

ETUDES EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE D'UN JET D'AIR PLAN IMPACTANT UNE PLAQUE PLANE CHAUFFEE

B. KISSI¹, A.DRAOUI², F. CANDELIER³ et L. EL BAKKALI¹

¹ Equipe de Modélisation et Simulation des Systèmes Mécaniques ; M2SM-FS/E28,
Faculté des Sciences, Tétouan – Université Abdelmalek Essaâdi

² Laboratoire d'Energétique – Equipe des Transferts Thermiques et Energétique, Faculté des Sciences et
Techniques, Tanger - Université Abdelmalek Essaâdi - Maroc

³ Laboratoire CIME, IM2/UNIMECA, Université de la Méditerranée, Marseille, France
Contact : kissifst@yahoo.fr et a.draoui@fstt.ac.ma

RESUME :

Ce travail rentre dans le cadre des études de recherches sur les jets et leurs applications en aérodynamique. Il concerne une étude expérimentale d'un jet d'air laminaire impactant une plaque plane chauffée, ou ont été effectuées des visualisations par Tomographie Laser, et une partie numérique comportant des simulations réalisées à l'aide du code de calcul **Fluent**. L'objectif est de caractériser le jet et la détermination du point de décollement sur la plaque. Les résultats des deux parties (expérimentale et numérique) ont été comparés.

NOMENCLATURE

e : Largeur de la buse [mm].

h : Hauteur de la buse à partir de la plaque [mm].

H : Rapport d'ouverture = h/e .

T : Température statique [K].

u_m : Composante horizontale de la vitesse dans la région pariétal [m/s].

k : Conductivité thermique du fluide [W/(m.k)].

α : Diffusivité thermique du fluide [m²/s].

Re : Nombre de Reynolds.

Ra : Nombre de Rayleigh.

β : Coefficient d'expansion thermique à pression constante [K⁻¹].

ν : Viscosité cinématique du fluide [m²/s].

ΔT : Gradient de température entre la plaque et l'air.

x^* : Point de décollement de la couche limite

1. INTRODUCTION :

L'utilisation des jets, dans leurs différentes configurations, est très répandue dans le milieu industriel. C'est un écoulement créé par l'expulsion d'un fluide doté d'une certaine quantité de mouvement dans un fluide généralement au repos. Il en résulte un phénomène de mélange entre les deux fluides.

Une configuration souvent utilisée est celle du jet impactant. Les traits caractéristiques de cet écoulement sont le transfert de chaleur et de masse intensif, localisé et confiné. Les jets impactants trouvent, par conséquent, des applications dans des domaines variés tels que le refroidissement des aubes de turbines aéronautiques, de composants électroniques, la trempe des surfaces vitrées, le refroidissement des miroirs de laser, l'isolation des cordons lors du soudage par laser, le séchage du papier et des textiles . . . etc.

Il est très important d'étudier expérimentalement et numériquement tous les aspects concernant un écoulement de type jet afin de comprendre les phénomènes le régissant.

Dans des travaux rencontrés dans la bibliographie [1,2,3,4,5] des études ont identifié, pour cette configuration d'écoulement, trois régions distinctes : la première est celle de la couche cisailée du jet libre (cœur potentiel), où l'écoulement n'est pas perturbé par la présence de la plaque, les deux autres qui sont localisées au voisinage de la plaque, sont la région d'impact ou bien la région de stagnation et la région du jet pariétal où se développe une couche limite laminaire dans un premier temps et transite vers un régime turbulent et à laquelle nous nous intéressons dans notre étude (voir figure 1) [2].

2. ETUDE EXPERIMENTALE :

Les paramètres qui ont été retenus pour cette étude sont :

- la distance buse-plaque ou le rapport d'ouverture h/e , où h est la hauteur de la buse et e est l'épaisseur de la buse ;
- la température de la plaque ;
- le régime d'écoulement (nombre de Reynolds : Re).

Des visualisations ont été effectuées (par la technique de la Tomographie Laser), en faisant varier les trois paramètres cités précédemment, le nombre de Reynolds, la température, et la hauteur de buse (Figure 2) [6].

$Re = 62 ; 83 ; 104 ; 125 ; 145$.

$T(^{\circ}C) = 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 70 ; 80 ; 90$.

$h/e = 1 ; 2 ; 3$.

A l'aide d'un programme écrit sous Matlab, nous avons pu déterminer le point de décollement (coordonnée x de ce point) en pixel, où il suffit juste de procéder à un calibrage au préalable pour avoir la correspondance pixel-mm.

On détermine le point de décollement par clique, la coordonnée du point de décollement est une moyenne calculée sur une série de photos (6 à 9 photos) prises pour une température et un débit fixés.

