

Propagation d'un front de trempe dans le cas d'une émulsion eau-huile.

Michel Gradeck^{1*}, Michel Lebouché¹, Jules Ouattara¹, Denis Maillet¹, Pascal Gardin²

¹LEMETA Nancy Université CNRS, 54500 Vandoeuvre les Nancy

²ARECELOR MITTAL Research, Maizières les Metz

*michel.gradeck@ensem.inpl-nancy.fr

Résumé - L'eau utilisée pour les systèmes de refroidissement en laminage à chaud peut être polluée par de l'huile utilisée pour lubrifier les cylindres du laminoir. Savoir comment va évoluer la cinétique de refroidissement des bandes d'acier lorsque l'eau de refroidissement est polluée est un enjeu important. Dans cette étude, des essais de trempes d'un disque de métal chaud avec des jets d'eau pure ou d'émulsion d'huile dans de l'eau sont analysés. L'objectif de cette étude est de comparer l'efficacité de refroidissement des émulsions avec celle obtenue pour un jet d'eau pure et plus précisément d'analyser l'influence de la mouillabilité sur les régimes d'ébullition. La température initiale du métal étant supérieure à la température de Leidenfrost, on observe ainsi tous les régimes d'ébullition. Le flux de chaleur transitoire est estimé à l'aide d'une méthode de conduction inverse.

Nomenclature

D	diamètre, m	n	numéro d'harmonique
e	épaisseur, m	p	paroi
h	coefficient convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$		
J_n	fonction de Bessel d'ordre n		
p	variable de Laplace		
r	rayon, m		
T	température, $^{\circ}C$		
t	temps, s		
			Symboles grecs
		α	valeur propre
		φ	flux, W
		λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
		θ	vecteur température modifié
		σ	tension superficielle, $N.m^{-1}$

Indices et symboles

AR	relatif à la face arrière
AV	relatif à la face avant
\tilde{g}	transformée de Hankel de la fonction g
\bar{g}	transformée de Laplace de la fonction g

1. Introduction

Dans le cas du laminage à chaud, les propriétés mécaniques des alliages d'acier sont conditionnées par le refroidissement que subit la bande en fin de laminage. Le contrôle de la vitesse de refroidissement et son homogénéité sont donc d'une importance primordiale pour obtenir les aciers souhaités. Le refroidissement est généralement assuré par la trempe de la bande à chaud se déplaçant sous de nombreux jets d'eau sous-refroidis. Selon la qualité souhaitée, la vitesse de refroidissement doit varier entre 15 K/s et 1000 K/s. Bien évidemment, de telles vitesses de refroidissement sont obtenues en raison de la vaporisation partielle du jet. Ainsi, le flux de chaleur dépend de la nature du régime d'ébullition : film vapeur, ébullition de transition, flux critique et ébullition nucléée. Habituellement, les études sur la trempe se concentrent uniquement sur des expériences de jet d'eau « pure » sans prendre en compte les conditions industrielles qui peuvent être éloignées des études académiques. Étant donné que l'eau utilisée pour le refroidissement lors du processus de laminage peut être polluée par les huiles de laminage (en bande laminoir à chaud, de l'huile est utilisée pour

lubrifier les rouleaux et une partie de celle-ci peut polluer l'eau), il est important de savoir quels sont les effets de la nature du fluide de refroidissement sur l'ébullition et donc sur les flux de refroidissement.

2. Installation expérimentale et moyens de mesures

L'expérience mise en place pour estimer les flux extraits par ébullition convective d'un jet impactant une plaque chaude est schématiquement représentée figure 1. Le disque de métal (5) est posé sur une pièce annulaire en quartz (6) qui l'isole thermiquement de la base en aluminium. Le disque (5) est chauffé à une température de l'ordre de 500-600 °C par un dispositif électromagnétique (1, 2, 3, 4). Lorsque la température de la pièce (5) a atteint le niveau requis, le chauffage par induction est stoppé ; cette pièce est trempée par un jet d'eau axisymétrique (ou d'émulsion d'huile) (13). Le disque (5) est en nickel ($D=175$ mm et $e=5$ mm). La buse du jet ($d=9$ mm) est située à une distance de 250mm de la surface à refroidir.

