

# Comparaison du refroidissement de surfaces à hautes températures en utilisant des sprays et jet liquide dans des conditions semi-industrielles

Alexandre LABERGUE<sup>1\*</sup>, Michel GRADECK<sup>1\*</sup>, Fabrice LEMOINE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine – LEMTA, UMR 7563

2, avenue de la forêt de Haye – TSA 60604 – 54104 Vandoeuvre lès Nancy

\* (auteur correspondant : [alexandre.labergue@univ-lorraine.fr](mailto:alexandre.labergue@univ-lorraine.fr))

**Résumé** - Un banc expérimental est développé pour étudier le refroidissement de surfaces chaudes dans des conditions proches de celles rencontrées dans l'industrie. Le refroidissement entre des sprays et un jet liquide est également comparé. La taille et vitesse des gouttes est mesurées par Analyse Phase Doppler. Le flux extrait est estimé par thermographie infrarouge couplée à un problème de conduction inverse. Cette étude constitue une première étape en utilisant des débits surfaciques maximum de 8 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> mais les résultats obtenus concordent avec la littérature validant ainsi le dispositif.

## Nomenclature

<i>We</i>	nombre de Weber	$\sigma$	tension de surface, N.m <sup>-1</sup>
<i>C<sub>p</sub></i>	chaleur massique, J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	<i>Indices et exposants</i>	
<i>d</i>	diamètre de goutte, m	<i>d</i>	goutte
<i>f</i>	distance focale, m	<i>l</i>	propriété du liquide
<i>k</i>	conductivité thermique, W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	<i>Leid</i>	température de Leidenfrost
<i>h</i>	chaleur latente de vaporisation, J.kg <sup>-1</sup>	<i>p</i>	condition de paroi en face avant
$\dot{m}$	débit surfacique, kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	<i>r</i>	condition de paroi en face arrière
<i>q''</i>	densité de flux de chaleur, W.m <sup>-2</sup>	<i>s</i>	spray
<i>T</i>	température, K	<i>sat</i>	condition de saturation
<i>Symboles grecs</i>		<i>sub</i>	condition de sous-refroidissement
$\alpha$	diffusivité thermique, m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>		
$\varepsilon$	emmissivité		
$\lambda$	longueur d'onde, m		
$\rho$	masse volumique, kg.m <sup>-3</sup>		

## 1. Introduction

L'eau reste l'élément privilégié dans les procédés industriels quand il s'agit de dissiper de grands flux de chaleur (sécurité nucléaire ou industrie sidérurgique par exemple). L'eau est principalement injectée sous forme de jet liquide ou de sprays. Les jets liquides présentent l'avantage d'extraire rapidement une grande quantité de chaleur mais ils présentent également de fortes inhomogénéités spatiales. Au contraire, la pulvérisation du liquide sous forme de gouttelettes assure une meilleure homogénéité du refroidissement ainsi qu'une consommation en eau moindre.

L'étude du refroidissement de surfaces chaudes par sprays a fait l'objet de nombreuses études [1-6]. Par contre, le nombre d'études réalisées dans des conditions proches de celles de l'industrie est plus restreint [3-4]. En effet, les conditions extrêmes rendent la conduite des expériences difficile : température de surface largement au-dessus de celle de Leidenfrost (*i.e.* environ 1200°C), diamètre de gouttes et débits surfaciques importants (*i.e.* environ 1 mm et 50 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> respectivement). D'autre part, peu d'études ont été menées dans l'optique de

caractériser simultanément l'hydrodynamique de l'impact des gouttes et les transferts de chaleur entre la surface et les gouttes. La caractérisation des gouttes est souvent entreprise par des mesures de PDA. Les flux de chaleur quand à eux sont estimés par des mesures de températures (utilisation de thermocouples ou de thermographie infrarouge) couplé à un problème de conduction inverse. Par exemple, Jia et Qiu [6] ont couplé des mesures d'Analyse Phase Doppler (PDA) et de thermocouples pour analyser l'hydrodynamique de l'impact et estimer le flux de chaleur extrait mais pour des débits surfaciques maximum de l'ordre de  $1.20 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

