

Etude des transferts thermiques d'une paroi concave soumise à l'impact d'un jet plan en milieu confiné pour différentes conditions de sortie du jet

Thi Kim Dung HOANG^{1,2*}, Mathieu FENOT¹, Laurent Emmanuel BRIZZI², Eva DORIGNAC¹

¹Laboratoire d'Etudes Thermiques

ENSMA – 1, avenue Clément Ader – 86961 Futuroscope Chasseneuil Cedex

²Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques

Bâtiment K – Campus Universitaire Sciences – 40, avenue du Recteur Pineau – 86022 Poitiers Cedex

* (auteur correspondant : dung.hoang@lea.univ-poitiers.fr)

Résumé – Des études antérieures sur l'impact d'un jet plan sur une paroi concave à petite courbure relative ont mis en évidence un phénomène de battement du jet. Ce phénomène de battement a été étudié pour expliquer les transferts thermiques obtenus dans cette étude. Nous avons notamment observé la quasi-uniformité du coefficient d'échange. La variation de la condition de sortie modifie fortement ce coefficient d'échange et un effet progressif de cette modification a été observé.

Nomenclature

b	largeur de la fente, mm	S	coordonnée curviligne, mm
Dc/b	courbure relative	T_{ad}	température adiabatique de la paroi, K
e	condition de sortie, mm	T_p	température en face avant de la paroi, K
H/b	hauteur d'impact	u', v'	vitesse fluctuation, $m.s^{-1}$
h	coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$	U_j	vitesse d'injection, $m.s^{-1}$
\bar{h}	coefficient d'échange moyen, $W.m^{-2}.K^{-1}$		<i>Symbole grec</i>
It	intensité turbulence $\left(It = \sqrt{u'^2 + v'^2} / U_j \right)$	φ_{conv}	densité de flux convectif, $W.m^{-2}$
Re	nombre de Reynolds ($Re = U_j b / \nu$)	ν	viscosité cinématique, $m^2.s^{-1}$

1. Introduction

Depuis de nombreuses années, beaucoup d'études ont porté sur l'impact du jet simple ou multiple sur des parois planes en raison de leur fort potentiel concernant les transferts thermiques. Récemment, l'intérêt s'est déplacé sur l'impact en présence de parois courbes (convexe/concave). En effet, le rôle exact de la courbure sur le transfert de masse et/ou de chaleur reste encore mal connu. Pour aborder cette problématique nous avons entrepris, depuis quelques années, l'étude aérothermique de l'écoulement généré par l'impact d'un ou plusieurs jets sur une surface concave.

Gilard & Brizzi [1] ont observé l'existence d'un phénomène de battement du jet pour le cas d'un jet plan confiné frappant une surface d'impact de petite courbure relative. Le jet oscille autour de trois positions semi-stables différentes. L'oscillation du jet fait uniformiser le transfert thermique sur la paroi d'impact (étude numérique de Suh et al. [4]). D'après Nada [3] et Yang et al. [5], le transfert thermique est maximal au point d'impact et correspond à la position où se trouve le maximum d'intensité de turbulence.

De plus, Hoang et al [2] remarquent que le battement observé dans [1] est contrôlable en agissant sur les conditions de sortie. Une recirculation de l'écoulement est observée et est sensiblement changée avec la condition de sortie. Kornblum & Goldstein (1997) ([6]) suggèrent que cette recirculation de l'écoulement provoquerait l'augmentation de la température du fluide près de la surface d'impact. Les coefficients d'échange étant calculés à