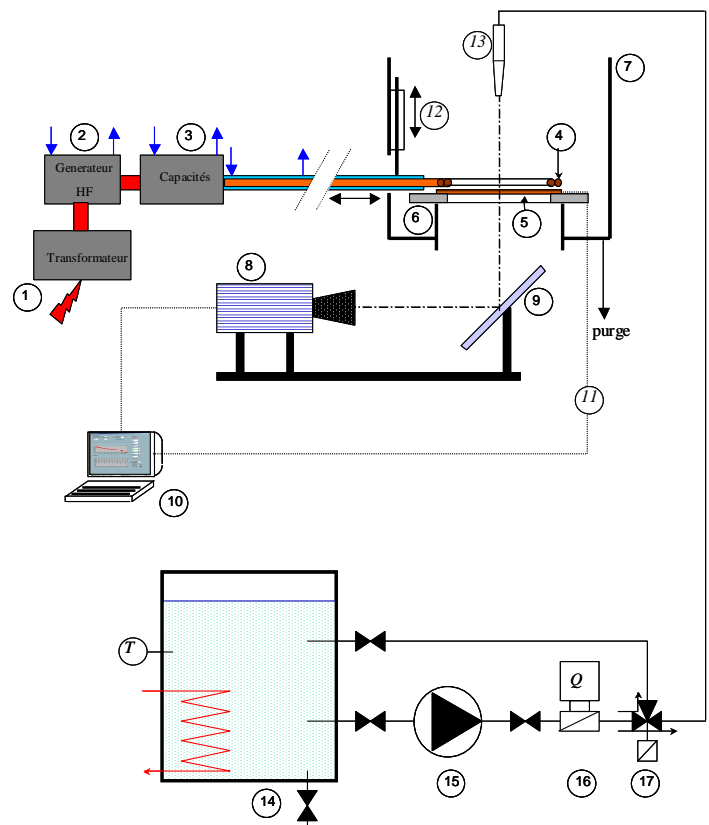


Figure 1. Boucle expérimentale et moyens de mesure

1, 2, 3 et 4-inducteur, 5-disque, 6-anneau en quartz, 7-chambre d'expérience, 8-caméra IR, 9-miroir, 10-système d'acquisition, 11-thermocouple, 12-trappe, 13-buse, 14-réservoir, 15-pompe, 16-débitmètre, 17-vanne.

La température est mesurée sur la face opposée au jet au moyen d'une caméra IR matricielle *Cedip Jade III* (8). Les images sont enregistrées à une fréquence de 6 Hz avec une résolution de 320x240 pixels. De plus amples détails sur l'installation sont données dans [1].

3. Estimation du flux par méthode inverse

On considère un problème axisymétrique ; une solution analytique de l'équation de la chaleur peut être obtenue en se plaçant dans les espaces transformés de Laplace-Hankel (cf.

[1]). On peut montrer que la double transformée de la température en face arrière ($z = e$) s'exprime linéairement en fonction de la transformée du flux en face avant ($z = 0$ et lieu des transferts par ébullition) :

$$\tilde{T}_n = \tilde{Z}_n(p) \tilde{q}_n \quad (2)$$

où

$$\tilde{Z}(p) = \frac{1}{((h_{SUP}^{EQ} + h_{INF}^{EQ}) \cosh(e\sqrt{p/a}) + \frac{h_{SUP}^{EQ} h_{INF}^{EQ}}{\lambda \sqrt{p/a}} \sinh(e\sqrt{p/a}) + \lambda(\sqrt{p/a}) \sinh(e\sqrt{p/a}))} \frac{1}{p}$$

L'impédance ci-dessus suppose a priori la connaissance des coefficients de convection sur les faces avant et arrière (corrélations de la littérature) et la connaissance de l'émissivité du matériau (obtenue par étalonnage). L'inversion de Laplace de l'équation (2) fait apparaître un produit de convolution :

$$\tilde{T}_n(t) = \int_0^t e^{-a\alpha_n^2(t-t')} \tilde{Z}_n(t-t') \tilde{q}_n(t') dt' \quad (3)$$

Finalement, le champ de température dans l'espace réel est obtenu par une inversion de Hankel :

$$T(r, e, t) = \frac{2}{R^2} \sum_{n=0}^{\infty} \tilde{T}_n(e, t) \frac{J_0(\alpha_n r)}{J_0^2(\alpha_n R)} \quad (4)$$

L'expression intégrale de l'équation (3) peut être approchée par :

$$\tilde{T}_n(t_k) = \sum_{l=1}^k e^{-a\alpha_n^2(k-l)\Delta t} \tilde{Z}_n(k-l) \tilde{q}_l^n(t_l) \Delta t \quad (5)$$

où Δt représente le pas de temps de la caméra ou un multiple avec $t_k = k \Delta t$, $t_l = l \Delta t$.