Dans cette étude, le refroidissement d'une surface chaude est assuré par des sprays coniques pleins et un jet liquide. Le travail s'articule autour de trois objectifs: (1) concevoir un banc expérimental permettant d'opérer dans des conditions industrielles, (2) pour les sprays, analyser l'influence de la granulométrie (taille et vitesse des gouttes) et de la distribution du débit surfacique et (3) comparer le refroidissement entre spray et jet liquide. Le flux de chaleur extrait est estimé par thermographie infrarouge. Enfin, des mesures PDA sont entreprises pour l'étude de l'impact en proposant une configuration spécifique. Cette étude constitue une première étape où le banc expérimental est testé pour des débits surfaciques maximum de l'ordre de  $9 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

## 2. Dispositif expérimental

Dans cette étude, les expériences consistent à analyser un phénomène transitoire: refroidissement d'une surface chaude. Une expérience est donc divisée en deux étapes : une première étape de chauffage jusque  $800^\circ\text{C}$  environ et une seconde étape où le spray est appliqué. Typiquement, la phase de refroidissement dure entre 20 et 30 secondes. Toutefois, le temps d'établissement du spray (ou du jet) dans la seconde étape n'est pas forcément négligeable devant le temps de refroidissement. Ce temps d'établissement peut être réduit en maintenant en rotation la pompe d'alimentation durant la première étape. L'idée est donc d'utiliser une seconde buse qui va injecter le spray ou le jet à côté de la plaque à refroidir.

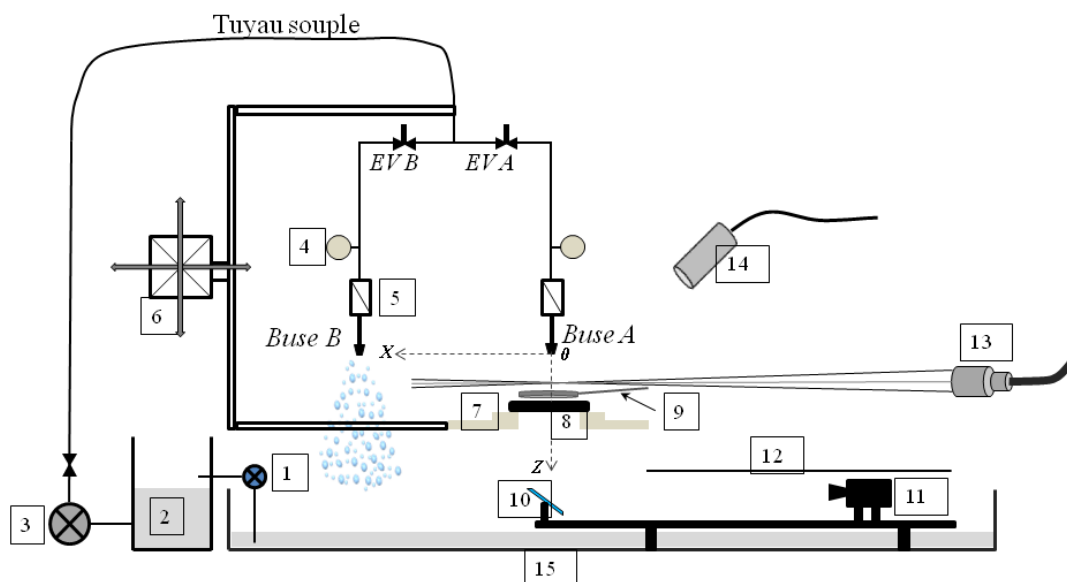


Figure 1 : Vue de côté (i.e. plan X-Z) du banc expérimental. 1 – Pompe N°1; 2 – Réservoir d'eau; 3 – Pompe N°2; 4 – Manomètre; 5 – Débitmètre; 6 – Système de déplacement 3D; 7 – support isolant (quartz); 8 – disque de nickel; 9 – Inducteur rétractable; 10 – Miroir; 11 – Camera infrarouge; 12 – Capot de protection; 13 – Sonde laser; 14 – Récepteur PDA; 15 – Bac de récupération d'eau