Nous avons pu tracer ensuite les courbes de tendances du point de décollement en fonction de la température et du nombre de Reynolds pour différentes hauteurs, et nous avons établi des lois de corrélation de la coordonnée du point de décollement en fonction du nombre de Reynolds et de la température (voir figures 2 et 3).

Nous avons obtenu des lois de corrélation de l'évolution du point de décollement en fonction de la température (pour différents nombres de Reynolds) et du nombre de Reynolds (pour différentes températures), en faisant une moyenne sur les exposants pour chaque graphe. Ces corrélations de x sont présentées dans le tableau suivant :

	X en fonction du Re	X en fonction de T
h/e = 1	$x = 1,27 Re^{0,98}$	$x = 42,81 T^{-0,47}$
h/e = 2	$x = 2,41 Re^{0,69}$	$x = 39,98 T^{-0,52}$

Tableau 1 : Corrélations obtenues pour le point du décollement

3. ETUDE NUMERIQUE :

On se propose de modéliser l'écoulement d'un jet impactant sur FLUENT, comme l'écoulement est plan, on a choisi de modéliser la moitié du domaine d'étude en bidimensionnel, où

un maillage structuré a été adopté composé de quadrilatères afin de réduire le temps de calcul sans perdre de la précision des résultats.

3.1. Les équations du problème :

Les corrélations pour la diminution de la vitesse dans la zone du jet pariétal et l'augmentation de l'épaisseur de la couche limite correspondant à cette vitesse sont supposées être de la forme :

$$u_m(x) \sim A \cdot x^{-1/2} \quad (\text{Glauert [2]}) \quad (1)$$

$$\text{On sait que [2] : } \delta/x \sim Re_x^{-1/2} \text{ où : } Re_x = u \cdot x / \nu \text{ d'où on a } \delta \sim Re^{-1/2} \cdot A^{-1/2} \cdot x^{3/4} \quad (2)$$

Avec $A(Re) = u_0/x_0^{-1/2} = \text{constante}$ pour un même nombre de Reynolds, ou une même vitesse en sortie de buse.

Notre but c'est de trouver l'évolution de la constante A en fonction du nombre de Reynolds pour déterminer l'évolution de point de décollement en fonction de Re et T.

Nous avons : $Ra_{cr} = g \beta (\Delta T / \nu \cdot \alpha) \delta^3$ Alors d'après 2 on trouve que :

$$x^* = Ra_{cr}^{0,44} \cdot [g \Delta T / \nu \alpha T]^{-0,44} \cdot Re^{0,66} \cdot A(Re)^{0,66} \quad (3)$$

3.2. Résultats et discussion :

Cette simulation à l'aide du logiciel FLUENT a été réalisée pour une hauteur de buse égale à l'épaisseur de celle-ci et pour les nombres de Reynolds : Re = 62 ; 83 ; 104 ; 125 ; 145.

Dans les figures (4) et (5) nous comparons les profils de vitesse obtenus à des distances $x = 8 ; 9 ; 10 ; 11 ; 12 ; 13 ; 14 ; 15 ; 16 ; 17$ fois l'épaisseur de buse e , et ce pour deux nombres de Reynolds Re = 62 et 145.

De ces figures, nous remarquons que la vitesse dans la zone du jet pariétal diminue en s'éloignant du point de stagnation (ceci n'est vrai que suffisamment loin du point de stagnation, c'est pour cette raison que nous avons commencé la construction des graphes qu'à une distance de $8e$). Nous constatons aussi que l'augmentation du nombre de Reynolds, augmente la vitesse dans la zone du jet pariétal et aplatit le profil de vitesse dans cette zone, donc l'épaisseur de la couche limite diminue avec le nombre de Reynolds.

Le tableau suivant regroupe les exposants de similarité obtenus à l'aide des corrélations que nous comparons aux résultats théoriques obtenus par Glauert [2]:

Nombre de Reynolds	Epaisseur de la couche limite	Vitesse
62	0,74	-0,48
83	0,65	-0,44
104	0,65	-0,41
125	0,61	-0,38
145	0,60	-0,36
Moyenne	0,65	-0,41
Résultats théoriques	0,75	-0,5

Tableau 2 : Exposants de similarité

Glauert [2] a montré que l'exposant de similarité était constant, et qu'il ne dépendait pas du nombre de Reynolds, malheureusement, dans nos résultats on trouve que les exposants de similarité fluctuent en fonction du nombre de Reynolds, ceci est incohérent. On remarque que plus le nombre de Reynolds est petit plus on s'approche des résultats théoriques de Glauert [2], ceci peut s'expliquer dans le fait que la solution de Glauert [2] n'a été validée qu'à de grandes distances à partir du point de stagnation, donc si l'on augmente le nombre de Reynolds, on devrait faire nos mesures suffisamment loin du point de stagnation.

