

Étude expérimentale d'une interaction de jets obliques avec un écoulement transversal compressible. II. Effets du taux d'injection sur les transferts thermiques en surface¹

Rabah Dizene^{a,2}, Eva Dorignac^{b*}, Jean-Marc Charbonnier^{a,3}, Roger Leblanc^a

^a Laboratoire d'études aérodynamiques, Centre d'études aérodynamiques et thermiques, Université de Poitiers, 43, route de l'Aérodrome, 86036 Poitiers cedex, France

^b Laboratoire d'études thermiques, ENSMA, BP 40109, 86961 Futuroscope Chasseneuil cedex, France

(Reçu le 12 novembre 1998, accepté le 30 juillet 1999)

Résumé — Cet article présente une étude expérimentale d'une rangée de jets entrant dans un écoulement transsonique ($M = 0,72$). On étudie l'influence du taux d'injection R , défini par le rapport du débit massique de l'écoulement injecté sur celui de l'écoulement principal, sur l'interaction des deux écoulements en général et sur les transferts thermiques en surface en particulier. Le champ des vitesses est obtenu à l'aide des mesures de pression totale et de température. Par thermographie infrarouge, on mesure les valeurs de la température de surface qui permettent d'identifier les flux de chaleur pariétaux. Les mesures sont effectuées pour trois valeurs de R (0,24, 0,37 et 0,50). Les résultats montrent l'existence d'une efficacité de refroidissement optimale au voisinage et en aval des orifices d'injection pour une valeur de R voisine de 0,37. Le taux d'injection plus élevé entraîne un décollement des jets de la paroi accompagné d'une réduction de l'effet de film des jets. Un taux d'injection plus faible induit un mélange trop important avec la couche limite de l'écoulement amont et diminue aussi l'effet de film produit par les jets. © 2000 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

refroidissement / efficacité / rapport d'injection / interaction / jet / compressibilité / transfert thermique

Abstract — Experimental study of inclined jets cross flow interaction in compressible regime. II. Effect of injection rate on surface heat transfer. An experimental study of a row of jets entering in a transonic mainstream ($M = 0.72$) is carried out in order to investigate the influence of the injection rate, defined as the ratio of the mass fluxes per unit surface of the jet to the cross flow fluids, on the interaction of the two flows and on the wall heat transfer. The velocity field is derived from total pressure and temperature measurements. Infrared thermography technique is used to identify the wall surface heat transfer. Experiments are carried out for three values of the injection rate $R = 0.24, 0.37$ and 0.50 . The experiments indicate the existence of an optimum film effectiveness for a value of R close to 0.37 . A higher injection rate leads to a higher penetration of the jet in the cross flow with an associated reduction of the film cooling effect due to the injection of cross flow fluid under the jets. A lower injection rate induces a higher mixing of the jet fluid with the incoming boundary layer flow which also reduces the film efficiency. © 2000 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

cooling / effectiveness / blowing rate / interaction / jet / compressibility / heat transfer

Nomenclature

D	diamètre des tubes d'injection	m	
		h	coefficient de transfert de chaleur par convection $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
		M	nombre de Mach
		P	pression $N \cdot m^{-2}$
		R	rapport d'injection basé sur les débits massiques $= \rho_j u_j / (\rho_e u_e)$
		R_2	rapport d'injection basé sur les débits de quantité de mouvement $= \rho_j u_j^2 / (\rho_e u_e^2)$
		T	température totale locale et moyenne K
		u, v	composantes longitudinale et verticale de la vitesse moyenne $m \cdot s^{-1}$

* Correspondance et tirés à part.
 dorignac@let.ensma.fr

¹ La première partie de ce travail a fait l'objet d'une publication dans le n° 3 du volume 39 de l'Int. J. Therm. Sci.

² Actuellement à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène (USTHB), Institut de Génie Mécanique (IGM), BP 32, El-Alia, 16111 Bab Ezzouar, Alger (Algérie).

³ Actuellement Aeronautics/Aerospace Department, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, steenweg op Waterloo 72, B-1640 Sint-Genesius-Rode, Belgique.

u', v'	composantes longitudinale et verticale de la vitesse fluctuante . . .	$m \cdot s^{-1}$
X, Y et Z	distances respectivement longitudinale, verticale et transversale	m

Symboles grecs

$\phi(x, z)$	densité de flux de chaleur pariétal . .	$W \cdot m^{-2}$
$\phi_0(x_{amont}, z)$	densité de flux de chaleur pariétal moyenne en amont de l'injection . .	$W \cdot m^{-2}$
$\phi_w(x, z)$	densité de flux de chaleur pariétal adimensionnelle $= \phi(x, z) / \phi_0(x_{amont}, z)$	
η	efficacité de refroidissement basée sur la température de film $= (T_w - T_r - \phi/h) / (T_{gj} - T_r)$	
η_{aw}	efficacité adiabatique de refroidissement $= (T_{aw} - T_r) / (T_{gj} - T_r)$	
θ	température statique adimensionnelle $= (T - T_e) / (T_j - T_e)$	
θ_w	température pariétale adimensionnelle $= (T_w - T_{ge}) / (T_{gj} - T_{ge})$	
ρ	masse volumique du fluide considéré	$kg \cdot m^{-3}$

Indices

aw	relatif à la condition de paroi adiabatique en présence de jets
e	relatif à l'écoulement transversal
g	conditions génératrices
j	relatif aux jets
r	relatif à la condition de paroi adiabatique en l'absence d'injection
w	relatif à la paroi

1. INTRODUCTION

L'étude présentée est la seconde partie d'un programme de recherches engagé sur le refroidissement des aubes de turbines. Dans la première partie [1], les champs aérothermiques derrière une rangée de cinq jets en écoulement compressible à $M = 0,72$ ont été comparés à ceux mesurés pour la même configuration en écoulement incompressible ($M = 0,1$). Il a été démontré que pour des taux d'injection R très voisins, les jets en régime compressible pénétraient plus haut dans l'écoulement transverse. Cette différence de comportement entre les deux régimes d'écoulement s'accompagne d'une perte d'efficacité des jets par rapport au régime incompressible. Il

a donc été conclu que si les expériences en régime incompressible pouvaient fournir une bonne indication de la configuration optimale de refroidissement, il restait nécessaire d'affiner les résultats par des expériences en régime compressible. Ceci fait l'objet du présent article dans lequel la densité de flux de chaleur pariétal est mesurée et analysée pour trois valeurs du taux d'injection : $R = 0,24, 0,37$ et $0,50$, choisis grâce aux résultats de la première partie de cette étude.

