



HAL
open science

Mesures couplées d'analyse phase Doppler et de thermographies infra-rouge pour l'étude du refroidissement de surfaces chaudes par sprays

Alexandre Labergue, Michel Gradeck, Fabrice Lemoine

► To cite this version:

Alexandre Labergue, Michel Gradeck, Fabrice Lemoine. Mesures couplées d'analyse phase Doppler et de thermographies infra-rouge pour l'étude du refroidissement de surfaces chaudes par sprays. 14ème Congrès Francophone sur les Techniques Laser pour la Mécanique des Fluides, Institut universitaire des systèmes thermiques industriels; Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre; Laboratoire de Génie Chimique et Instrumentation Sep 2014, Marseille, France. hal-01447127

HAL Id: hal-01447127

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01447127>

Submitted on 26 Jan 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



MESURES COUPLES D'ANALYSE PHASE DOPPLER ET DE THERMOGRAPHIES INFRA-ROUGE POUR L'ÉTUDE DU REFROIDISSEMENT DE SURFACES CHAUDES PAR SPRAYS

Alexandre Labergue^{a,*}, Michel Gradeck^a, Fabrice Lemoine^a

(a) LEMTA, Université de Lorraine, 54518, Vandoeuvre Lès Nancy, France

*Correspondant: 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 trois sprays et un jet liquide est également comparé. La taille et vitesse des gouttes est mesurées par Analyse Phase Doppler. Un soin est apporté pour augmenter la qualité de la détection des gouttes au niveau de la surface de l'impact. 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 $8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ mais les résultats obtenus concordent avec la littérature validant ainsi le dispositif. Ils démontrent essentiellement que pour des conditions de refroidissement semblables les sprays sont nettement plus efficaces que les jets liquides.

1 Introduction

L'utilisation d'eau pour le refroidissement de surfaces chaudes reste un élément privilégié là où l'extraction de hauts flux thermiques est nécessaire. Un bon exemple est l'industrie sidérurgique qui utilise comme principaux procédés de refroidissement la trempe ou les jets liquides impactants. Malgré les hauts flux ainsi dissipés, ces deux techniques n'assurent pas un refroidissement spatialement uniforme pouvant altérer la qualité de l'acier souhaité. La pulvérisation de l'eau sous forme de sprays semble être une bonne alternative. Le nuage de gouttes assure une plus grande uniformité de l'arrosage et donc du refroidissement, ainsi qu'une consommation en eau moindre.

L'étude du refroidissement par sprays a fait l'objet de nombreuses études expérimentales [1-16]. Toutefois, réaliser des expériences dans des conditions qui sont proches de celles de l'industrie constitue un challenge plus rarement abordé [4 ; 5 ; 8]. En effet, les conditions extrêmes rendent la conduite des mesures difficile : température élevées (i.e. $1200 \text{ }^\circ\text{C}$) et débits surfaciques importants (i.e. environ $300 \text{ l/m}^2/\text{s}$). D'autre part, peu d'études ont été conduites dans l'optique de caractériser l'hydrodynamique de l'impact et de corréler les propriétés des gouttes incidentes au flux de chaleur extrait.

L'objectif de la présente étude est triple : (1) réaliser des expériences dans des conditions proches de celles rencontrées dans l'industrie sidérurgique, (2) lier l'efficacité de refroidissement et l'impact avec les caractéristiques des gouttes incidentes, puis (3) de comparer. Dans cette optique, un dispositif expérimental a été spécialement conçu pour travailler dans de conditions industrielles et étudier le refroidissement d'une plaque de nickel. Toutefois, dans une première étape, les débits surfaciques

maximum utilisés sont limités à $9 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ environ afin de valider le dispositif et protocole expérimental. L'influence de la granulométrie différentes (taille et vitesse des gouttes) et de la distribution du débit surfacique sur le refroidissement est analysée en employant trois sprays coniques pleins différents. Les propriétés des gouttes incidentes et l'impact de celles-ci sont mesurés en face avant de la plaque par analyse phase Doppler (PDA). Le flux de chaleur extrait en face avant est estimé par thermographie infra-rouge en face arrière

2 Dispositif expérimental

Dans cette étude, les expériences consistent à analyser un phénomène transitoire: le refroidissement d'une surface chaude. Une expérience est donc divisée en deux étapes : une étape de chauffage jusque 800°C environ et une 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.

La Figure 1 présente le schéma du banc expérimental spécialement développé. L'impact de l'eau générant des projections d'eau importantes, un large bac de récupération ($3\times 4\times 0.3 \text{ m}^3$) a été conçu (15). L'alimentation en eau des buses (5) fonctionne en boucle fermée par l'intermédiaire de deux pompes (1-3). 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 $R = 87.5 \text{ mm}$ et d'épaisseur $e = 5 \text{ mm}$. Le chauffage est

assuré par induction (Système de 12kW commercialisé par Five Celles) disposant d'un inducteur mobile (9). Le disque est posé sur un support en quartz isolant (7) et centré de telle manière que son axe soit aligné verticalement 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 [sonde d'émission laser (13) et de réception (14)]. La température de la face arrière est mesurée par une caméra IR (11) à travers un miroir à 45° (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 des trois sprays étudiés (Spray 1 à 3). Le jet liquide est comparé avec le spray 1 avec un débit de 6.7 l/mn (Tableau 1).