L'équation (4), qui est tronquée à un nombre fini d'harmoniques n_{\max} , peut être écrite sous forme matricielle de l'équation (5) :

$$\tilde{\theta}_n = \begin{bmatrix} \tilde{T}_n(t_1) \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{T}_n(t_{k_{\max}}) \end{bmatrix} = \mathbf{S}_k^n \tilde{\mathbf{q}}_n = \begin{bmatrix} S_{11}^n & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ S_{k_{\max}1}^n & \cdot & \cdot & S_{k_{\max}k_{\max}}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{q}_1^n \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{q}_{k_{\max}}^n \end{bmatrix} \quad (6)$$

Finalement, l'harmonique $\tilde{q}_n(t_k)$ du flux peut être estimé par une méthode des moindres carrés ordinaires:

$$\hat{\tilde{q}}_n = (S_n^t S_n)^{-1} S_n^t \hat{\tilde{\theta}}_n \quad (7)$$

Le flux peut enfin être reconstitué dans l'espace réel par une inversion de Hankel :

$$q(r_i, t_k) = \frac{2}{R^2} \sum_{n=0}^{n_{\max}} \frac{J_0(\alpha_n r_i)}{J_0^2(\alpha_n R)} \hat{\tilde{q}}_n(t_k) \quad (8)$$

La précision des flux estimés dépend du niveau de bruit des thermogrammes mesurés ainsi que de la qualité du modèle (il doit décrire au mieux l'expérience à modéliser) du choix des

hyperparamètres du modèle inverse. Toutes les subtilités du modèle direct et de la méthode inverse sont détaillées dans Ouattara et al. [2].

4. Résultats expérimentaux

Les expériences que nous avons réalisées ont pour but de comparer l'efficacité des refroidissements par jet d'eau et émulsion d'huile dans l'eau. Comment définir l'efficacité du refroidissement ? On peut définir plusieurs critères objectifs : le flux maximal, la vitesse du front de trempe (ou front de mouillage). Nous présentons dans le tableau 5.1, la viscosité et la tension de surface à 20°C. Cette tension superficielle a été mesurée à l'aide d'un tensiomètre par arrachement.

Propriétés	Eau	Huile	Emulsion 1%	Emulsion 2%
μ (Pa.s)	10^{-3}	0.115	$1.027 \cdot 10^{-3}$	$1.054 \cdot 10^{-3}$
σ (10^{-3}Nm^{-1})	72	30.5	32.4	32.3

Tableau 1. Viscosité dynamique et tension superficielle à 20°C et 1 bar.

Les essais que nous avons réalisés sont des essais de trempe. A ce titre, ces expériences sont proches de celles réalisées par Woodfield et al. [3], Islam et al. [4] et Mozumder et al. [5]. Ces publications portaient sur la trempe de blocs de différents métaux et leur approche consistait à estimer le flux de chaleur à partir des températures internes à l'aide d'une méthode inverse développée par Monde et al. [6] et ensuite, de déterminer la vitesse du front de mouillage.