Kim et Benson [2, 3] ont étudié numériquement l'interaction d'une rangée de jets droits sortant dans un écoulement subsonique pour $R = 0,6$. Les résultats obtenus leur ont permis de donner une description détaillée de l'interaction et confirmer l'existence, pour ce taux d'injection, de trois types de tourbillons qui caractérisent l'interaction : le tourbillon en fer à cheval, les tourbillons contrarotatifs (ou la vorticité primaire) et les tourbillons de cisaillements (ou la vorticité secondaire). La vorticité primaire se caractérise par deux tourbillons contrarotatifs qui coupent la section transversale du jet en deux. La vorticité secondaire issue de la couche limite du jet dans le conduit d'injection, est amplifiée par la force de cisaillement exercée par l'écoulement transversal sur le jet. Il est à noter que la différenciation entre ces deux catégories reste matière à discussion. Le tourbillon en fer à cheval est généré par le gradient de pression adverse élevé, induit par le jet en pénétrant dans l'écoulement transverse. Zhang et al. [4] ont confirmé l'existence de ces structures à l'aide d'une simulation numérique de l'interaction d'un jet seul incliné sortant dans un écoulement turbulent incompressible. Leur évolution, leur effet et leur diffusion varient en fonction de la valeur du rapport d'injection et de l'angle d'inclinaison. Cette variation devrait donc être contrôlée selon les objectifs fixés et les applications à utiliser. Les tourbillons contrarotatifs sont détectés même à faible taux d'injection ($R < 1$). Pour $R = 0,7$, ils diffusent rapidement dans la zone de mélange turbulent, à l'intérieur de la couche limite. Leurs effets sur les transferts thermiques par convection se situent dans le sens d'une augmentation du coefficient de transfert, mais cette augmentation reste cependant limitée en étendue. L'étude ne donne pas clairement de règles pour le choix de R et de l'angle d'inclinaison. Elle recommande seulement que la configuration géométrique et le taux d'injection soient choisis pour générer une vorticité dont le type et le lieu d'évolution permettront d'atteindre les objectifs fixés préalablement.

Outre ces études numériques, plusieurs études expérimentales ont décrit, sur la base des résultats obtenus, le champ d'écoulement suivant les injections. Goldstein et al. [5, 6] ont conduit des expériences pour comprendre essentiellement l'effet du rapport d'injection sur l'inter-

action. Le résultat principal de cette étude est l'obtention d'une efficacité de refroidissement maximale pour $R = 0,5$. Kruse [7] s'est intéressé au même problème et a trouvé qu'une augmentation de R , combinée avec des variations de paramètres géométriques (angle d'injection) permet d'accroître le coefficient d'échange thermique. Ses résultats montrent également que l'efficacité et le coefficient d'échange deviennent plus uniformes pour des angles d'injection faibles. Brown et Saluja [8] ont montré que les jets décollent de la paroi sans jamais y recoller dès que le rapport d'injection devient supérieur à 0,6. Ce résultat a aussi été observé par Foss [9] et conduit à conclure que la valeur optimale de R pour obtenir une efficacité maximale des transferts se situe en dessous de 0,6. Cette conclusion est confortée par les résultats de Liess [10, 11] qui montrent que le maximum de l'efficacité de refroidissement au voisinage des orifices d'injection est atteint pour $R = 0,5$. Goldstein et Taylor [12] confirment à l'aide de mesures de transfert de masse que l'efficacité maximale de refroidissement est obtenue pour de faibles valeurs de R ($0 < R < 1$). Bousgarbiés et al. [13] ont mesuré ces coefficients sur une maquette présentant les mêmes caractéristiques géométriques que celles décrites en *figure 1*, pour deux valeurs d'injection $R = 0,6$ et $1,6$ en écoulement incompressible ($M = 0,1$). Les résultats obtenus dans le champ d'interaction tridimensionnel montrent une bonne concordance avec la description donnée notamment par Kim et Benson [2, 3].

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET TECHNIQUES DE MESURES

Les expériences ont été conduites dans la soufflerie transsonique TRE40×80, du laboratoire d'Etudes Aérodynamiques avec le même montage expérimental que celui décrit dans la première partie du travail [1]. On rappelle que le plancher de la veine d'essai comporte cinq jets de diamètre $D = 5 \cdot 10^{-3}$ m, disposés perpendiculairement à la direction de l'écoulement dans la veine, distants de 15 mm ($3D$) et inclinés d'un angle de 45° par rapport à la paroi (*figure 1*). Le nombre de Mach dans la veine d'essai a une valeur moyenne de 0,72 et la température de l'air des jets est maintenue à 333 K. Les trois valeurs du rapport d'injection $R = 0,24, 0,37$ et $0,50$ sont obtenues en modulant les pertes de charge par la modification de la longueur des tubes d'injection.

Les mesures de température de paroi ont été effectuées par la technique de la thermographie infrarouge. La densité de flux en surface est déduite de l'application de la méthode numérique développée par Dorignac [14] ba-

sée sur un modèle de conduction stationnaire dans la paroi avec prise en compte de la température inférieure du plancher maintenue constante à 333 K et de la température supérieure fournie par la caméra infrarouge comme conditions aux limites. Avec les conditions opératoires, lorsque le régime stationnaire est atteint, la température de surface supérieure du plancher (en l'absence d'injection) est d'environ 313 K. Pour la température génératrice de l'écoulement transversal de 293 K, on observera donc un flux de chaleur dirigé de la paroi vers l'écoulement que l'on notera comme positif. Dans l'hypothèse d'une efficacité optimale des jets dont la température génératrice est égale à 333 K, le flux de chaleur deviendrait négatif dans la mesure où les jets réchaufferaient la paroi (conditions thermiques inversées).

