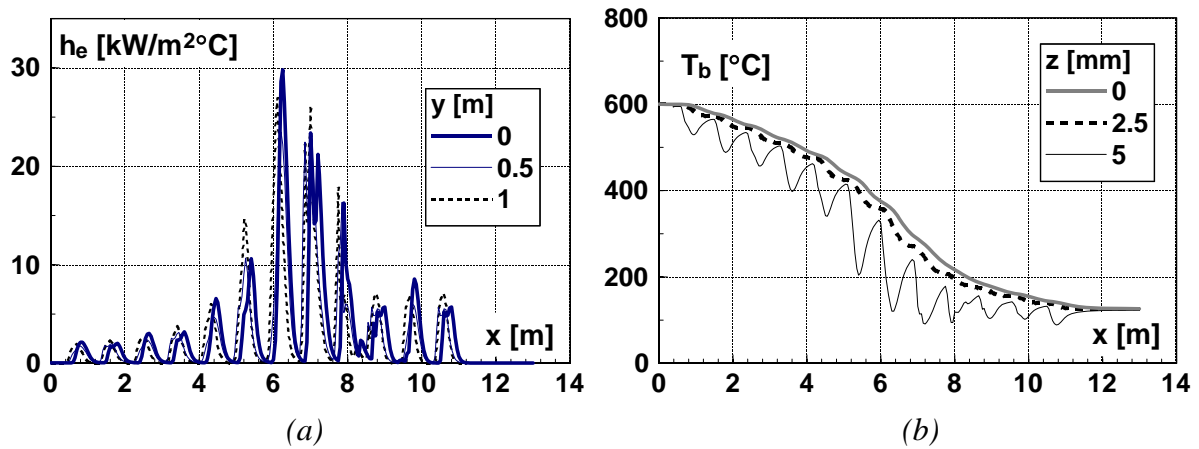


Figure 5 : Distribution axiale du transfert de chaleur (a) et de la température de bande (b)

La deuxième application concerne un traitement thermique spécifique à l'obtention de plaques d'acier à haute dureté et de très forte épaisseur. Après complète homogénéisation et austénitisation du métal à haute température un refroidissement intensif est requis pour favoriser la formation de microstructures de martensite. La plaque est alors soumise à une aspersion soutenue produite par des buses à fente formant de puissants rideaux d'eau. Cette unité de trempe de haute intensité doit garantir et un refroidissement uniforme sur la largeur de la bande et l'obtention de la température cible prescrite en sortie d'arrosage. Afin de traiter une plaque au carbone-manganèse de 50mm d'épaisseur chauffée à 900 °C , l'unité de refroidissement est constituée de 26 rampes d'arrosage réparties sur une longueur de 20m comme le montre la figure 6. La pression des buses est réglée entre 200 kPa et 400kPa selon la rampe. L'eau est à la température de 29 °C .

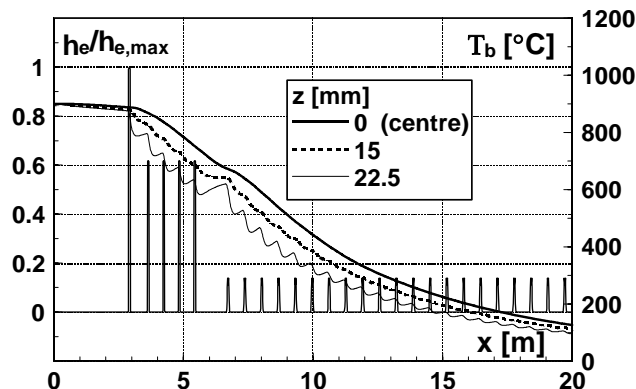


Figure 6 : Résultats thermiques relatifs .

La répartition du coefficient de transfert de chaleur adimensionnel est tracée à la figure 6. Elle précise que le dimensionnement de l'unité de trempe concentre le gros de l'arrosage entre 3m et 6m après l'entrée.

La même figure reporte la chute axiale de température prédite à trois profondeurs dans la plaque. Elle indique que la perturbation thermique due à la variation spatiale du refroidissement de surface ne se fait plus sentir au-delà de 10mm de profondeur. La température moyenne en sortie est de 111,5°C avec un écart type de 15°C dans l'épaisseur.

4. Conclusion

Une modélisation de trempe de bandes d'acier mobiles par pulvérisations d'eau est décrite. Elle repose sur l'équation thermocinétique tridimensionnelle complétée par un ensemble de conditions aux limites qui précisent le problème industriel à traiter. Le tout est résolu numériquement par une méthode aux différences finies.

Le point clef du modèle est la formulation adimensionnelle de la courbe d'ébullition qui permet de généraliser une corrélation de transfert de chaleur pour les différents régimes rencontrés au cours de la trempe. La caractérisation expérimentale des pulvérisations de type industriel conduit à la modélisation de la cartographie du flux massique d'eau à l'impact sur la tôle.

Quelques applications industrielles illustrent l'applicabilité de l'outil d'ingénierie qui en résulte.

Références

- [1] K. Sasaki, Y. Sugitani and M. Kawasaki, Heat transfer in spray cooling on hot surface, *Tetsu-To-Hagane / Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 65-1 (1979), 90-96.
- [2] L. Bolle and J.C. Moureau, *Spray cooling of hot surfaces*, Multiphase Science and Technology, 1, 1-97, Hemisphere, New-York (1982).
- [3] M. Mitsutsuka and K. Fukuda, 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*, 69-2 (1983), 76-81.
- [4] M. Mitsutsuka, 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*, 69-2 (1983), 82-88.
- [5] M. Bamberger and B. Prinz, Determination of the heat transfer coefficients during water cooling of metals, *Materials Science and Technology*, 2 (1986), 410-415.
- [6] S.C. Yao and K.J. Choi, J., Heat transfer experiments of mono-dispersed vertically impacting sprays, *Int. J. Multiphase Flow*, 13-5 (1987), 639-648.
- [7] M. Ciofalo, I. Di Piazza and V. Brucato, Investigation of the cooling of hot walls by liquid water sprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42 (1999), 1157-1175.
- [8] J.-M. Buchlin, J. Sanz and M. Renard, Modelling of spray cooling of high-temperature moving metal Strips, (2006) *Workshop DITICE*, Bergamo, Italy.

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants à la Région Wallonne pour le support reçu dans le cadre de la subvention "RETECH" (Grant n°4853 - Phasing out Objectif 2).