Dans cet optique, un dispositif expérimental a été spécialement développé (Figure 1). L'impact du liquide (pour les sprays notamment) générant des projections d'eau sur une grande surface, un large bac de récupération ( $3 \times 4 \times 0.3 \text{ m}^3$ ) a été conçu (15) et contenant un volume d'eau en permanence. L'alimentation en eau des buses (5) fonctionne en boucle fermée par l'intermédiaire de deux pompes (1-3) et d'un réservoir (2). Deux électrovannes (EV A et EV B) permettent de basculer l'alimentation en eau entre les deux buses (A et B). La plaque est un disque de nickel (8) de rayon  $R = 67.5 \text{ mm}$  et d'épaisseur  $e = 5 \text{ mm}$ . Le chauffage est assuré par induction (Five Celles ; 12kW) disposant d'un inducteur mobile (9). Le disque est posé sur un support isolant (7) et centré de telle manière que son axe soit aligné avec celui de la buse A. L'ensemble buses/disque est solidaire et monté sur un système de déplacement 3D (6). L'origine du repère d'étude X-Y-Z est prise à la sortie de la buse A, l'axe Z étant dirigé vers le bas. Au dessus de la face avant du disque est disposé le système PDA [(13) et (14)]. La température de la face arrière est mesurée par une caméra IR (11) à travers un miroir à  $45^\circ$  (10). Un capot (12) recouvre intégralement la caméra (Cedip Jade III) pour la protéger de l'eau. Le support isolant (7) est assez large pour protéger le miroir de l'eau. Pour les sprays, la granulométrie et le débit surfacique est modifié en jouant sur l'angle d'expansion du spray et sur le point de fonctionnement (Pression et débit). Le tableau 1 donne les principales caractéristiques de cinq sprays étudiés (Buse 1 à 5). Le jet liquide est ici comparer avec le spray 1 : un débit de 6.7 l/mn (Tableau 1).

• Sprays coniques pleins	Spray angle ( $^\circ$ )	Débit (l/mn)	Pression d'injection (bar)	Distance Z (mm)	Température d'injection $T_l$ ( $^\circ\text{C}$ )
Buse 1	45	6.7	7	250	19
Buse 2	45	5.5	7	250	19
Buse 3	45	6.7	3.7	250	19
Buse 4	60	6.7	7	160	19
Buse 5	60	6.7	3.7	160	19
• Jet liquide	Diamètre du Jet (mm)	Débit (l/mn)		Distance Z (mm)	Température d'injection $T_l$ ( $^\circ\text{C}$ )
	9	6.7		250	19

Tableau 1 : Caractéristiques des buses et sprays étudiés

### 3. Diagnostiques expérimentaux

#### 3.1. Mesures d'Analyse Phase Doppler

La taille et vitesse des gouttes est mesuré par Analyse Phase Doppler (PDA : Dantec-Dynamics). Deux composantes de la vitesse sont mesurées : une composante verticale et horizontale selon les axes Z et Y respectivement. Un laser à Argon est utilisé pour générer les deux volumes de mesures ( $\lambda_{vert} = 514.5 \text{ nm}$  et  $\lambda_{bleu} = 488 \text{ nm}$ ). Le PDA fonctionne en réflexion d'ordre 1 et l'optique de réception est placée à  $45^\circ$ . Les lentilles frontales du récepteur et de la sonde d'émission sont respectivement 510 et 1200 mm. Le diamètre maximal détectable des gouttes est de  $327 \mu\text{m}$ . Afin de caractériser au mieux l'impact des gouttes, le volume de mesure est placé 10 mm au-dessus de la face avant. Puis la détection des gouttes est améliorée en élevant le récepteur PDA de  $45^\circ$  au-dessus de la face avant (Figure 2) et en tournant la sonde laser du même angle selon l'axe X. Le signe de la

composante verticale de la vitesse a permis de séparer les gouttes incidentes des gouttes réémises après impact.