Les mesures de température moyenne dans l'écoulement en pleine veine et dans l'écoulement des jets sont effectuées par des sondes thermocouples, constituées d'un couple chromel-alumel type K (fils de 0,05 mm de diamètre). La soudure entre les fils est une sphère de 0,5 mm de diamètre environ. L'étalonnage du facteur de récupération, réalisé sur un banc TSI 1125 avec un nombre de Mach du jet variable entre 0 à 1, conduit à une valeur constante égale à 0,88.

Les mesures de pressions totale sont effectuées à l'aide d'une sonde Pitot de 0,6 mm de diamètre extérieur. Les pressions totales permettent de définir un nombre de Mach local sous l'hypothèse que la pression statique mesurée en paroi est uniforme dans la section d'essai correspondant à l'abscisse X de mesure. Cette approche est limitée aux valeurs $X/D > 2$ pour lesquelles on retrouve une bonne uniformité de la pression statique. Le nombre de Mach ainsi déduit sera utilisé pour dépouiller les mesures de température fournies par la sonde thermocouple et obtenir ainsi la température statique et la vitesse locales. A titre indicatif, on a cependant calculé les vitesses comme ci-dessus pour les valeurs de $X/D < 2$.

L'incertitude sur le taux d'injection est estimée à 6 % et les incertitudes sur le flux de chaleur pariétal et sur l'efficacité de refroidissement sont estimées à 10 % et 6 % respectivement.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les comparaisons avec le modèle d'injection utilisé en incompressible et les résultats des travaux trouvés dans la littérature ont incité à conduire des études sur les effets du rapport d'injection sur l'efficacité de refroidissement. Les transferts thermiques rencontrés dans les problèmes de

Schéma de la soufflerie transsonique TRA 40X80

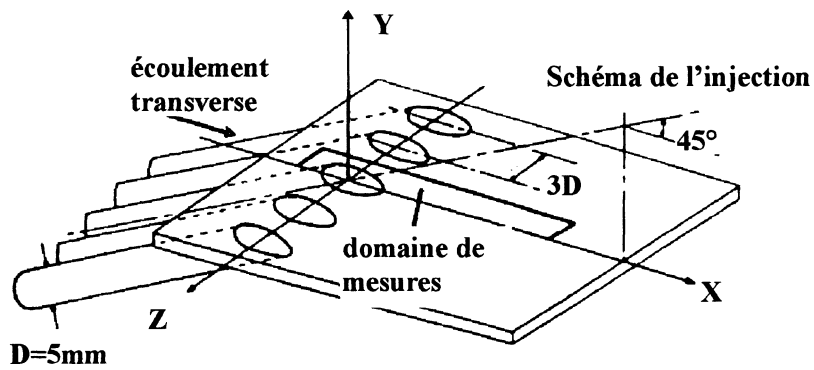
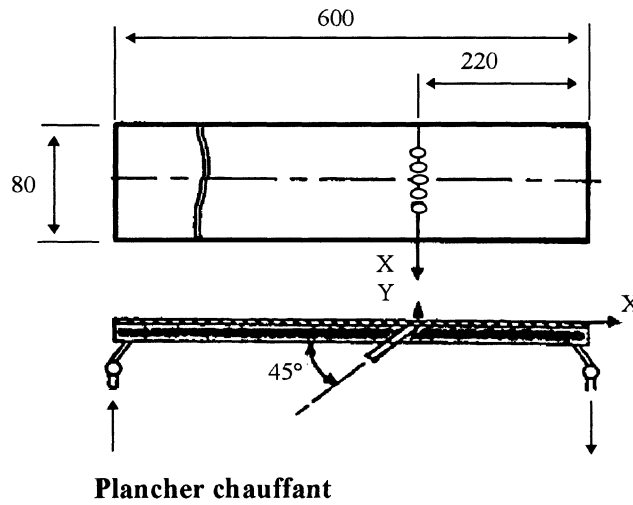
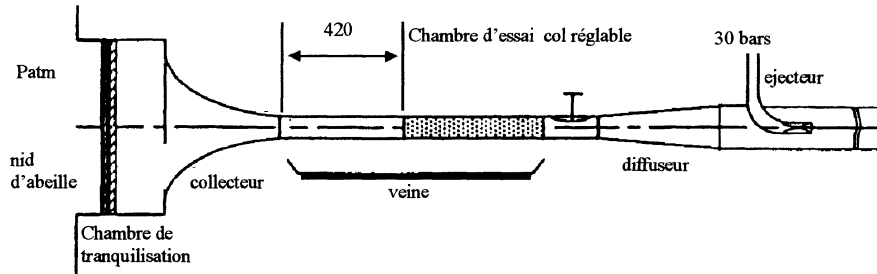


Figure 1. Schémas de la soufflerie et de la maquette munie des 5 injections obliques.
Figure 1. Schematic of the wind tunnel and model equipped with the 5 oblique jets.

refroidissement par film sont généralement caractérisés par l'efficacité dont la définition est donnée par :

$$\eta_{aw} = \frac{T_{aw} - T_r}{T_{gj} - T_r}$$

où T_{aw} est la température adiabatique de paroi en présence des injections, T_r la température de récupération de la paroi sans injection et T_{gj} la température génératrice des jets. Dans notre étude, la paroi n'est pas adiabatique puisqu'elle est soumise à une condition de température constante sur sa face arrière ; il n'est donc pas possible d'accéder à la valeur de T_{aw} . On introduit donc une efficacité de film définie par rapport à une température de référence dite température de film T_f .