Procédé	Débit (l/mn)	Pression d'injection (bars)	Angle (°)	Distance buse-plaque (mm)
Spray 1	6.7	7	45	250
Spray 2	6.7	3.7	45	250
Spray 3	6.7	3.7	60	160
Jet liquide	6.7			250

Table 1 Caractéristiques des sprays et jet liquides étudiés.

3 Diagnostiques expérimentaux

3.1 Analyse Phase Doppler

La technique de PDA est utilisée pour deux raisons: caractérisation des sprays libres (1) et de l'impact des gouttes incidentes (2). Le système utilisé (Dantec Dynamic) permet d'accéder à deux composantes de la vitesse : une composante verticale selon Z et une composante horizontale selon Y. Un laser à Argon permet générer les deux volumes de mesures ($\lambda_{vert} = 514.5 \text{ nm}$ et $\lambda_{bleu} = 488 \text{ nm}$). Le PDA fonctionne en réfraction d'ordre 1 avec l'optique de réception à 60°. Les lentilles frontales du récepteur et de la sonde d'émission sont respectivement 510 et 1200 mm. Le diamètre maximal détectable des gouttes est alors de 327 μm . Les projections d'eau générées par l'impact altèrent grandement la qualité du signal détecté : brouillard entre le volume de mesure et le récepteur et dépôt d'eau sur la lentille frontale. Ainsi, la détection des gouttes est améliorée en élevant le récepteur PDA de 45° au-dessus de la face avant de la

plaque (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. Néanmoins, il a été difficile d'effectuer des mesures lorsque le volume de mesure est placé à moins de 10 mm du dessus de la face avant.

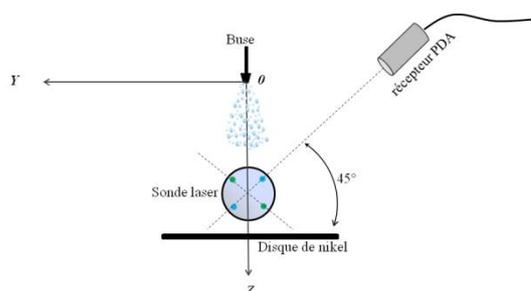


Figure 2 Configuration de la sonde d'émission laser et de réception du PDA.

3.2 Thermographie infra-rouge

La densité de flux de chaleur q'' (W/m^2) extraite par le spray ou le jet liquide est estimée par une caméra infra-rouge (Cedip Jade III) qui mesure la température de la face arrière du disque via le miroir (10) (Figure 1). Le capteur de la caméra (InSb ; 320x240 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 ($\epsilon_r \approx 0.67$). L'étalonnage de la caméra est effectué par une calibration unique et qui tient compte de l'environnement (capot de protection, émissivité de la plaque, miroir, etc...). Pour ce faire, le disque est d'abord chauffé jusqu'à 800°C environ 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.

Ensuite, connaissant la température en face arrière, un problème de conduction inverse permet de remonter à la température et à la densité de flux à la face avant [17-19]. Le post-traitement des images donne alors une répartition angulaire de la densité de flux surfacique en fonction du temps $q''(r,t)$. Les résultats ci-dessous seront cependant limités à une région correspondant à $r_{max} = R_1 = 70 \text{ mm}$. En effet, pour $r > 70 \text{ mm}$ il est apparu que les images sont de mauvaises qualités.

3.3 Mesures de la distribution du débit surfacique

La répartition du débit surfacique des trois 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 : Tableau 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 la totalité de la section du spray. Malgré tout, il est vérifié que tout le débit injecté n'est pas entièrement collecté.

3.4 Procédure 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.* $T_i = 198^\circ\text{C}$). Pour l'étude des sprays en particulier, l'analyse des résultats vise à corréliser le flux de chaleur extrait avec le débit surfacique et les propriétés des gouttes. Or, l'absence de symétrie parfaite dans la distribution du débit surfacique et des propriétés granulométrique des sprays, conduit à effectuer un post-traitement des données des mesures de débit surfacique et de PDA est effectué comme pour les données de thermographie IR. Ainsi, les grandeurs mesurées par PDA et le débit surfacique ne dépend plus que d'une seule variable r variant de $[0 ; R]$.