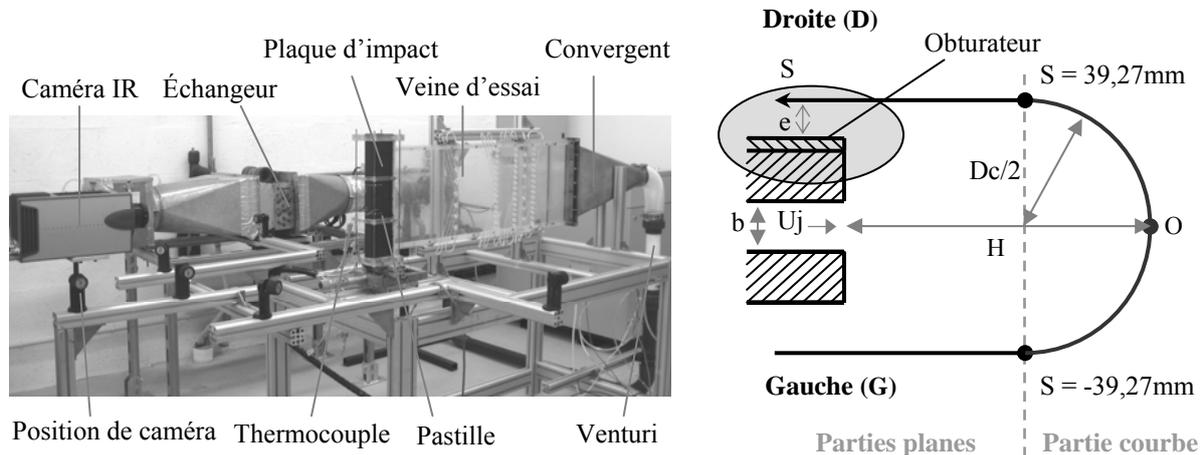
partir de la température d'injection du jet, cette montée en température du jet provoquerait la chute des coefficients d'échange.

L'intérêt des études citées ci-dessus est l'impact d'un jet plan/rectangulaire sur une paroi courbe (concave/convexe). Dans l'optique d'utiliser ce type de jet plan pour l'optimisation du refroidissement d'une paroi concave, nous proposons d'étudier l'influence de la condition de sortie (e), variant de 0 (fermé) à 10 mm (ouvert), sur les échanges convectifs à la paroi entre un jet plan et une paroi concave pour tenter de corréler les phénomènes thermiques à la paroi aux phénomènes aérodynamiques [1] et [2].

2. Dispositif expérimental et technique d'essai

2.1. Dispositif expérimental

La figure 1a présente l'ensemble de dispositif expérimental. Le jet plan est réalisé grâce à un canal parallélépipédique rectangle de 955mm de longueur, 300mm de largeur et une hauteur de 10mm constitué de parois transparentes en Altuglas de 10mm d'épaisseur. En amont du canal se trouvent une grille et un nid d'abeilles afin d'uniformiser l'écoulement. Le jet plan a une hauteur b fixe de 10mm et une largeur L de 300mm. Le rapport d'allongement du jet bidimensionnel est donc de $L/b = 30$.



a – Dispositif expérimental

b – Condition de sortie (zone colorée)

Figure 1 : Détail du dispositif expérimental

La paroi d'impact concave est composée d'un demi-cylindre (400mm de long et 50mm de diamètre) prolongé de deux parties planes (400mm de long et $\approx 60\text{mm}$ de large); l'ensemble est fermé latéralement par des plaques d'épaisseur de 10mm. Cette plaque est en époxy ($0,2\text{mm}$ d'épaisseur, conductivité thermique $0,29 \pm 0,02\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ dans le sens de l'épaisseur) et est recouverte sur la surface d'impact (face avant), d'une fine couche de cuivre de $35\mu\text{m}$ dans laquelle a été gravée trois circuits électriques qui permettent le chauffage de la paroi par effet Joule. La largeur de piste de cuivre est de 1 mm, l'interpiste de 0,2 mm. Ces dimensions assurent l'uniformité du flux électrique dissipé. Afin d'améliorer la précision de mesure de la caméra infrarouge, la face arrière est peinte en noir de façon à obtenir une émissivité élevée et uniforme ($0,95 \pm 0,02$). La plaque a, de plus, été équipée, sur la longueur et sur le rayon de courbure de pastilles autocollantes de faibles émissivités, permettant ainsi la mise au point de la caméra infrarouge et le repérage géométrique.