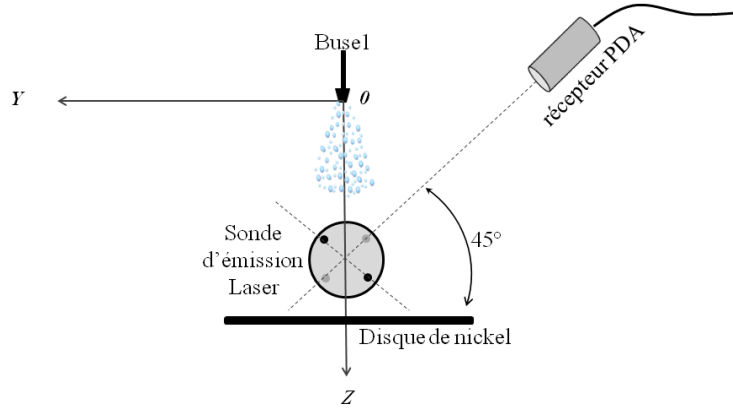


Figure 2 : Vue de face (plan Y-Z) de la configuration optique pour les mesures de PDA

## 3.2. Mesures du flux de chaleur

### 3.2.1. Thermographie infrarouge

Le capteur de la caméra (InSb ; 320×240 pixels/image) travail dans la gamme spectrale [3 – 5 μm] et est équipé d'un filtre étroit [3.97 – 4.01 μm]. La face arrière du disque de nickel est préalablement sablée pour assurer une surface diffuse et une émissivité constante ( $\varepsilon_r \approx 0.67$ ). Le détecteur est étalonné avec un corps noir puis pour tenir compte de l'environnement et du miroir, une dernière calibration est entreprise. Le disque est d'abord chauffé jusque 800°C puis laissé refroidir naturellement où le suivi en température est réalisé par un thermocouple inséré au centre du disque à 2 mm de la face avant.

### 3.2.2. Problème de conduction inverse

Un modèle de conduction inverse est utilisé afin d'estimer à la fois la température et le flux de chaleur extrait à la face avant connaissant la température à la face arrière. La géométrie circulaire du disque, rend le problème 3D réel à un problème 2D. Ainsi, seul le flux selon une direction radiale est disponible ici. Une description complète de la méthode peut être trouvée dans [7] et les principales étapes sont ici décrites. Le problème 2D complet s'écrit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.a)$$

$$T = T_{init}(r) \text{ à } t = 0 \quad (1.b)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_{spray}''(r, t) \quad (1.c)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=e} = h_r(T)(T - T_\infty) + \varepsilon_r \sigma (T^4 - T_\infty^4) \quad (1.d)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0, \text{ in } r = R \quad (1.e)$$

Les étapes de résolution de ce problème passant par les transformées de Laplace (temps) et de Hankel (espace) puis par la méthode des quadripôles [8]. Le retour dans le domaine temps-espace donne alors en face arrière ( $Z = e$ ) accès à l'expression du flux de chaleur extrait :

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

où  $\tilde{T}_n$  et  $\tilde{q}_n$  est la température et le flux de chaleur dans le domaine de Laplace et Henkel respectivement.

### 3.3. Mesures du débit surfacique

La répartition du débit surfacique des cinq sprays est mesurée par débitmètrie en utilisant douze tubes alignés de diamètre 7.5 mm, espacés de 13.5 mm centre à centre et connectés à des bouteilles individuelles. Les bords supérieurs des tubes sont situés à la côté Z qui correspond à la position de la face avant du disque (cf : Table 1). Le débit collecté pour chaque tube est calculé pour une durée de collection identique de 180 s. Chaque spray est déplacé via le système de déplacement 3D dans le plan X-Y afin de cartographier le débit surfacique dans une section (débit surfacique décrit par 121 points).

## 4. Acquisition et post-traitement des données

Durant la phase de refroidissement, la caméra IR et le système PDA sont synchronisés afin d'obtenir deux fichiers débutant au même instant. L'enregistrement des données est arrêté quand la température de la plaque atteint celle du liquide à l'injection (*i.e.*  $T_l = 198^\circ\text{C}$ ). Pour l'étude des sprays en particulier, l'analyse des résultats vise à corréler le flux de chaleur extrait avec le débit surfacique et les propriétés des gouttes. Cependant, l'absence de symétrie parfaite dans la distribution du débit surfacique et des propriétés granulométrique des sprays, conduit à un refroidissement également inhomogène sur la surface. Par conséquent, un post-traitement des données des mesures de débit surfacique et de PDA. L'idée est de rendre toutes les grandeurs mesurées dépendantes que d'une seule variable  $r$  :  $r$  variant de  $[0 ; R]$ . Le traitement consiste alors à moyenner les grandeurs mesurées contenue dans une couronne de rayon  $r$  et d'épaisseur  $dr$ .