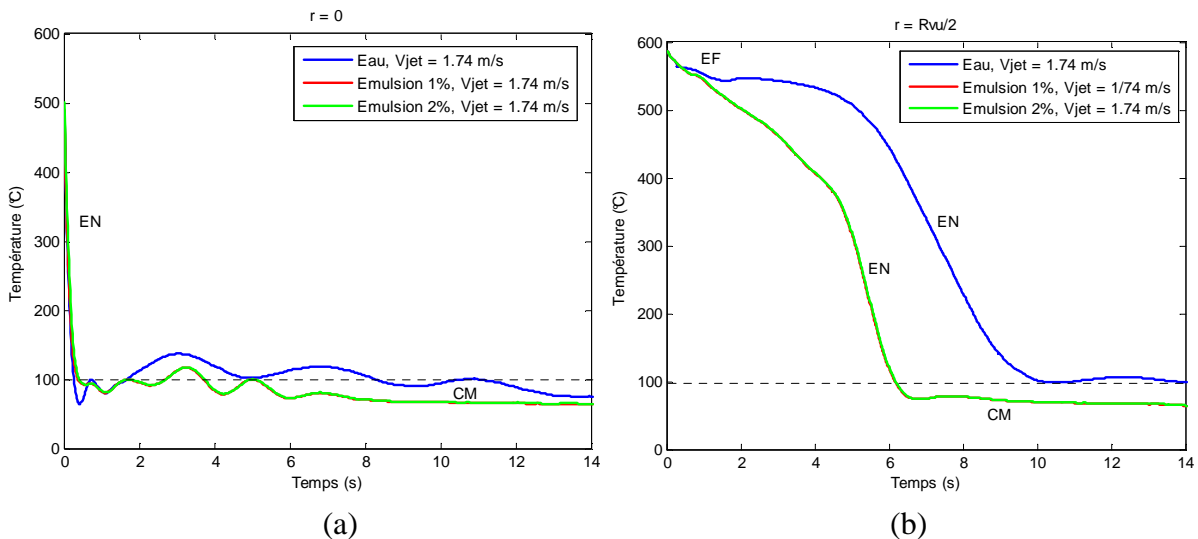


Figure 2. Evolution temporelle de la température dans le cas d'une trempe pour $r=0$ et $r=Rvu/2$ - $V_{jet} = 1,74 \text{m/s}$, $T_{jet} = 20^\circ \text{C}$

Sur la figure 2, les évolutions temporelles de la température montrent que le refroidissement est brutal à l'impact (figure 2a) et que coexistent plusieurs régimes au même instant: une zone de convection forcée (CM) à basses températures, une zone d'ébullition nucléée (EN) où la température évolue rapidement, une zone de caléfaction (EF) où la température est élevée et évolue de manière plus douce. Dans le régime d'ébullition en film (figure 2b), on observe que la cinétique de refroidissement n'est pas la même que pour l'eau. A $t=0$, le maximum du flux (MHF) est mesuré à l'impact ($r=0$) (figure 3) ; cette zone se

retrouve rapidement dans le régime de convection forcée liquide. Le maximum de flux (MHF) est ensuite convecté vers l'extérieur par la progression du front de mouillage.

Dans le cas des émulsions, il y a deux phases distinctes, l'une étant dispersée sous forme de gouttelettes dont le diamètre dépend de la qualité du mélange (énergie utilisée pour disperser la suspension liquide). Toutefois, l'un des deux liquides est toujours plus volatile que l'autre (dans notre cas, l'eau), et donc son changement de phase se fera en priorité. Les huiles sont connues pour avoir un point d'ébullition plus élevé que l'eau (près de 250 °C à pression atmosphérique). De plus, la « tension superficielle¹ » du mélange est modifiée car l'huile de lubrification comporte des agents tensioactifs ; on sait que, si les conditions de tension de surface sont modifiées, cela a des conséquences notoires sur la nucléation : Une baisse de la tension superficielle va engendrer une augmentation du nombre de sites de nucléation par la diminution du rayon critique. Si la cinétique de croissance ne semble pas dépendre de la tension superficielle (elle dépend essentiellement du nombre de Jakob), le diamètre au détachement sera plus faible car les forces capillaires contribuent à maintenir la bulle attachée à la paroi. La conséquence de la diminution du diamètre de détachement est l'augmentation de la fréquence de bulle. En régime d'ébullition nucléée, le transfert de chaleur est donc amélioré par l'augmentation des effets de microconvection. La cinétique du refroidissement s'en trouve donc affectée par la présence (même en petite quantité) de gouttes d'huile et on observe une modification des transferts de chaleur lors de l'ébullition.

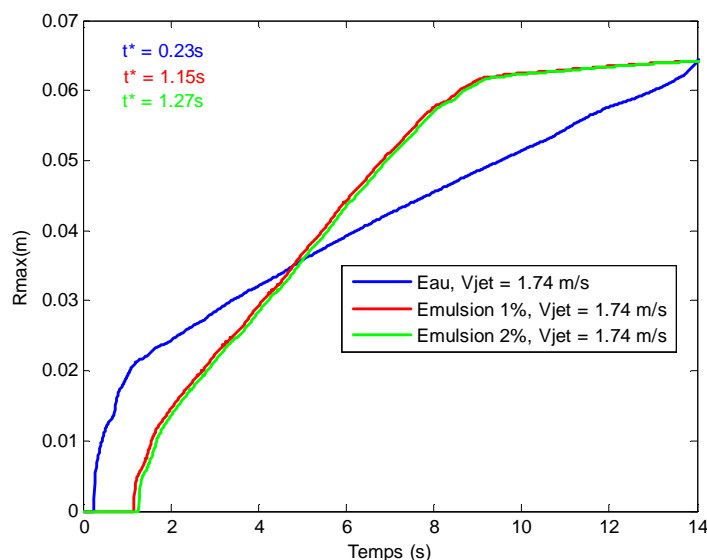


Figure 3. Position du MHF en fonction du temps pour l'eau et les émulsions.