Nous avons établi une loi de corrélation, une loi de puissance de l'évolution de la constante **A** en fonction du nombre de Reynolds :

$$A \sim Re^{0,38}$$

En remplaçant dans l'expression de l'épaisseur de la couche limite dynamique donnée par (2) :

$$\text{On trouve : } \delta \sim Re^{-1/2} \cdot (Re^{0,38})^{-1/2} \cdot x^{3/4} \text{ d'où } \delta \sim Re^{-0,69} \cdot x^{3/4} \quad (4)$$

En remplaçant l'expression de l'épaisseur de la couche limite dynamique donnée par l'équation (4), dans l'équation du nombre de Rayleigh critique donnée par l'équation suivante :

$$Ra_{cr} \sim g\beta \cdot [\Delta T / (v\alpha)] \cdot \delta^3$$

$$\text{Nous obtenons : } Ra_{cr} \sim (g/v\alpha) \cdot (\Delta T/T) \cdot (Re^{-0,69} \cdot x^{3/4})^3 \quad (5)$$

$$\text{Alors : } x^* \sim Ra_{cr}^{0,44} Re^{0,92} [g\Delta T/v\alpha T]^{-0,44} \quad (6)$$

Ce résultat donné par l'expression (6) est très important car il représente la loi de variation de la coordonnée radiale du point de décollement en fonction du nombre de Reynolds, de la température et du nombre de Rayleigh critique.

4. CONCLUSION :

Cette étude nous a permis d'établir une loi de corrélation afin de prédire le comportement du point de décollement en fonction du nombre de Reynolds et de la température de la plaque en se basant sur le nombre de Rayleigh critique.

Nous avons utilisé l'outil de calcul **FLUENT** pour déterminer la loi de corrélation régissant l'évolution de l'épaisseur de la couche limite en fonction de la distance radiale et du nombre de Reynolds. Ceci nous a permis de compléter le modèle mathématique et d'introduire les deux variables à savoir le nombre de Reynolds et la distance radiale dans l'expression du nombre de Rayleigh critique.

Afin de pouvoir comparer le modèle mathématique à l'expérience, nous avons procédé à des visualisations par tomographie laser et à l'aide d'un programme que nous avons développé, nous avons pu déterminer les lois de corrélations qui lient la composante radiale du point de décollement à la température et au nombre de Reynolds (voir le tableau 3). Nous avons pu valider ce modèle pour $h = e$, et pour des nombres de Reynolds inférieurs à 145.

Nous avons constaté que le point de décollement déterminé expérimentalement par la Tomographie Laser n'est pas loin de celui trouvé numériquement par le logiciel industriel **Fluent**.

Point de décollement : x^*	f (Re)	f (T)
Expérimentale	$x = Re^{0,98}$	$x = T^{-0,47}$
Numérique	$x = Re^{0,92}$	$x = T^{-0,44}$

Tableau.3 : Evolution de point de décollement en fonction du nombre de Re et de T

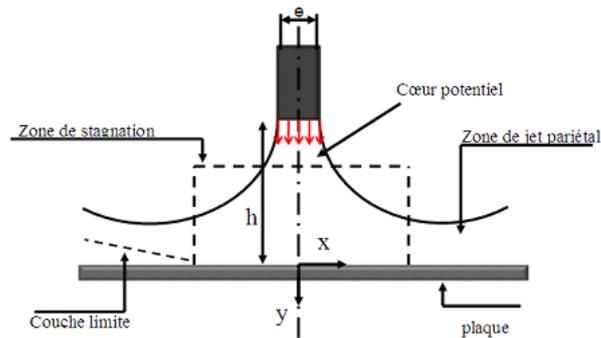


Figure 1 : Développement d'un jet impactant



Figure 2 : Schéma du dispositif expérimental

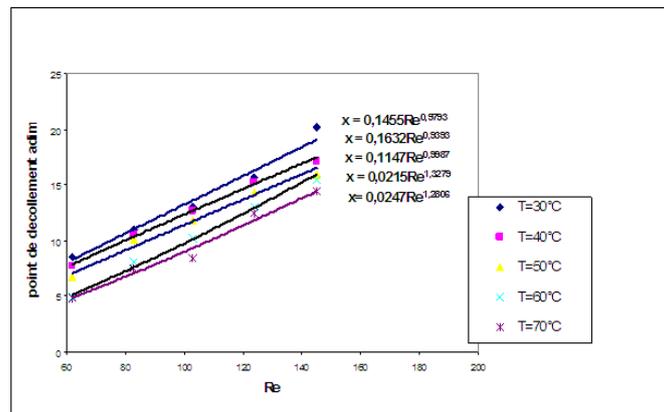


Figure 2 : Évolution du point de décollement en fonction du nombre de Reynolds pour H=1