## 5. Caractéristiques des sprays libres

Dans cette partie sont présentées les principales caractéristiques des sprays en l'absence de plaque (*i.e.* sans impact) à la côté Z correspondant à la position de la face avant (cf : Table 1)

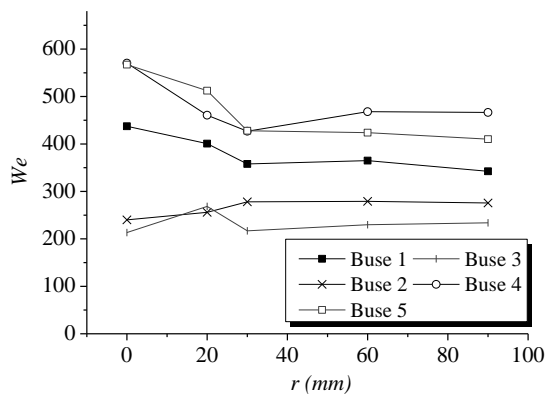


Figure 3 : Evolution du nombre de  $We$  en fonction de  $r$  pour les cinq sprays

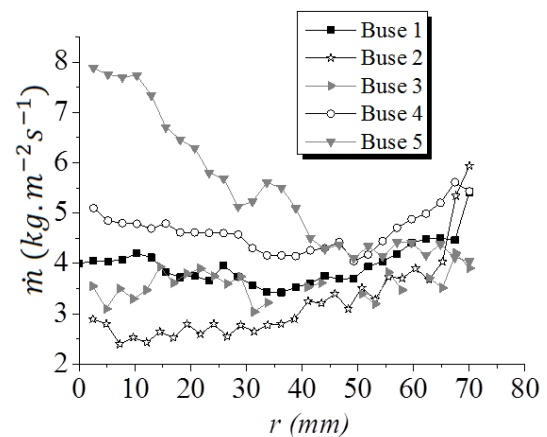


Figure 4 : Evolution du débit surfacique en fonction de  $r$  pour les cinq sprays

Les mesures de PDA ont permis de tracer l'évolution du nombre de Weber selon  $r$  pour les cinq sprays (Figure 3).  $We$  est basé sur le diamètre moyen de Sauter  $d_{32}$  (SMD) et la composante verticale de la vitesse. Les sprays 4 et 5 conduisent aux plus grandes valeurs de  $We$  ( $We \approx 500$ ) alors que les plus petites valeurs sont obtenues pour le spray 3 ( $We \approx 225$  environ). La Figure 4 décrit la répartition du débit surfacique pour les cinq sprays en fonction

de  $r$ . Proche du centre [ $r = 0 ; 10$  mm], le spray 5 a la plus grande valeur de débit surfacique avec  $8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . En allant vers les bords des sprays, le débit surfacique tend d'abord vers la même valeur quelque soit le spray jusque  $r \approx 50$  mm et semble ensuite augmenter avec  $r$ .

## 6. Etude du refroidissement

### 6.1. Caractéristiques de l'impact

La caractérisation de l'impact des gouttes par PDA durant le refroidissement a été effectué au centre du disque (*i.e.*  $X = Y = 0$ ). La Figure 5 donne un exemple de probabilité de distribution en taille pour les gouttes incidentes et gouttes réémises. Les gouttes réémises sont plus petites. La Figure 6 présente pour les cinq buses les rapports des diamètres moyens et SMD réémis sur les diamètres moyens et SMD incidents et va dans le même sens : les rapports sont proches de 1. Toutefois, les gouttes réémises et détectées par le PDA ne permettent pas de déterminer si il s'agit de gouttes qui ont rebondies (régime de rebonds) ou de gouttes qui se sont désintégrées (régime de splashing). Cependant, les valeurs de  $We$  (Figure 3) permettent de penser que les gouttes réémises sont sans doute majoritairement des gouttes secondaires issues du régime de splashing.