$$\eta = \frac{T_f - T_r}{T_{gj} - T_r}$$

où la température de film est donnée par la relation $\phi = h(T_w - T_f)$ avec T_w la température de paroi mesurée par la caméra infrarouge, ϕ le flux de chaleur pariétal mesuré en présence des jets à $T_{gj} = 333$ K et h le coefficient de transfert de chaleur mesuré en présence des jets avec $T_{gj} = T_{ge}$. On suppose donc que le coefficient de transfert de chaleur est indépendant de la température des jets dès lors que le taux d'injection défini comme le rapport des débits massiques reste constant et dans la mesure où la différence entre la température génératrice des jets et celle de l'écoulement principal reste limitée. On peut ainsi déduire une valeur de température de film T_f et l'efficacité de refroidissement correspondante [14] :

$$\eta = \frac{T_w - T_r - \phi/h}{T_{gj} - T_r}$$

La *figure 2* permet une description qualitative de l'effet de R sur la distribution des températures de surface. Ces visualisations thermiques montrent des différences frappantes entre les valeurs maximales de température pour les taux d'injection les plus faibles (0,24 et 0,37). La valeur de $R = 0,37$ semble être optimale pour la coalescence des jets en assurant la meilleure uniformité de température de surface des trois cas. On observe une zone à température élevée ($T_w = 318\text{--}323$ K) qui s'étend sur une surface allant longitudinalement jusqu'à $X/D = 6$ et latéralement jusqu'à $Z/D = \pm 0,5$. Pour $R = 0,24$ on retrouve cette région à température élevée mais sur une surface plus petite. De même, plus en aval, l'influence des jets sur la distribution de température pariétale est plus faible que pour $R = 0,37$ et se limite à une zone de l'ordre de $4D$ longitudinalement et de $\pm 1D$ transversalement. Finalement, pour $R = 0,50$, le caractère individuel

des jets reste prononcé et s'étend sur environ $20D$ en aval de l'injection.

Quel que soit le taux d'injection, la répartition de température de surface est symétrique de part et d'autre de l'axe du jet central. En conséquence, le calcul de densité de flux de chaleur pariétale n'est effectué que sur la zone du jet central. La *figure 3* présente les températures réduites θ_w et les densités de flux réduites ϕ_w .

Pour $R = 0,50$ on observe que la région affectée par la présence du jet est très étroite et située sous le jet dans son sillage. Comme mentionné dans la première partie de cette étude, il est vraisemblable que les jets décollent significativement de la paroi conduisant à une efficacité réduite. Les cas pour $R = 0,24$ et $R = 0,37$ sont assez semblables avec une large région autour et en aval du jet où la température est plus élevée (on rappelle que plus la paroi est chaude meilleure est l'efficacité du jet). Les échanges thermiques avec la paroi immédiatement en aval de l'orifice sont meilleurs pour les taux les plus faibles $R = 0,24$ et $0,37$. Ceci peut s'expliquer par le fait que plus le taux d'injection est faible, plus le jet colle à la paroi et donc meilleur est le transfert thermique. Cependant, on observe qu'en diminuant le taux d'injection jusqu'à $R = 0,24$ on réduit significativement l'étendue de la région qui sera protégée par le jet. Il semble donc qu'il y ait lieu de faire un compromis entre un taux d'injection faible permettant de conserver les jets en contact avec la paroi et suffisamment fort pour éviter un mélange turbulent avec l'écoulement transversal trop rapide. Goldstein et al. [12, 15, 16] ont trouvé les mêmes tendances de variation des flux thermiques à l'aide des résultats des corrélations entre transfert thermique et transfert de masse.

La *figure 4* présente les cartes iso-valeurs de l'efficacité de refroidissement (*figure 4a*) et des profils à Z/D constant (*figure 4b*) pour trois valeurs de R étudiées. Les cartes d'efficacité présentées sur la *figure 4a* reflètent parfaitement les résultats discutés précédemment. Les profils de l'efficacité η tracés en *figure 4b* montrent que les valeurs maximales sont atteintes près des orifices d'injection à environ $X/D = 2\text{--}3$. Pour les trois valeurs du taux d'injection R , l'efficacité η tend rapidement vers une valeur uniforme en envergure. L'observation la plus frappante issue de l'analyse de ces mesures est l'existence d'une valeur de R qu'on peut considérer comme optimale proche de $R = 0,37$ qui permet d'avoir une efficacité de refroidissement importante sur une large surface.

En complément à ces mesures effectuées en paroi, on présente sur la *figure 5* l'évolution des profils de vitesse moyennes réduites sur deux positions latérales $Z/D = 0$ et $1,5$ qui sont respectivement l'axe du jet et la ligne