4 Caractéristiques des sprays libres

Dans cette section sont présentés les caractéristiques des trois sprays en l'absence de la plaque. La Figure 3 décrit l'évolution du débit surfacique obtenu par débitmétrie pour les trois sprays en fonction du rayon. Typiquement, le débit surfacique couvert par les trois sprays varie de 2 à 8 kg/m²/s. Entre le centre et environ $r = 75$ mm, le spray 3 a les plus grands débits surfacique. En allant vers les bords de la plaque, les trois sprays ont sensiblement les mêmes débits surfacique qui diminuent avec r .

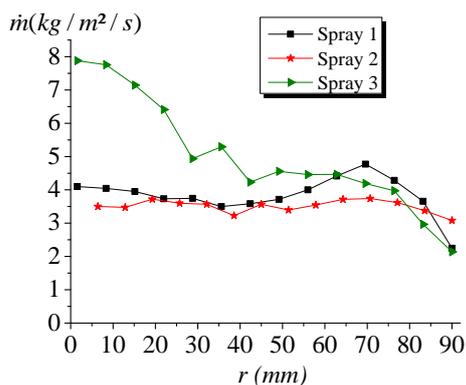


Figure 3 Distribution du débit surfacique selon le rayon.

D'une manière générale, et en utilisant les données PDA, on remarque que l'évolution du débit surfacique dépend fortement du diamètre statistique moyen d_{10} ou de Sauter d_{32} .

Un autre paramètre clés qui classe les sprays est le nombre de Weber et définit par :

$$We = \frac{\rho d w^2}{\sigma} \tag{1}$$

où w est la composante verticale de la vitesse de la goutte, d le diamètre, σ et ρ la tension superficielle du et densité volumique du liquide (*i.e.* eau). La Figure 4 décrit l'évolution du We en fonction de r pour les trois sprays. Ici, le We est calculé en utilisant la vitesse statistique moyenne de l'ensemble des gouttes et le diamètre de Sauter.

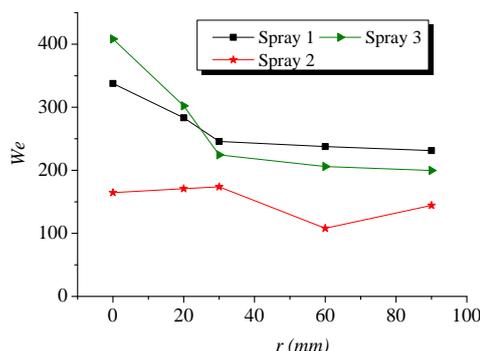


Figure 4 Evolution du nombre de Weber selon le rayon pour les trois sprays.

Les sprays 1 et 3 ont leurs courbes quasiment confondues et ont les plus grandes valeurs de We . Pour le We , et en utilisant les données PDA, on vérifie bien que ce paramètre dépend davantage de la vitesse verticale que le diamètre.

5 Etude de l'hydrodynamique de l'impact

5.1 Influence de la présence de la plaque

Souvent les caractéristiques des gouttes incidentes étaient mesurées, pour des raisons de commodités, en l'absence de la plaque. Il s'agit de montrer ici que la plaque peut influencer l'écoulement du spray en amont. La Figure 5 représente la distribution en taille des gouttes incidentes mesurées en présence et en absence de la plaque à une position identique : $X=Y=0$ et $Z=240$ mm.

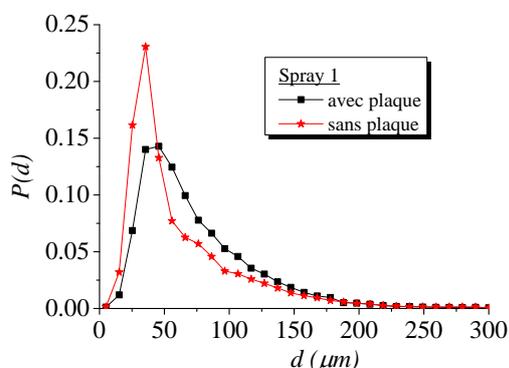


Figure 5 Comparaison de la distribution en taille des gouttes incidentes en présence et en absence de la plaque.

Il apparaît clairement que de plus petites gouttes sont détectées lorsque la plaque est absente. Ceci pourrait s'expliquer par une déviation des plus petites gouttes (du à leur faible nombre de Stokes). En effet, la Figure 6 montre que la composante horizontale v des petites gouttes ($d < 100$ μm) augmente nettement en présence de la plaque. Ainsi, il semblerait que la présence de la plaque peut influencer l'écoulement amont des plus petites gouttes. Il est donc préférable de mesurer les caractéristiques des gouttes incidentes en présence de la plaque étudiée.