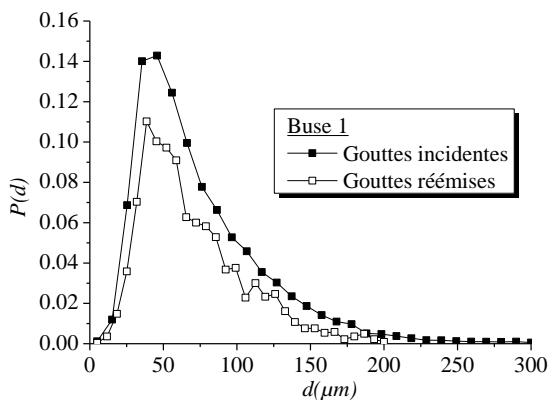


Figure 5 : Densité de probabilité en taille des gouttes incidentes et réémises pour le spray 1

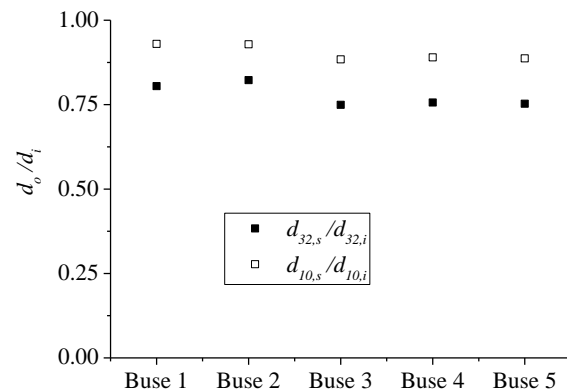


Figure 6 : Rapport des diamètres moyens et de Sauter réémis sur les diamètres incidents

### 6.2. Caractéristiques des transferts de chaleur

Pour des raisons numériques, les images IR ont été post-traitées jusque  $r = 70$  mm. La Figure 7 présente des exemples de courbe d'ébullition (densité de flux extrait en fonction de la température de paroi) obtenues pour les cinq sprays en  $r = 2.5$  mm (a) et  $r = 70$  mm (b). L'échelle verticale étant conservée, il est aisé de discuter de l'homogénéité du refroidissement entre le centre et l'extrémité du spray. Il apparaît clairement que de plus grandes variations apparaissent pour les sprays 4 et 5. Au contraire, le spray 1 présente des valeurs de flux relativement proches entre en  $r = 2.5$  mm et  $r = 70$  mm. Ces résultats sont à mettre en relation avec les valeurs de débit surfacique (Figure 4). On en déduit effectivement que le flux extrait augmente bien avec la valeur du débit surfacique. D'autre part, en  $r = 2.5$  mm on observe très bien le point du régime de Leidenfrost (point où le flux extrait augmente) pour les buses 1 à 3. Ces points apparaissent pour des températures de paroi ( $T_{leiden}$ ) respectives de 200, 375 et 250°C. Pour les buses 4 et 5, ce point est plus difficile à cerner et apparaît pour  $T_{leiden} \approx 400^\circ\text{C}$ . En corrélant à nouveau avec la répartition du débit surfacique, on en déduit que  $T_{leiden}$  augmente avec le débit surfacique (conforme aux observations de Al-Ahmadi [3]).