Ce dispositif d'essais est alimenté grâce à un ventilateur APE 801 C ($3\text{m}^3/\text{min}$, 11368Pa 5,3kW, 2900tr/min). La mesure du débit massique est effectuée par l'intermédiaire d'un venturi dont le principal intérêt est la faible perte de charge qu'il engendre. Le venturi est relié

à un manomètre différentiel (JUMO 404304 /000-412-415-02-298, 0-5mbar) ainsi qu'à un manomètre absolu (JUMO 404304/000-412-415602-292, 800-1200mbar). Un thermocouple (chromel/alumel) mesure la température en sortie du venturi. Enfin un échangeur thermique permet de contrôler la température de l'écoulement. Tous les éléments de ce système d'alimentation (ventilateur, vannes, débitmètres et régulateur thermique) sont reliés entre eux à l'aide de conduites souples de 80mm de diamètre. Le système d'alimentation est relié au canal grâce à un convergent métallique rond/rectangle.

En résumé, pour cette étude sont fixés le nombre de Reynolds, $Re_b = 3200$, la hauteur d'impact $H/b = 7$, la courbure relative $Dc/b = 5$. Les paramètres d'influence sont les conditions de sortie. En condition de sortie, nous obstruons la partie droite (Figure 1b) à l'aide d'une plaque plane (300mm de largeur, 50mm de longueur et (10-e)mm d'épaisseur). Cette obstruction sera variable, $e = 0$ à 10 mm ($e = 0$ correspond à une obstruction totale de la partie droite, $e = 10$ mm à une ouverture maximale).

2.2. Technique d'essai

Le transfert de chaleur locale, dû à l'impact du jet, est déterminé en utilisant une méthode basée sur l'emploi simultané de la technique du film chauffant et de la thermographie infrarouge [7]. A partir des résistances locales des circuits chauffants et des intensités des courants traversant les circuits, on détermine la densité de flux électrique dissipée et, en tenant compte des pertes, on déduit la densité de flux, φ_{conv} , échangé entre la paroi et le jet. Pour une densité de flux fixée, la distribution de température de la plaque d'impact est mesurée grâce à une caméra infrarouge matricielle CEDIP Jade MWIR (320x240 détecteurs en InSb, 3,6-5,1 μ m). La fréquence d'acquisition est de 50 Hz, et une moyenne est effectuée sur l'ensemble des images acquises par la caméra durant un laps de temps de 10 secondes (500 images) à l'aide du logiciel Altaïr (système DANTEC). Un bilan thermique au niveau de la paroi, avec l'hypothèse d'une conduction monodimensionnelle (hypothèse vérifiée numériquement, valable du fait de l'homogénéité du flux imposé, et de la faible épaisseur de la plaque), permet ensuite de déterminer la température de la face avant, T_p . A partir de la loi de Newton (où la température adiabatique de paroi est prise comme température de référence), on peut écrire: $h = \varphi_{conv} / (T_p - T_{ad})$ ou $T_p = \varphi_{conv} / h + T_{ad}$. Ainsi, pour 5 couples (φ_{conv} , T_p), il est possible, par régression linéaire, de déterminer le coefficient d'échange h et la température adiabatique de paroi T_{ad} . Les valeurs de h sont obtenues à $\pm 12\%$ près.

Du fait de la courbure de la plaque d'impact, l'enregistrement des températures sur ensemble de la paroi nécessite cinq positions successives de la caméra. Bien que les pastilles réfléchissantes permettent normalement un repérage précis, les changements de position de la caméra peuvent entraîner un décalage de position pour une même scène prise à des flux différents. Ceci à pour effet d'entraîner des décalages sur la position curviligne ($S = \pm 1$ mm).

3. Résultats

3.1. Quasi-uniformité du coefficient d'échange

Le figure 2 présente la distribution du coefficient d'échange obtenu par thermographie infrarouge pour les paramètres $Re_b = 3200$; $H/b = 7$ et $Dc/b = 5$ (cas de référence). On observe que cette répartition est légèrement dissymétrique par rapport à l'origine de la partie courbe du fait de l'environnement radiatif du banc d'essais (présence du mur côté gauche).

Il existe trois zones différentes de coefficient d'échange: une zone uniforme du coefficient d'échange dans la partie courbe de la plaque d'impact ($\approx 60 \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) et deux zones à fort coefficient d'échange ($\approx 70 \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) situées en parties droites de la plaque autour de $S = \pm 55$ mm. Cette répartition peut être expliquée par l'oscillation du jet autour de trois positions

différentes [4], oscillation mise en évidence par la même configuration expérimentale en aérodynamique ([1], [2]).