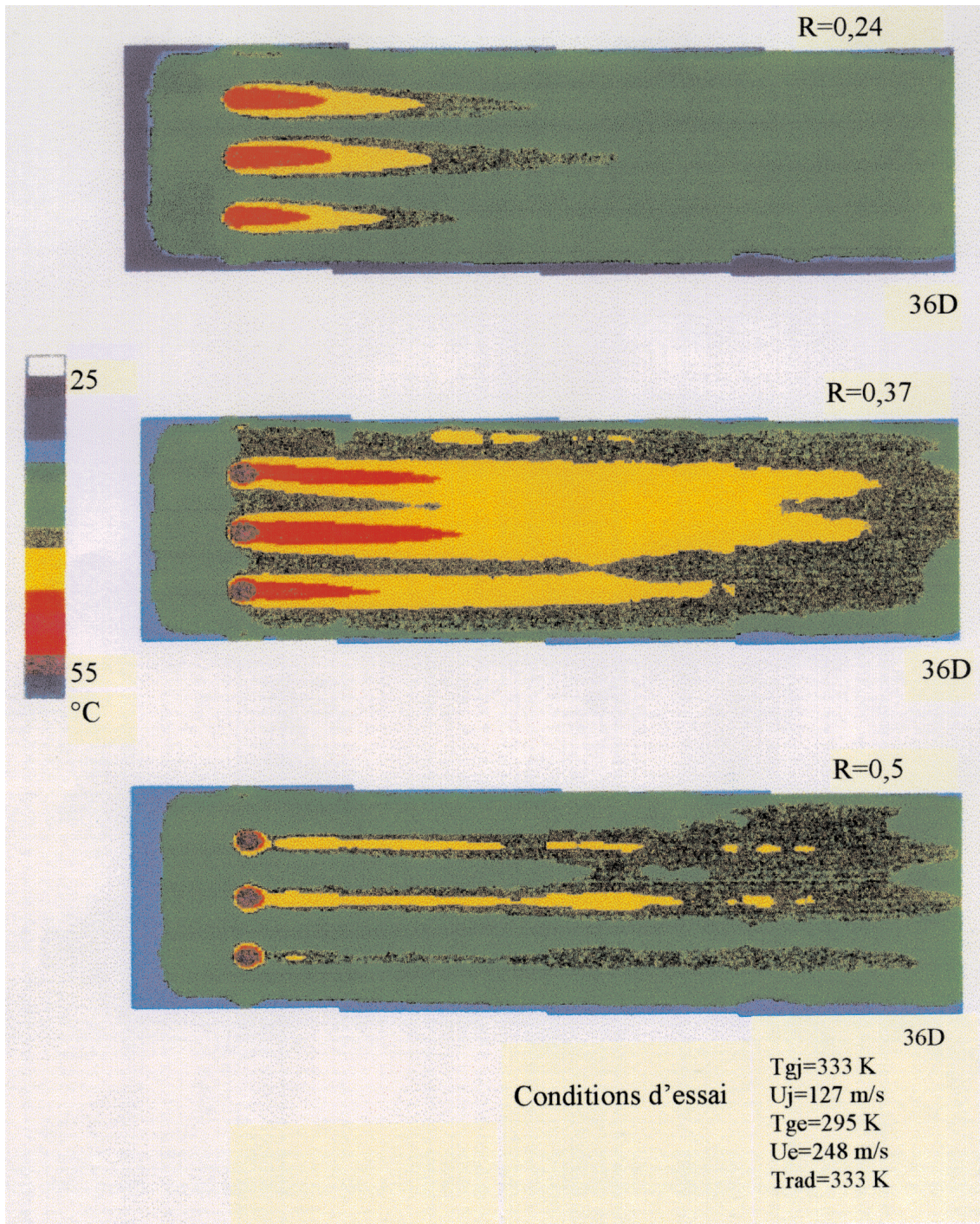


Figure 2. Effet du rapport d'injection sur la distribution de température pariétale ($M = 0,72$; $T_w = 313$ K; $T_{gj} = 333$ K).
Figure 2. Effect of the injection ratio on the wall temperature distribution ($M = 0.72$; $T_w = 313$ K; $T_{gj} = 333$ K).