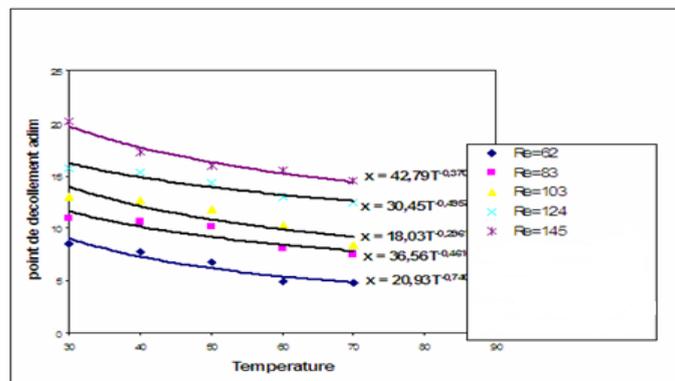


Figure 3 : Évolution du point de décollement en fonction de la Température pour H=1

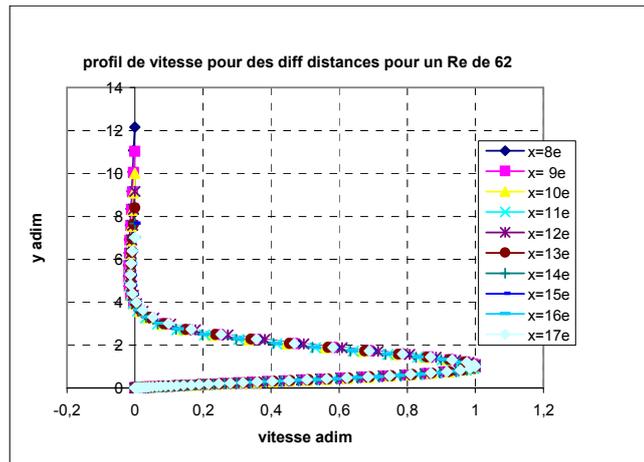


Figure 4 : Profil de vitesse dans la zone du jet pariétal pour un nombre de Reynolds égal à 62

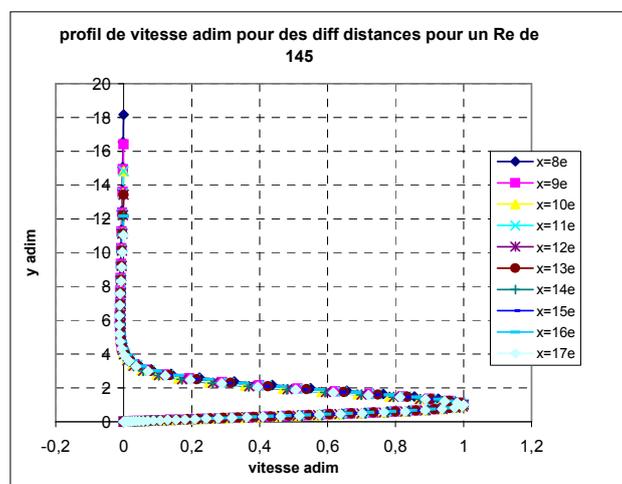


Figure 5 : Profil de vitesse dans la zone du jet pariétal pour un nombre de Reynolds égal à 145

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Dr. Hermann Schlichting "*Boundary-Layer Theory*", Mc Graw Hill (7^{ème} édition 1979)
2. M. B. Glauert "*The wall jet*", University of Manchester, J.Fluid Mech, pp. 625-643 (1956).
3. R. A. Bajura & Albin Szewczyk: "*Experimental Investigation of a Laminar Two-Dimensional Plane Wall Jet*", Physics of Fluids, volume 13, number 7, pp.1653-1664 (juillet 1970).
4. Mohan D. Deshpande & Ramesh N. Vaishnav: "*Submerged laminar jet impingement on a plane*", journal of fluid mechanics, vol.114, pp.213-236 (1982).
5. Jeffrey M. Bergthorson et al. « *Impinging laminar jets at moderate Reynolds numbers and separation distances* », Physical Review. California Institute of Technology, USA. Pages : 1-12, (2005).
6. Kissi B., Draoui A., Candelier F., EL Bakkali L. : « *Etude expérimentale et numérique d'un jet d'air laminaire impactant une plaque plane chauffée* » : Projet de fin d'étude de DESA « *Calcul en Mécanique et Applications* », Faculté des Sciences de Tétouan (Maroc), 2007.

Remerciements : Nous remercions la région PACA (France) qui a octroyé une bourse de stage scientifique au Laboratoire CIME, IM2/UNIMECA (Université de la Méditerranée, Marseille, France) dans le programme Med-Accueil pour la réalisation de cette étude.