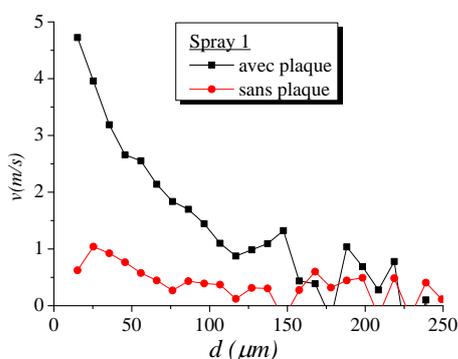


Figure 6 Comparaison de la corrélation taille/vitesse horizontale des gouttes incidentes en présence et en absence de la plaque.

5.2 Impact sur une surface chaude

L'étude de l'impact des gouttes a été réalisée durant la phase de refroidissement au centre de la plaque (i.e. $X=Y=0$). Seules les données PDA comprises entre l'instant initial (application du spray) et la fin du régime de Leidenfrost ont été traitées. La Figure 7 donne un exemple de distribution en taille des gouttes incidentes et réémises obtenu pour le spray 1.

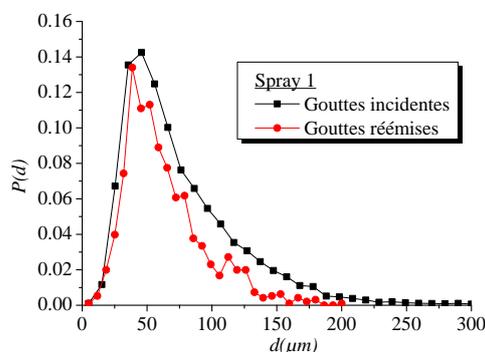


Figure 7 Distribution en taille des gouttes incidentes et réémises dans le cas d'impact sur une surface chaude et sur surface froide pour le spray 1.

L'impact sur la plaque conduit à des gouttes réémises de plus petites tailles. Toutefois, même si le PDA permet de dissocier les gouttes incidentes des gouttes réémises, la technique ne permet pas de différencier si les gouttes réémises détectées sont issues de gouttes incidentes ayant rebondies ou si elles sont issues du régime de l'éclatement d'une goutte réémettant de plus petites gouttes (splashing). Cependant, pour $We > 70$ durant le régime de Leidenfrost, le régime d'impact rencontré est essentiellement le splashing [20]. Or la Figure 8 montre que la majeure partie des gouttes incidentes pour les trois sprays ont un $We > 70$. Il est donc fort probable que les gouttes réémises et détectées par le PDA émanent du splashing.

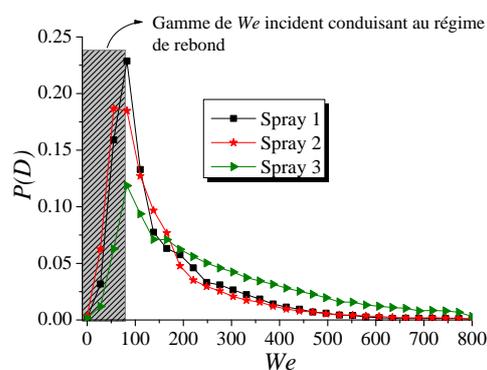


Figure 8 Distribution en taille des gouttes par classe de We incident pour les trois sprays.

6 Etude des transferts de chaleur

L'évolution du flux extrait à la paroi q'' en fonction de la température de surface T_w pour les trois sprays est présenté à la Figure 9 pour $r = 2.5 \text{ mm}$ (a) et pour $r = 70 \text{ mm}$ (b). L'évolution en fonction du temps peut se lire de la droite vers la gauche puisque T_w diminue en fonction du temps. L'échelle verticale étant conservée, on observe bien à chaque instant la non-uniformité du refroidissement entre le centre et l'extrémité de la plaque pour le spray 3. Pour les sprays 1 et 2, le refroidissement semble plus uniforme. Néanmoins, le spray 3 permet d'accéder à de plus haut flux. Ces résultats sont à mettre en relation avec les valeurs de débit surfacique (Figure 3). On en déduit que le flux extrait augmente avec la valeur du débit surfacique conformément à ce qui est peut être observé dans la littérature. D'autre part, à $r = 2.5 \text{ mm}$ on observe très bien le point de Leidenfrost (point où le flux extrait présente un minimum avant d'augmenter) pour les sprays 1 à 2. Ces points apparaissent pour des températures de paroi (Température de Leidenfrost T_{leiden}) respectives de 200 et 260°C environ. Pour le spray 3, 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. Al-Ahmadi [4] propose effectivement une corrélation de T_{leiden} qui est proportionnel au débit surfacique.