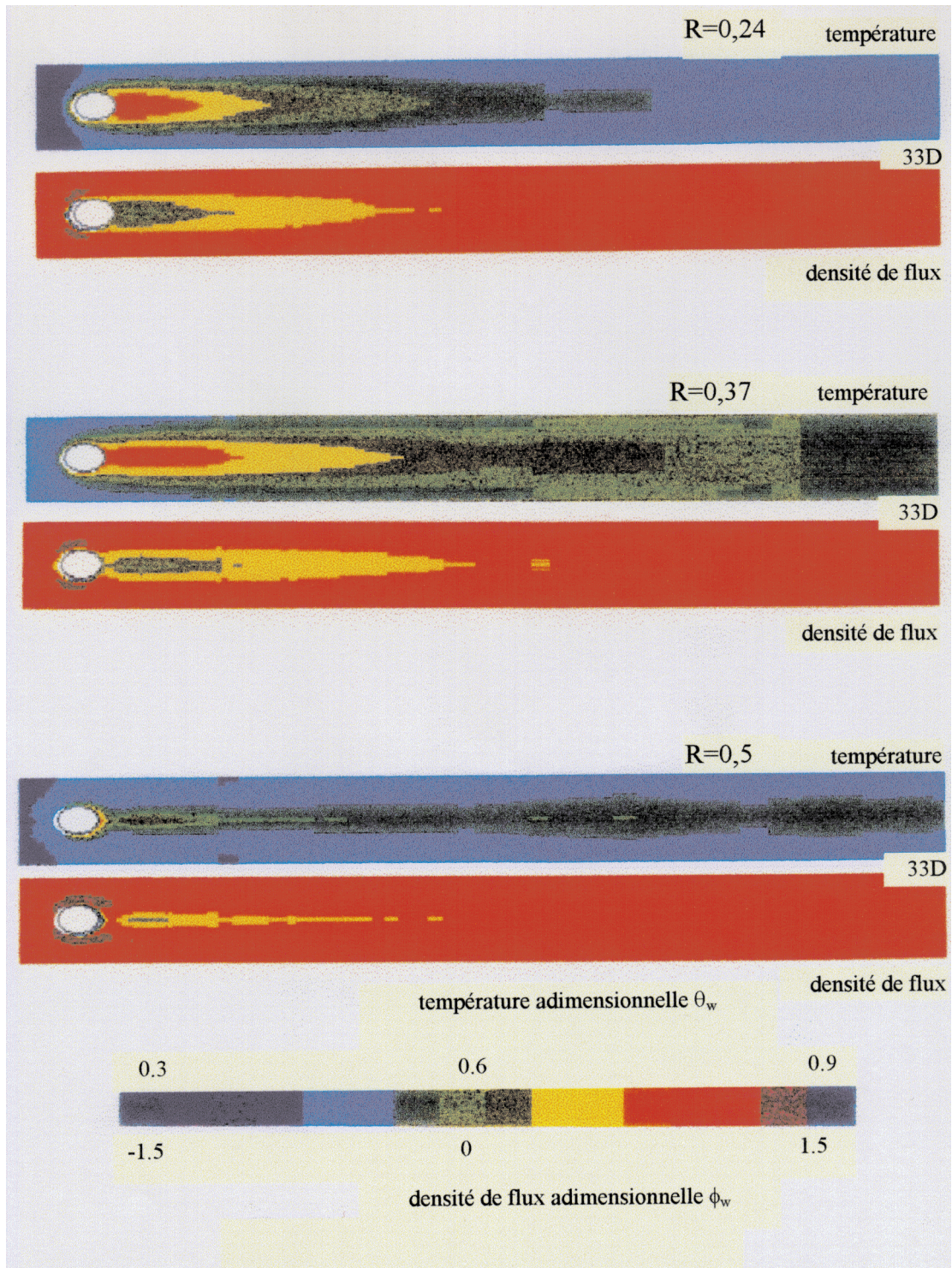
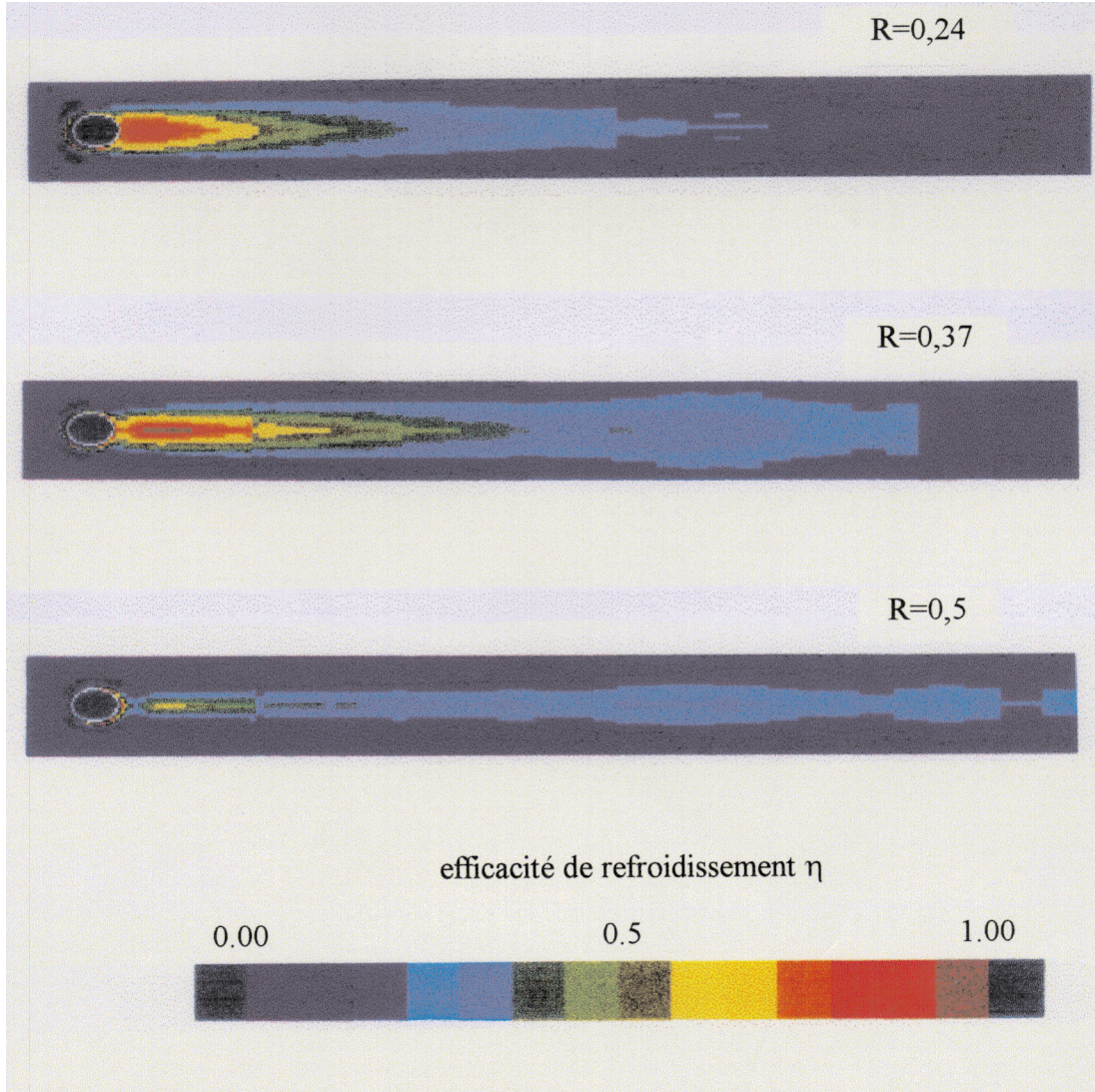


Figure 3. Effet du rapport d'injection sur les transferts de chaleur en paroi ($M = 0,72$; $T_w = 313$ K; $T_{gi} = 333$ K).

Figure 3. Effect of the injection ratio on the wall heat transfer ($M = 0.72$; $T_w = 313$ K; $T_{gi} = 333$ K).



(a)

Figure 4. Evolution de l'efficacité du refroidissement avec le taux d'injection : (a) cartes d'efficacité, (b) profils d'efficacité.
Figure 4. Evolution of the cooling efficiency with the injection rate: (a) distribution of efficiency, (b) profiles of efficiency.

à mi-distance entre deux jets, pour six positions longitudinales $X/D = 1, 2, 4, 6, 10$ et 20 . Les mesures ont été effectuées pour les trois valeurs du rapport d'injection : $R = 0,24, 0,37$ et $0,50$. Ces mesures montrent que l'effet de R sur le champ d'écoulement reste confiné près de la paroi sur l'axe central des jets. Sur la ligne $Z/D = 1,5$, l'influence du jet est très réduite pour les trois taux d'injection. Les profils sur l'axe $Z/D = 0$ montrent une survitesse pour $R = 0,37$ et $0,50$ à $X/D = 1$ située entre la

paroi et $Y/D = 1$. Entre $X/D = 1$ et 2 le déficit de vitesse qui apparaît dans le sillage du jet en dessous de la survitesse mentionnée est d'autant plus marqué que le taux d'injection est faible. Cela peut s'expliquer par la différence de position des points selle observée sur les visualisations pariétales [17] qui montrent que plus R est faible, plus le point selle se rapproche de l'orifice. En $X/D = 4$, on observe une survitesse entre la paroi et $Y/D = 0,5$ pour le taux d'injection le plus fort ($R = 0,5$) qui illustre