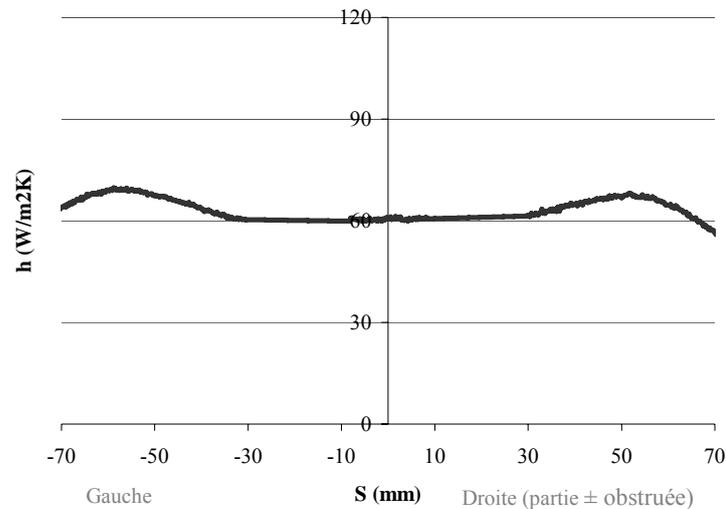


Figure 2 : Distribution du coefficient d'échange pour $Re_b = 3200$, $H/b = 7$ & $Dc/b = 5$

3.2. Condition de sortie

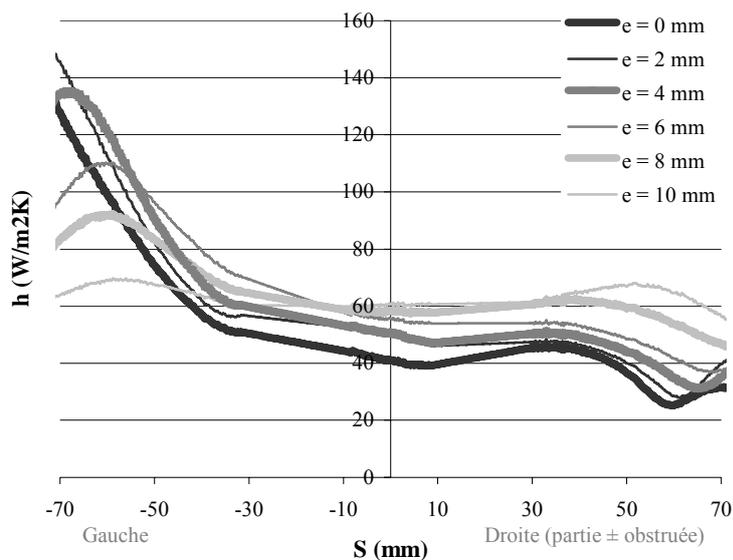
La condition de sortie est très facile à réaliser et à gérer. Ainsi, pour avoir différentes conditions de sortie, nous utilisons des obturateurs d'épaisseurs différentes placés dans la partie droite de la paroi. La figure 3 montre que cette condition influence fortement le transfert de chaleur sur la paroi d'impact. Un sensible changement de condition de sortie peut modifier fortement le comportement du coefficient d'échange.

La distribution du coefficient d'échange est quasi-symétrique dans le cas référence (figure 2). Cette symétrie du coefficient d'échange est légèrement détruite quand la condition de sortie diminue de 10 à 6mm. En effet, pour ces conditions de sortie, l'étude aérodynamique [2] montre que l'oscillation de l'impact du jet en trois positions différentes existe toujours, mais de ces trois positions, celle située à l'opposé de la partie obstruée est la plus fréquente. Le transfert thermique est fortement dissymétrique pour une condition de sortie plus petite (e de 0 à 4mm). Une zone où la valeur du coefficient d'échange est très importante apparaît en partie non-obstruée et est située en partie plane de la plaque d'impact. Cette zone tend vers la sortie du canal à gauche quand la condition de sortie à droite diminue de 4 à 0mm. Ce comportement est dû au phénomène de stabilisation du jet à une position, comportement proche de celui de l'impact d'un jet sans battement, et donc d'après Nada [3] et Yang et al. [5], on obtient un seul maximum important de coefficient d'échange à cette position. On peut constater que la stabilisation du jet entraîne une importante valeur maximale du coefficient d'échange tandis que l'oscillation du jet tend à « uniformiser » le transfert thermique sur la paroi d'impact.