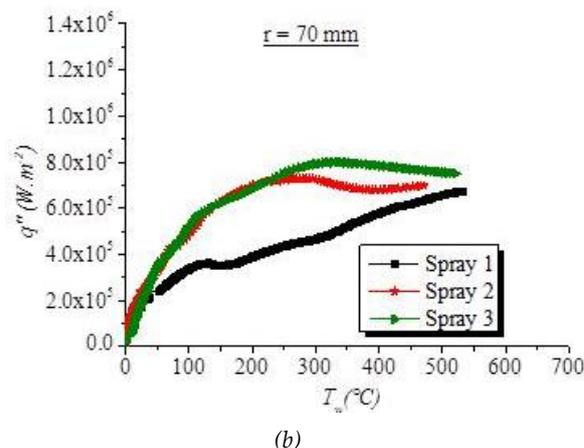
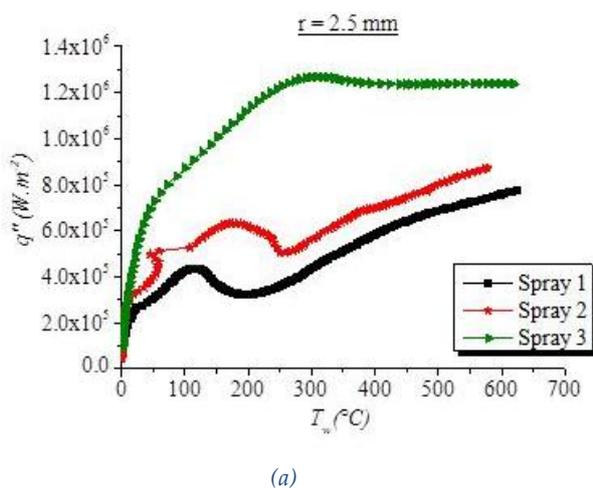


Figure 9 Evolution du flux de chaleur extrait en fonction de la température de surface pour les trois sprays en $r = 2.5 \text{ mm}$ (a) et en $r = 70 \text{ mm}$ (b).

Usuellement, les performances de refroidissement d'un spray est quantifié à l'aide de l'efficacité de refroidissement défini par [21]:

$$\zeta = \frac{q''}{\dot{m}[h_v + c_{pl}(T_{sat} - T_l) + c_{pv}(T_w - T_{sat})]} \quad (2)$$

Elle représente la quantité de chaleur réellement extraite par le spray divisée par la chaleur totale nécessaire pour évaporer complètement le liquide. La Figure 10 présente un exemple d'efficacité de refroidissement obtenu le long du rayon de la plaque à un instant donné durant le régime de Leidenfrost ($T_w = 560^\circ\text{C}$). Les sprays 1 et 3 ont sensiblement la même efficacité et quasi uniforme le long de r . Le spray 2 par contre a la plus grande efficacité mais diminue en s'éloignant du centre. A nouveau, il est possible de corréler l'efficacité avec le débit surfacique (Figure 4) où une augmentation de celui-ci tend à diminuer l'efficacité. Cette tendance générale est également souvent rencontrée dans la littérature. De manière plus générale, Yao&Cox [16] ont proposé une corrélation pour l'efficacité de refroidissement qui est inversement proportionnel à un nombre de Weber, dit Weber spray, basé sur le diamètre de Sauter et le carré du débit surfacique. Il faut toutefois nuancer le bon résultat obtenu pour le spray 2 car il n'est ici représenté qu'à un seul instant. Une étude sur la durée totale du refroidissement est plus appropriée pour pouvoir conclure. C'est l'objet de la section suivante.

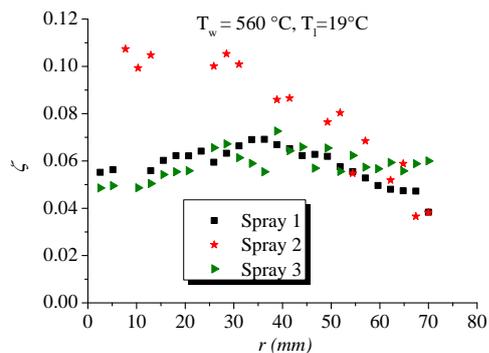


Figure 10 Evolution de l'efficacité de refroidissement le long du rayon pour les trois sprays et pour $T_w = 560^\circ\text{C}$.

7 Comparaison des performances entre les sprays et jets liquides

L'objectif de cette section est de comparer les performances des trois sprays ainsi que celles du jet liquide. Pour cela, il est nécessaire de considérer un interval de température de surface qui soit commun aux trois sprays et au jet liquide. Ici, il est choisi d'estimer la durée nécessaire pour diminuer la température de surface \bar{T}_w de 546 à 27°C . \bar{T}_w est la température moyennée sur toute la surface du disque et calculé à chaque instant selon le calcul suivant :

$$\bar{T}_w(t) = \frac{1}{\pi R_1^2} \int_0^{R_1} T_w(r, t) 2\pi r dr \quad (3)$$

avec $R_1 = 70$ mm selon la remarque ci-dessus (section 3.2). La densité de flux moyennée sur la surface peut être également calculé à chaque instant :

$$\bar{q}(t) = \frac{1}{\pi R_1^2} \int_0^{R_1} q(r, t) 2\pi r dr \quad (4)$$

Ainsi, il est possible d'en déduire l'évolution de l'efficacité moyenne en fonction du temps :