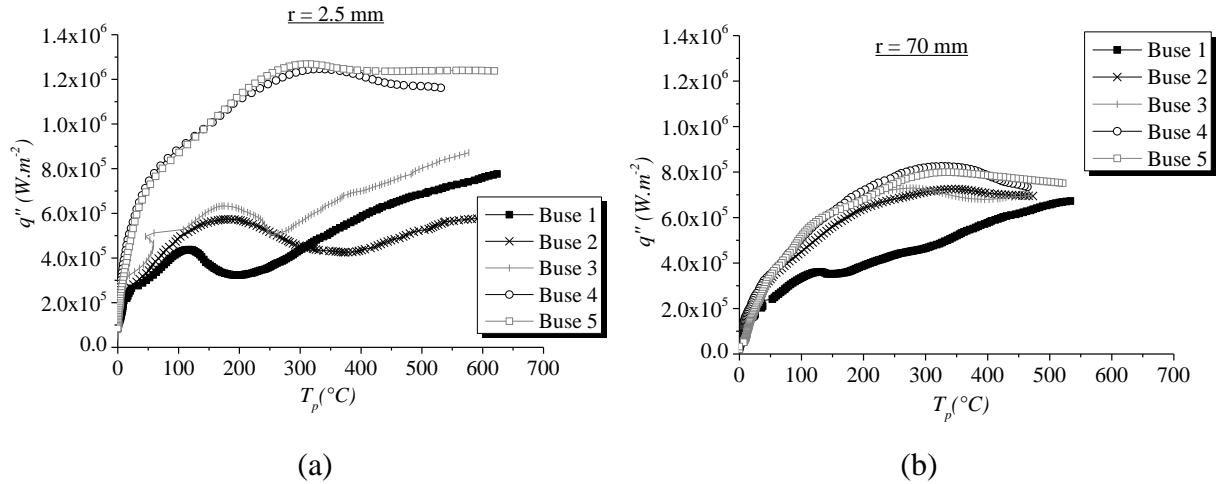


Figure 7 : Courbes d'ébullitions pour les cinq sprays tracées à  $r = 2.5 \text{ mm}$  (a) et  $r = 70 \text{ mm}$  (b)

Généralement, l'efficacité de refroidissement est introduite :

$$\zeta = \frac{q''}{\dot{m}[h_v + c_{pl}(T_{sat} - T_l) + c_{pv}(T_w - T_{sat})]} \quad (3)$$

Elle représente la quantité de chaleur réellement extraite par le spray divisée par la chaleur totale nécessaire pour évaporer complètement le liquide. Yao & Cox [9] a montré que l'efficacité de refroidissement était corrélée à un second nombre de Weber mais basé sur le débit surfacique plutôt que sur la vitesse verticale :

$$We_s = \frac{\dot{m}^2 d_{32}}{\rho \sigma} \quad (4)$$

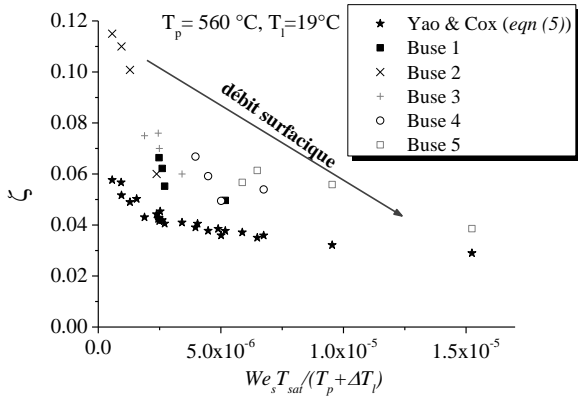


Figure 8 : Comparaison de l'efficacité de refroidissement obtenue dans cette étude avec la corrélation de Yao & Cox pour  $T_p = 560^\circ\text{C}$

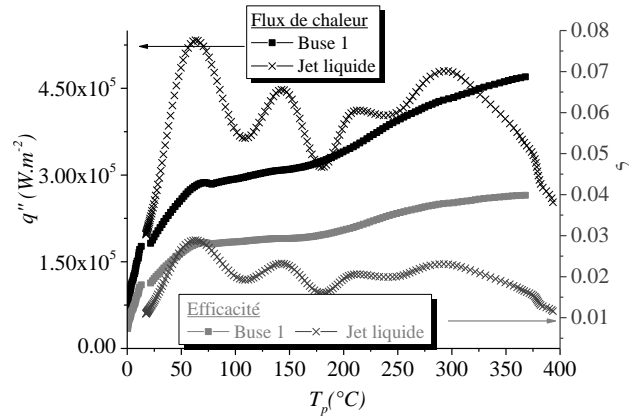


Figure 9 : Comparaison des courbes d'ébullition et de l'efficacité de refroidissement entre le spray et le jet liquide

Il a été également montré que l'efficacité dépend des températures de paroi, du liquide et de saturation. Une corrélation générale a alors été proposée dont le domaine de validité correspond à la présente étude :

$$\zeta = 8 \times 10^{-7} \left[ \frac{We_s T_{sat}}{T_w - T_l} \right]^{-0.62} + 3.5 \times 10^{-7} \left[ \frac{We_s T_{sat}}{T_w - T_l} \right]^{-0.2} \quad (5)$$

L'efficacité expérimentale obtenue pour les cinq sprays a été tracée en fonction de la quantité  $We_s T_{sat}/(T_w - T_i)$  et comparée à la corrélation de Yao & Cox pour  $T_p = 560^\circ\text{C}$  (Figure 8). On note que même si elle est légèrement en dessous des résultats expérimentaux, la corrélation de Yao & Cox décrit le même comportement : l'efficacité diminue avec le débit surfacique.