De plus, dans Hoang et al. [2], quand la partie droite est obstruée ($e = 0$), une zone de recirculation de l'écoulement est nettement observée. Cette recirculation provoque une chute des coefficients d'échange. Elle apparaît pour des distances à l'origine plus petites quand la condition de sortie est plus faible. Ce qui explique le déplacement du minimum du coefficient d'échange en partie obstruée vers la sortie droite du canal quand e augmente. Ce minimum est nettement observé pour le cas de petite condition de sortie (e de 0 à 4mm) mais il ne l'est plus pour les cas à grande condition de sortie (e de 6 à 10mm). L'absence du minimum du coefficient d'échange à grande condition de sortie est expliquée soit par un très faible écoulement retour soit par la limite physique du montage étudié.

Afin de faciliter la comparaison entre différentes configurations d'étude, nous avons choisi de tracer (Figure 4) les deux valeurs maximales du coefficient d'échange qui se trouvent sur les parties droites de la plaque d'impact à gauche et à droite en fonction de la condition de sortie, e . Sur la figure 3, on n'observe pas de valeur maximale pour le coefficient d'échange sur la partie gauche pour les configurations $e = 0$ et 2mm à cause de la limite physique de notre montage (plaque chauffante trop petite). Par conséquent, les valeurs de ces configurations ($e = 0$ et 2mm), en figure 4, sont interpolées à partir des valeurs observées pour les autres valeurs de e . On note que l'effet de la condition de sortie est plus important en partie non-obstruée qu'en partie obstruée. L'écart des deux maxima obtenus diminue linéairement avec l'augmentation de e (Figure 4).

Le tableau 1 présente les valeurs de h moyen en fonction de e . Ces moyennes sont calculées suivant l'abscisse curviligne S de la paroi concave. On constate que le coefficient d'échange moyen est sensiblement constant pour e de 4 à 10mm . Par contre, pour $e = 0$ et 2mm , ces valeurs de h moyen sont plus faibles. Cette différence peut être attribuée à la paroi chauffante qui semble ne pas être suffisamment large pour observer entièrement la distribution du coefficient d'échange particulièrement pour le cas $e = 0$ et 2mm (la position du plus fort maximum de h de ces cas semble située en dehors de la limite physique de notre montage), notamment la valeur maximale du h n'est pas visible ce qui conduit à une valeur de h moyen plus faible.



e	\bar{h}
0	(52,7)
2	(58,8)
4	62,4
6	65,2
8	64,9
10	63,1

Figure 3 : Variation du coefficient d'échange à différentes conditions de sortie (e)

Tableau 1 : Coefficient d'échange moyen à différents e

3.3. Comparaison aérodynamique et thermique

Pour effectuer la comparaison des études en aérodynamique et en thermique, nous avons tracé (Figure 5) les positions des valeurs maximales de l'intensité turbulente (S_{ltmax} , mesurée par PIV) et du coefficient d'échange (S_{hmax}). Ces positions sont toujours situées à gauche sur la partie plane de la paroi d'impact ($S \leq -55\text{mm}$). On constate une augmentation linéaire de ces positions avec l'augmentation de la condition de sortie (de gauche à droite, figure 5). Plus la condition de sortie est grande, plus la position de l'impact du jet se situe en un point proche de la partie courbe de la plaque d'impact d'après l'étude aérodynamique [2], et donc les positions des valeurs maximales de l'intensité de turbulence et du coefficient d'échange sont elles aussi plus proches de la partie courbe (donc proches de $S = -55\text{mm}$).

Un faible écart entre S_{hmax} et S_{Itmax} est obtenu pour toutes les différentes conditions de sortie (Figure 5). Ce phénomène est dû à la coïncidence des positions de valeur maximum de l'intensité de turbulence et du coefficient d'échange ([3], [5]).