Sur la figure 3, on remarque que le front de mouillage ne commence pas à se déplacer dès l'instant initial. Comme l'ont observé Hammad et al. [7], il est nécessaire que la température à l'impact soit inférieure à 170°C pour que le front de mouillage commence à progresser (pour de l'eau). Dans le cas des émulsions, on remarque que même si la température est inférieure à ce seuil, le front de mouillage ne progresse pas tout de suite. Mozumder et al. [8] parlent d'un retard à la propagation du front. Ce retard dépend de la vitesse du jet, de la température initiale du solide, du sous-refroidissement et de la température de saturation du liquide. Cependant, un aspect fondamental a été oublié dans l'étude citée précédemment : la mouillabilité du fluide. En effet, nos essais sont réalisés à faible concentration en huile et les conséquences sur la saturation, la chaleur massique du mélange peuvent être considérées

¹ La mesure de la tension de surface pour une émulsion n'a pas de sens physique car on mesure toujours la tension de surface du fluide le plus mouillant

comme faibles. Le seul paramètre variant de façon radical entre l'eau et les émulsions est bien la tension superficielle dont l'aspect n'a pas été pris en compte par Mozumder et al. [8]. En revanche, la vitesse de propagation du front est bien supérieure dans le cas des émulsions : le flux en régime de caléfaction est plus élevé (cf figure 2b) favorisant un meilleur refroidissement de la zone non mouillée et la micro convection dans la zone d'ébullition favorise également une amélioration du transfert de chaleur. La combinaison de ces deux phénomènes conduit à un déplacement plus rapide du front de mouillage dans le cas des émulsions.

5. Conclusion

Dans cette étude, le refroidissement transitoire d'un disque de métal a été étudié lors de sa trempe par un jet axisymétrique d'eau ou d'émulsion d'huile sous-refroidie. L'objectif était de comparer l'efficacité de refroidissement des émulsions avec celle obtenue pour un jet d'eau pure. La température initiale du métal est supérieure à la température de Leidenfrost afin de pouvoir observer tous les régimes d'ébullition. On constate une augmentation nette de la vitesse du front de trempe due à la diminution de la mouillabilité dans le cas des émulsions. Dans la gamme de concentration testée, l'augmentation de la concentration en huile ne semble pas avoir d'influence notable sur l'ébullition mais on peut supposer qu'une singularité serait observée à des concentrations plus importantes.

Références

- [1] A. Ouattara, Etude du refroidissement diphasique par jet impactant d'une surface chauffée à haute température par induction électromagnétique : Influence de la composition du fluide sur le flux extrait, *Thèse de doctorat, Nancy Université*, 2009.
- [2] A. Ouattara, M. Gradeck, D. Maillet, B. Remy, M. Lebouché, Solution of IHCP Estimation of a nonuniform source using an inverse heat conduction method based on an analytical solution (2008) *Eurotherm, Eindhoven (Netherlands)*
- [3] PL Woodfield, AK Mozumder, M Monde, On the size of the boiling region in jet impingement quenching, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2009) V. 52, Issues 1-2, 460-465
- [4] Md. A. Islam, M. Monde, P.L Woodfield, Y Mitsutake, Jet impingement quenching phenomena for hot surfaces well above the limiting temperature for solid-liquid contact, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2008) Volume 51, 1226-1237
- [5] AK Mozumder, M Monde, PL Woodfield, Md. A Islam, Maximum heat flux in relation to quenching of a high temperature surface with liquid jet impingement, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2006) Volume 49, Issues 17-18, 2877-2888
- [6] M. Monde, H. Arima, W. Liu, Y. Mitsutake and J.A. Hammad, An analytical solution for two-dimensional inverse heat conduction problems using Laplace transform, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2003) Volume 46, 2135-2148.
- [7] J. Hammad, Y. Mitsutake, M. Monde, Movement of maximum heat flux and wetting front during quenching of hot cylindrical block, *Int. J. of Thermal Sciences* 43 (2004) 743-752
- [8] A.K Mozumder, M. Monde, P.L Woodfield, Delay of wetting propagation during jet impingement quenching for a high temperature surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2005) 48, 5395-5407