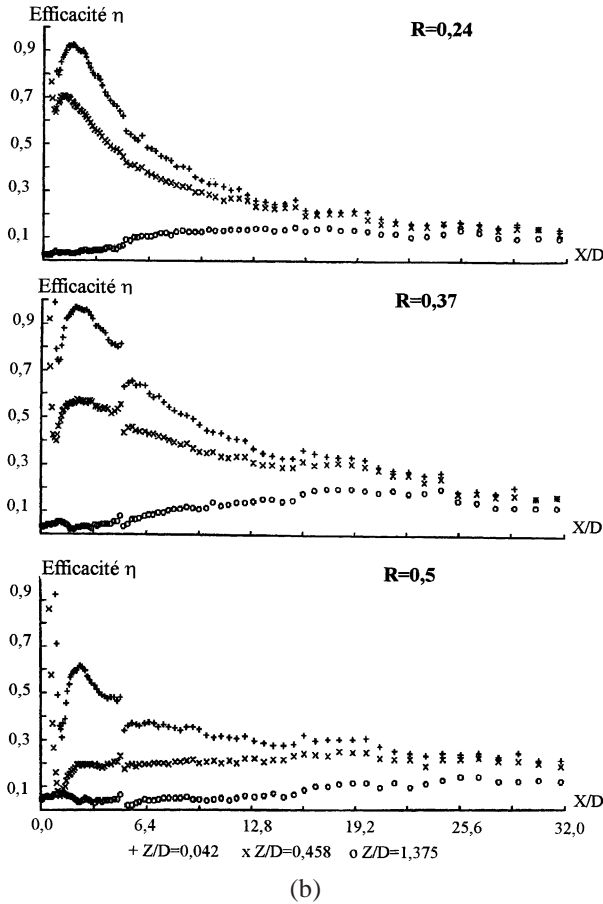


Figure 4. (Continuée).
Figure 4. (Continued).

une ré-énergétisation du sillage par l'écoulement extérieur s'engouffrant sous le jet et qui est responsable de la diminution de l'efficacité du jet observée précédemment.

4. CONCLUSION

L'étude expérimentale menée a montré que la valeur du taux d'injection domine le développement des jets en interaction avec l'écoulement transversal compressible près de la paroi et au voisinage des orifices d'injection ($Y/D < 1$, $Z/D < 1$ et $X/D < 2$). Son influence se traduit essentiellement par :

- une meilleure uniformité de film pour des valeurs de R inférieures à 0,50 avec une tendance à la coalescence des jets,
- la nécessité d'effectuer un compromis entre un taux d'injection faible pour éviter le décollement des jets

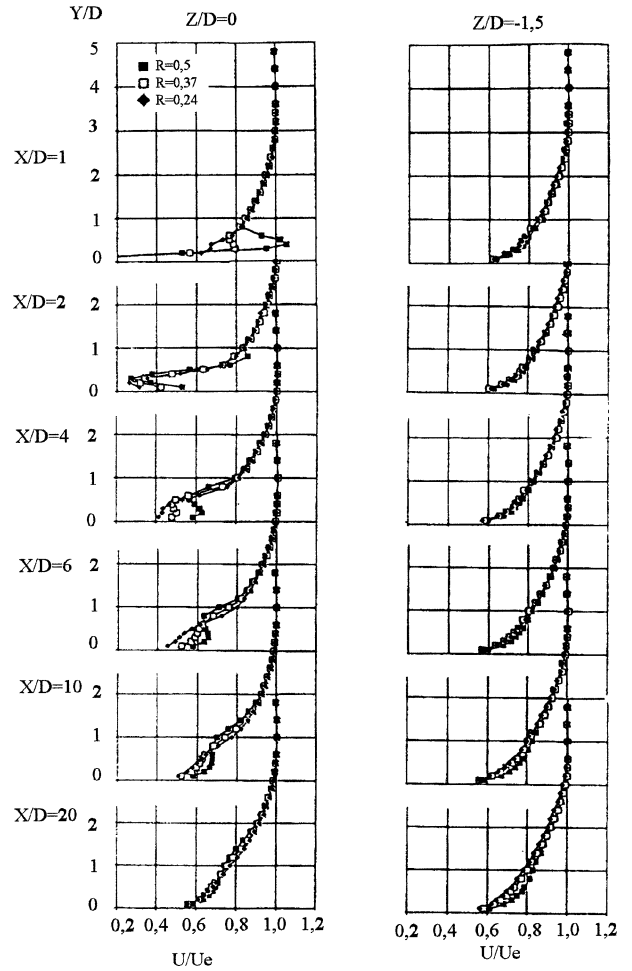


Figure 5. Effet du taux d'injection sur les profils de vitesse de l'écoulement.

Figure 5. Effect of the injection rate on the velocity profiles in the flow field.

de la paroi qui entraîne une mauvaise efficacité de refroidissement et un taux d'injection trop faible qui conduit à un mélange trop rapide avec l'écoulement extérieur avec aussi une efficacité de refroidissement réduite en étendue,

- l'analyse des cartes d'efficacité pour les trois taux d'injection choisis a montré l'existence d'une valeur optimale de R proche de 0,37 pour laquelle l'efficacité de refroidissement des jets sera optimale en intensité et étendue.

Etant donné que le taux optimal d'injection semble résulter d'un compromis entre l'effet de décollement de la paroi et l'effet de mélange avec l'écoulement de couche limite, dans la suite de ce travail, il serait nécessaire d'évaluer l'effet des caractéristiques de la couche limite

en amont de l'injection sur la valeur optimale du taux d'injection. Il serait aussi nécessaire d'évaluer si un espacement latéral plus faible des jets ou bien l'utilisation d'orifices évasés permettrait d'homogénéiser l'efficacité de refroidissement dans la direction latérale. Enfin, une analyse des pertes aérodynamiques associées à ces injections devrait être menée dans l'optique d'une transposition des résultats obtenus au refroidissement des aubes de turbines.