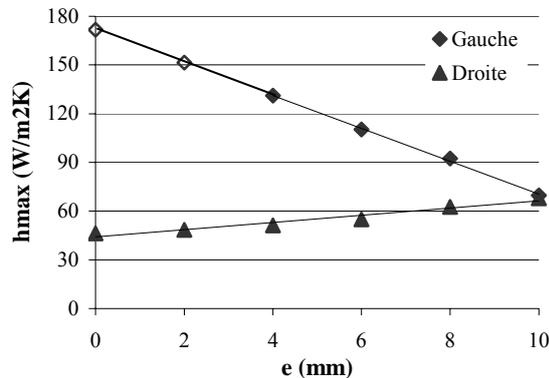


Figure 4 : Coefficient d'échange maximal à différentes conditions de sortie (e)

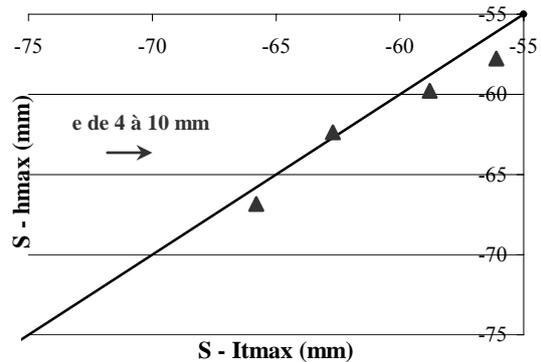


Figure 5 : Positions des intensités turbulentes maximales et des coefficients d'échange maxima

4. Conclusion

La condition de sortie est très simple de mise en œuvre, et elle a une forte influence sur le transfert thermique de la paroi d'impact. La valeur du coefficient d'échange en partie non obstruée est toujours plus importante que celle en partie obstruée. La distribution de h tend vers une allure symétrique quand e augmente jusqu'à 10mm. Pour e allant de 0 à 4mm, un important maximum de h est trouvé en partie non-obstruée du fait d'un impact de jet sans battement. Un minimum de h est observé en partie obstruée du fait de la présence d'un écoulement retour. Cependant, pour les grandes conditions de sortie (e allant de 6 à 10 mm) en partie droite, il y a toujours deux maxima et aucun minimum de h n'est observé. L'influence de la condition de sortie est la même en aérodynamique et en thermique. La stabilité du jet à une position (condition de sortie e allant de 0 à 4mm) fait diminuer la différence entre les résultats en aérodynamique et les résultats en thermique, alors que cette différence est plus importante lorsqu'il existe l'oscillation du jet autour de trois positions semi-stables différentes (e allant de 6 à 10mm).

Références

- [1] V. Gilard & L. E. Brizzi, Slot jet impinging on a concave curved wall, *Journal of Fluids Engineering*, (2005), vol. 127, 595-603.
- [2] T. K. D. Hoang, L. E. Brizzi & E. Dornnac, Influence des conditions d'entrée/sortie pour un jet plan impactant une surface concave en milieu confiné, *18^{ème} Congrès Français de Mécanique*, (Grenoble, 27-31 août 2007).
- [3] S. A. Nada, Slot/slots air jet impinging cooling of a cylinder for different jets-cylinder configurations, *Heat Mass Transfer*, (2006), Vol. 43, 135-148.
- [4] Y. K. Suh, J. H. Park, E. C. Jeon & J. W. Kim, A numerical study on the oscillatory impinging jet, *SAE 2004 World Congress & Exhibition*, (2004).
- [5] G. Yang, M. Choi & J. S. Lee, An experimental study of slot jet impingement cooling on concave surface: effects of nozzle configuration and curvature, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (1999), Vol. 42, 2199-2209.
- [6] Y. Kornblum & R. J. Goldstein, Jet impinging on semicircular concave and convex surfaces – Part two: Heat transfer, *The Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation: International Symposium*, (Moscow, 21-24 mai 1997).
- [7] M. Fénot, J. J. Vullierme & E. Dornnac, A heat transfer measurement of jet impingement with high injection temperature, *CR Académie des Sciences*, (2005), Vol. 333, N°10, pp 778-782.