$$\bar{\xi}(t) = \frac{\bar{q}(t)}{\dot{m}_0 [h_v + c_{pl}(T_{sat} - T_l) + c_{pv}(\bar{T}_w(t) - T_{sat})]} \quad (4)$$

avec \dot{m}_0 le débit surfacique moyen calculé à partir des résultats de la Figure 4 excepté pour le jet liquide où le débit surfacique est calculé à partir du débit total (Tableau 1) et en prenant le diamètre du jet (9 mm) pour le calcul de la section d'impact. La Figure 11 décrit l'évolution du flux moyen en fonction du temps pour les trois sprays et le jet liquide. On observe que le spray 3 est le procédé qui refroidit le plus vite avec une durée de refroidissement de 12 s. De plus, jusque $t = 10$ s (i.e. durant près de 90 % de sa durée de fonctionnement), ce spray présente le flux moyen le plus important. Au contraire, même si le flux extrait est assez important, le jet liquide est le moins rapide avec 22.5 s environ. D'autre part, les fortes fluctuations observées jusque $t = 12$ s sont liées aux fortes inhomogénéités du refroidissement : la zone d'impact est effectivement très localisée vers centre de la plaque. Le spray 1 ne donne guère également de bons résultats : faible flux et durée de

refroidissement longue. Le spray 2 semble être l'intermédiaire: durée de refroidissement et flux de chaleur compris entre celles des sprays 1 et 3.

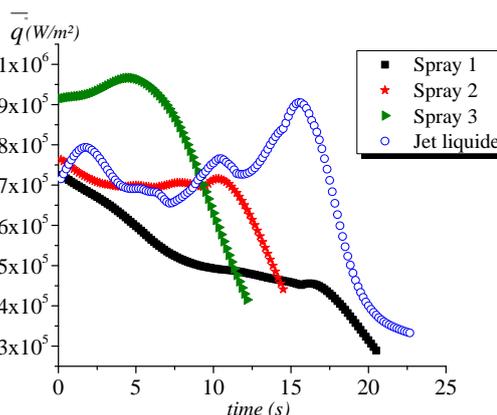


Figure 11 Evolution du flux de chaleur moyen extrait en fonction du temps pour les trois sprays et le jet liquide.

L'évolution temporelle de l'efficacité de refroidissement moyenne est présentée à la Figure 12. Il apparaît que le spray 2 a clairement la plus grande efficacité de refroidissement parmi les quatre procédés utilisés avec 10% environ. Au contraire, celle du jet liquide est la plus faible avec à peine 4%. Les sprays 1 et 3 se situent entre les deux cas précédents. D'autre part, en comparant aux valeurs de \dot{m}_0 , on vérifie bien que l'efficacité diminue avec le débit surfacique moyen.

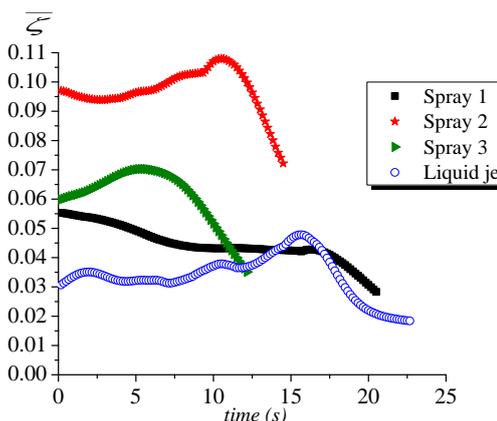


Figure 12 Evolution de l'efficacité de refroidissement moyenne en fonction du temps pour les trois sprays et le jet liquide.

Enfin, la meilleure efficacité observée à la Figure 10 pour le spray 2 est ici confirmée et peut être généralisé à toute la durée du refroidissement.

A partir de ces résultats, il est possible d'établir un bilan global des quatre procédés de refroidissement (Tableau 2). A partir de la densité de flux moyen (Figure 11), il est possible de calculer la densité d'énergie moyenne (J/m^2) prélevée à la surface durant le refroidissement pour les quatre procédés.

Connaissant la durée, on en déduit alors la puissance de refroidissement moyenne, *i.e.* le flux moyen pendant la durée total du refroidissement. On observe que le spray 3 a la plus grande puissance moyenne de l'ordre de 12.6 kW/m². Le jet liquide et le spray 2 arrivent juste derrière avec 10.5 kW/m² environ. Enfin, à partir des débits injectés et des durées de refroidissement (Tableau 1 et 2 respectivement) on peut calculer la consommation d'eau nécessaire aux quatre procédés pour refroidir la plaque dans les mêmes conditions. On observe que le spray 3 obtient le meilleur résultat avec 1.4 l alors que le jet liquide est le procédé qui consomme le plus d'eau avec 2.74 l.