## 7. Comparaison avec le jet liquide

Le refroidissement du jet liquide est comparé avec le spray 1. Le jet impact sur une zone du disque qui s'étend jusque  $r \approx 4.5$  mm. La Figure 9 compare les courbes d'ébullition et d'efficacité de refroidissement pour le jet liquide et le spray. Afin, que les deux cas soient comparables, le flux de chaleur extrait représenté est la moyenne sur toute la surface du disque (de  $r = 0$  à  $r = 70$  mm). Malgré les fortes oscillations, le flux de chaleur pour le jet liquide est plus grand que pour le spray 1. Néanmoins, son efficacité est nettement plus faible.

## 8. Conclusion

Ce travail a présenté les premiers travaux dédiés à l'étude du refroidissement d'une surface chaude dans des conditions industrielles. Le refroidissement par jet liquide et spray a également été comparé. Cinq sprays ont été étudiés afin de couvrir une plus large gamme de débit surfacique, de taille et de vitesse de gouttes. Le banc expérimental spécifiquement conçu a d'abord été testé pour des débits surfaciques maximum de  $8 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Des mesures de PDA ont été entreprises pour tenter de caractériser l'impact des gouttes. Les résultats obtenus montrent bien une diminution du diamètre des gouttes réémises mais la technique de PDA ne peut déterminer l'origine de ces gouttes détectées (rebond ou splashing). Des visualisations par caméra rapide seront prochainement réalisées pour tenter de soulever l'ambiguïté. Enfin, les mesures de flux de chaleur réalisées par thermographie infrarouge couplé à un problème de conduction inverse ont conduit à des conclusions préalablement observés dans la littérature. Notamment, il apparaît que l'efficacité de refroidissement diminue bien avec le flux surfacique. Ces premiers résultats permettent alors de valider le dispositif expérimental et les prochains travaux seront conduits avec des flux liquides plus importants.

## Références

- [1] K.J Choi., S.C.Yao, Heat transfer mechanisms of horizontally impacting sprays, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 30-2 (1987), 1291-1296.
- [2] S. Deb, S.C. Yao, Analysis on film boiling heat transfer of impacting sprays, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 32-11 (1987), 2099-2112.
- [3] H.M. Al-Ahmadi, S.C Yao, Spray cooling of high temperature metals using high mass flux industrial nozzles, *Exp. Heat Transf.*, 21 (2008). , 38-51.
- [4] T. Cox, *Heat transfer experiments and general correlation for sprays of very large droplets*, Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University (1998).
- [5] T.L. Cox, S.C.Yao, Heat transfer of sprays of large water drops impinging on high temperature surfaces, *J. Heat Transf.*, 121-2 (1999), 446-450.
- [6] W.Jia, H.H. Qiu "Experimental investigation of droplet dynamics and heat transfer in spray cooling," *Exp. Thermal and Fluids Sc.*, 27 (2003), 829-838.
- [7] M. Gradeck, J.A. Ouattara, B. Rémy, D. Maillet, Solution of an inverse problem in the hankel space – infrared thermography applied to estimation of a transient cooling flux, *Exp. Thermal and Fluids Sc.*, 36 (2012), 56-64.
- [8] D. Maillet, S. André, J. Barsale, A. Degiovanni, C. Moyne, *Thermal Quadrupoles - Solving the heat equation through integral transforms*, Chisester: Wiley (2000).
- [9] S. C. Yao, T.L. Cox, A general heat transfer correlation for impacting water sprays on high-temperature surfaces, *Exp. Heat Transf.*, 15 (2002), 207-219.