Remerciements

Le travail présenté ici a été réalisé avec le soutien financier de la DRET (DGA). Nos vifs remerciements vont à Monsieur Henry Garem pour sa contribution à la mise au point et à la conduite des expériences. Les auteurs tiennent également à remercier le Professeur David Zeitoun de l'IUSTI de Marseille pour ses conseils lors de la rédaction de cet article.

RÉFÉRENCES

[1] Dizene R., Charbonnier J.-M., Dorignac E., Leblanc L., Étude expérimentale d'une interaction de jets obliques avec un écoulement transversal compressible. I. Effets de la compressibilité en régime subsonique sur les champs aérothermiques, *Int. J. Therm. Sci.* 39 (3) (2000) 390-403.

[2] Kim S.W., Benson T.J., Fluid flow of a row of jets in crossflow. A numerical study, *AIAA J.* 31 (5) (1993) 806-811.

[3] Kim S.W., Benson T.J., Calculation of circular jet in crossflow with a multiple-time scale turbulence model, *Int. J. Heat Mass Tran.* 35 (10) (1992) 2357-2365.

[4] Zhang X., Collins M.W., Flow and heat transfer in a turbulent boundary layer through skewed and pitched jets, *AIAA J.* 31 (9) (1993).

[5] Golstein R.J., Eckert E.R.G., Ramsey J.W., Film cooling with injection through holes: adiabatic wall temperatures downstream of a circular hole, *ASME J. Engrg. Power, Serie A* 90 (4) (1988) 384-395.

[6] Golstein R.J., Eckert E.R.G., Ramsey J.W., Film cooling. Injection through a circular hole, NASA CR-54604, 1968.

[7] Kruse H., Effects of the hole geometry, wall curvature and pressure gradient on film cooling downstream of a single row, in: AGARD Conferences Proceedings, 1985, p. 390.

[8] Brown A., Saluja C.L., Film cooling from a single hole and a row of holes of variable pitch to diameter ratio, *Int. J. Heat Mass Tran.* 22 (1978) 525-533.

[9] Foss J., Interaction region phenomena for the jet in a crossflow problem, Univ. of Karlsruhe, Rept. SFB 80/E/161, Karlsruhe, Germany, 1980.

[10] Liess C., Experimental investigation of film cooling with injection from a row of holes for application to gas turbine blades, *ASME J. Engrg. Power* 97 (1975) 21-27.

[11] Liess C., Film cooling with ejection from a row of inclined circular holes. An experimental study for application to gas turbine blades, Technical Note 97, Von Karman Institute, 1973.

[12] Goldstein R.J., Taylor J.R., Mass transfer in the neighborhood of jets entering a crossflow, *ASME J. Heat Tran.* 104 (1982).

[13] Fougere J.M., Bousgarbies J.L., Dorignac E., Foucault E., Refroidissement par film des aubes de turbines : Modélisation et validation expérimentale, Rapport Final, Contrat DRET 89273, LEA-LET, Poitiers, 1991.

[14] Dorignac E., Contribution à l'étude de la convection forcée sur une plaque en présence de jets pariétaux dans un écoulement subsonique, Thèse, Université de Poitiers, 1990.

[15] Goldstein R.J., Chyu M.K., Hain R.C., Measurement of local mass transfer on a surface in the region of the base of a protruding cylinder with a computer-controlled data acquisition system, *Int. J. Heat Mass Tran.* 28 (5) (1985) 977-985.

[16] Goldstein R.J., Spores R.A., Turbulent transport on the endwall in region between adjacent turbine blades, *ASME J. Heat Tran.* 110 (1988) 862-869.

[17] Dizene R., Etude expérimentale d'interaction de jets avec un écoulement transversal compressible. Deuxième partie : Rangée de jets obliques, Thèse, CEAT, Université de Poitiers, 1993.

Abridged English version

Experimental study of inclined jets cross flow interaction in compressible regime. II. Effect of injection rate on surface heat transfer

The film cooling as a mean to hold gas turbine blade temperature below allowable limits for materials continues to be a challenge for the researchers and engineers. Most of the experiments reported in literature are carried out in the incompressible regime. Only few

experiments were conducted in compressible flow fields among which the important work by Liess [10]. This study is part of a more general program undertaken to gain understanding of the heat transfer associated to film cooling by discrete injection in both incompressible

and compressible regimes. A detailed comparison of the interaction for the two regimes was presented in the first part for a given injection rate based on the mass flux ratio $R = 0.5$. It was concluded that a direct extrapolation between the two regimes based on the injection ratio was acceptable but not precise enough to ensure the optimal cooling efficiency. In the present paper, the effect of the injection rate values is investigated for $R = 0.24$, 0.37 and 0.5 for a Mach 0.72 cross flow.

A clear effect of the injection rate is observable on the results. For the highest injection rate tested ($R = 0.5$), the jet patterns on the surface heat transfer distribution are well separated. For lower injection rate, the jets start to coalesce increasing the surface of the wall protected by the film. The maximum film effectiveness is reached downstream and near the injection hole. The film cooling efficiency tends quite rapidly to a low value uniform in spanwise direction only for the lowest injection rate. A significant result of this study is the existence of a

critical value of the injection rate providing an optimal effectiveness distribution (intensity and extent). It results from a trade-off between an injection rate large enough to avoid a rapid mixing with the incoming boundary layer flow and small enough to avoid a too large penetration in the cross flow with the consequence of having cross flow fluid immersing under the jet.

As a follow-up of this study, it would be necessary to investigate the effect of the incoming boundary layer characteristics on the film cooling efficiency and on the optimal value of the injection rate. The impact of the jet spacing or of fan-shaped orifices could also be investigated as a mean to increase the spanwise uniformity of the film cooling efficiency. Finally, the aerodynamic losses associated with the film cooling configuration should be evaluated in order to allow the transposition of these results to the cooling of turbine blades.