En résumé, les sprays présentent de meilleures performances que le jet liquide. Ensuite, il est plus difficile de conclure sur lequel du spray 2 ou 3 est le meilleur procédé. Tout dépend de ce que l'on cherche : une durée de refroidissement plus courte avec une forte capacité d'extraction de chaleur (et donc une faible consommation d'eau) ou une meilleure efficacité. En tout cas, la différence de comportement entre ces deux sprays peut être liée à l'angle d'évasement, seul paramètre modifié (Tableau 1), et donc la trajectoire des gouttes à l'impact. Le spray 3 ayant un angle d'évasement de 60°, la trajectoire des gouttes serait davantage tangentielle à la paroi. Cela conduirait à un temps de séjour plus long et donc à une plus grande quantité de chaleur extraite.

8 Conclusions

Ce travail a présenté les premiers travaux dédiés à l'étude du refroidissement d'une surface chaude dans des conditions proches de l'industrie. Le refroidissement par jet liquide et spray a également été comparé. Trois sprays ont été étudiés afin de couvrir une 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 kg.m⁻².s⁻¹. Des mesures de PDA ont été entreprises pour 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). D'autre, des mesures de flux de chaleur, réalisées par thermographie infrarouge couplé à un problème de conduction inverse, ont permis de comparer les performances des trois sprays et d'un jet liquide. Il apparait clairement que les sprays présentent de meilleures performances que le jet liquide. Ceci est directement lié aux fortes inhomogénéités du refroidissement du jet liquide lui-même lié à sa faible zone d'impact sur la plaque. Le spray ayant la plus grande efficacité de refroidissement est celui qui a la plus petite valeur de débit surfacique. Par contre, le spray qui permet d'extraire le plus de chaleur et consommer moins

d'eau est celui qui a la plus grande valeur de débit surfacique et le plus grand angle d'évasement. Les prochains travaux auront deux objectifs. Premièrement, réaliser des visualisations par caméra rapide afin d'étudier plus finement l'hydrodynamique de l'impact et éventuellement apporter un élément de réponse au sujet du spray ayant la plus grande efficacité. Puis, il s'agira d'utiliser des sprays ayant des débits surfaciques plus importants afin de s'approcher davantage des conditions industrielles.

9 References

- [1] Choi K.J., Yao S.C., Heat transfer mechanisms of horizontally impacting sprays, *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 30(2):1291-1296, (1987).
- [2] Deb S., Yao S.C., Analysis on film boiling heat transfer of impacting sprays, *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 32(11):2099-2112, (1987).
- [3] Yao S.C., Choi K.J., Heat transfer mechanisms of mono-dispersed vertically impacting sprays, *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 13(2):39-648, (1987).
- [4] Al-Ahmadi H.M., Yao, S.C., "Spray cooling of high temperature metals using high mass flux industrial nozzles," *Experiment in Heat Transfert*, 21: 38-51, (2008).
- [5] Cox T., *Heat transfer experiments and general correlation for sprays of very large droplets*, Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University, (1998).
- [6] Gaugler R.E., *Experimental investigation of spray cooling of high temperature surfaces*, Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University, (1966).
- [7] Hoogendoorn C.J., Valentine W.S., Leidenfrost temperature and heat transfer coefficients for water sprays impinging on a hot surface, *Proc. of 5th Int. Heat Trans. Conf.*, vol. 4, 135-138, (1974).
- [8] Cox T.L., Yao S.C., Heat transfer of sprays of large water drops impinging on high temperature surfaces, *Journal of Heat Transfert*, 121(2): 446-450, (1999).
- [9] Mudawar I., Valentine W.S., Determination of the local quench curve for sprays-cooled metallic surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfert* 7: 107-121, (1989).
- [10] Bernardin J.D. I., Mudawar I., Film boiling heat transfer of droplets streams and sprays, *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 40(11):2579- 2593 (1997).
- [11] Bernardin J.D. I., Clinton J.S., Mudawar I., Mapping of impact and heat transfer regimes of water drops impinging on a polished surface, *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 40(2): 247- 267 (1997).
- [12] Jia W., Qiu H.H., Experimental investigation of droplet dynamics and heat transfer in spray cooling, *Experimental on Thermal and Fluids Sciences*, 27:829-838(2003).
- [13] Chen R.H., Chow L.C., Navedo J.E., Effects of sprays characteristics on critical heat flux in subcooled water sprays cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 45:4033-4043, (2002).
- [14] Puschmann F., Specht E. and Schmidt J., Measurements of sprays cooling heat transfer using an infrared technique in combination with the Phase Doppler technique and a patterator, *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 19: 51-56, (2001).

[15] Yao S. C., Cox T.L., A general heat transfer correlation for impacting water sprays on high-temperature surfaces, *Experiments on Heat Transfert*, 15: 207-219, (2002).

[16] Bolle L., Moureau J.C., Spray cooling of hot surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 1: 1-97, (1982).

[17] Gradeck M., Ouattara J.A., Rémy B., Maillat D., Solution of an inverse problem in the hankel space – infrared thermography applied to estimation of a transient cooling flux. *Experimental Thermal and Fluids Sciences*, 36:56–64 (2012).

[18] Ouattara A., Gradeck M., Maillat D., Remy B., Lebouché M., Solution of IHCP estimation of a nonuniform source using an inverse heat conduction method based on an analytical solution. *Proc of Eurotherm*, (2008)

[19] Maillat D., André S., Barsale J., Degiovanni A., Moyne C. *Thermal Quadrupoles - Solving the heat equation through integral transforms*, (Chisester: Wiley, 2000).

[20] Cossali G.E, Marengo M., Santini M., Single-drop empirical models for spray impact on solid walls: a review," *Atomization and Sprays*, 15: 699-736 (2005).

[21] Pederson C.O., An experimental study of the dynamic behavior and heat transfer characteristics of water droplets impinging upon a heated surface," *International Journal of Heat and Mass Transfert*, 13:369-381, (1970).

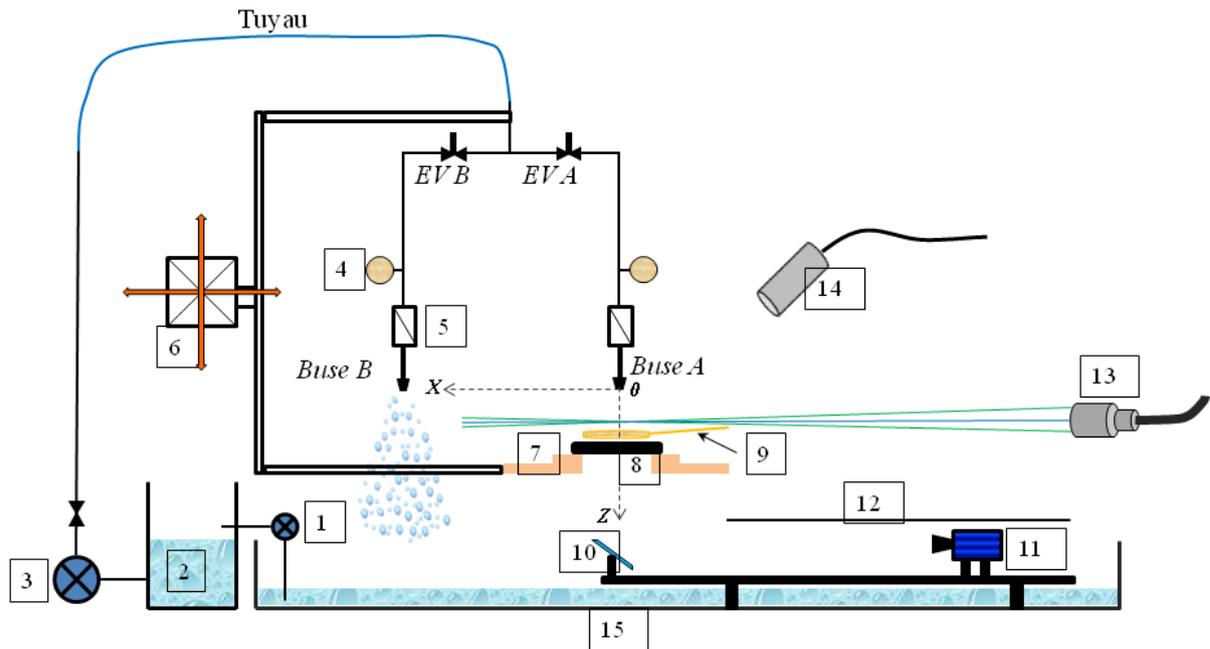


Figure 1 Dispositif expérimental : (1) et (3) pompes hydrauliques, (2) bac d'eau intermédiaire, (4) manomètre, (5) débitmètre magnétique, (6) système de déplacement 3D, (7) support isolant en quartz, (8) disque de nickel, (9) inducteur rétractable, (10) miroir à 45°, (11) caméra IR, (12), capot de protection, (13) et (14) sonde d'émission laser et de réception PDA.

Procédé	Energie prélevée (J/m ²)	Durée de refroidissement (s)	Puissance de refroidissement moyen (W/m ²)	\dot{m}_0 (kg/m ² /s)	Debit injecté (l/mn)	Consommation (l)
Spray 1	160 797	20.5	7 921	4.08	6.7	2.3
Spray 2	154 929	14.3	10 886	2.44	6.7	1.7
Spray 3	151 399	12.2	12 616	4.74	6.7	1.4
Jet liquide	235 124	22.7	10 449	7.25	6.7	2.74

Table 2 Comparaison des performances de refroidissement entre les sprays et le jet liquide.