

Etude Numérique d'un Jet Non Isotherme Ejecté Tangentiellement à une Plaque Adiabatique dans un Ecoulement Co-Courant

Syrine BEN HAJ AYECH^a, Sabra HABLI^{b,*}, Nejla MAHJOUB SAÏD^b, Hervé BOURNOT^c et Georges LE PALEC^c

^a LETTM, Faculté des sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, Tunisie

e-mail: ayechsyrine@hotmail.com

^b LGM, Institut Préparatoire aux Etudes d'Ingénieurs de Monastir, Université de Monastir, Tunisie

e-mail: sabra.habli@fsm.rnu.tn

e-mail: nejla.mahjoub@fsm.rnu.tn

^c IUSTI, UMR 7343, Technopôle de Château-Gombert, Marseille, France

e-mail: georges.lepalec@univ-amu.fr, herve.bournot@uni-amu.fr

Résumé : On se propose dans ce travail d'étudier numériquement en régime laminaire un écoulement de type jet pariétal non isotherme se développant tangentiellement à une plaque adiabatique dans un écoulement co-courant. La formulation mathématique de ce type d'écoulement est déduite de l'écriture des trois lois de conservation en utilisant les hypothèses de la couche limite. La résolution numérique de ce système d'équations associé à leurs conditions aux limites a été effectuée par une méthode aux différences finies permettant de simuler l'évolution spatiale de ce type d'écoulement. Suite à une étude comparative, entre les résultats numériques et ceux expérimentaux, nous avons montré que ces résultats sont en bonne concordance. Par la suite, nous avons discuté l'effet du nombre de Froude ainsi que de la vitesse de l'écoulement secondaire sur les caractéristiques dynamique et thermique de l'écoulement en comparaison avec le jet simple (jet évoluant dans un milieu au repos).

Mots clés : jet pariétal, régime laminaire, paroi adiabatique, écoulement non isotherme, écoulement co-courant.

1. Introduction

Un écoulement de type jet pariétal plan est obtenu par éjection d'un fluide tangentiellement à une surface plane. Ce type d'écoulement a fait l'objet de plusieurs études numériques ainsi qu'expérimentales visant à étudier les comportements dynamiques et thermiques d'un jet pariétal déchargé dans un milieu au repos ($r = 0$) [1-5]. En présence d'un écoulement externe qui se déplace dans la même direction que le jet (écoulement co-courant), des structures cohérentes de l'écoulement de type jet peuvent évoluer dans la couche de cisaillement. Ces structures jouent un rôle important dans le transport de masse, de quantité de mouvement et de chaleur. Une étude numérique détaillée sur la variation des caractéristiques dynamiques et thermique d'un écoulement de type jet pariétal laminaire en régime de convection forcée a été faite par Pantokratoras [6] pour trois cas différents (plaque mobile, écoulement co-courant ou combinaison d'une plaque mobile avec un écoulement co-courant). Pour le cas d'un jet rond dans un écoulement co-courant, Habli et al. et Nickels et Perry. [7,8] ont montré que l'écoulement turbulent avec un rapport de vitesses ($r = u_{co}/u_0$) inférieur à 0.05 se développe pour se rapprocher d'un jet libre dans un milieu stagnant. Par contre, un jet, avec un rapport de vitesses plus élevé, n'atteint jamais un état de similarité. L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de la vitesse de l'écoulement secondaire sur les caractéristiques dynamique et thermique de l'écoulement du jet pariétal évoluant tangentiellement sur une plaque adiabatique dans un écoulement co-courant en comparaison avec un jet simple (jet évoluant dans un milieu au repos).

2. Formulation du problème

2.1 Hypothèses

On considère un jet issu d'une buse rectangulaire débouchant dans un écoulement au repos ou co-courant (Figure 1). La largeur de la buse est assez grande devant son épaisseur de sorte qu'on peut négliger les effets de bord, ainsi le problème peut être supposé bidimensionnel. La masse volumique du fluide éjecté est considérée constante, sauf dans les forces de flottabilité, où on considère une variation linéaire de cette variable avec la

température selon l'hypothèse de Boussinesq. L'expérience montre que la pression statique subit une variation très faible et on la considère constante dans le jet.

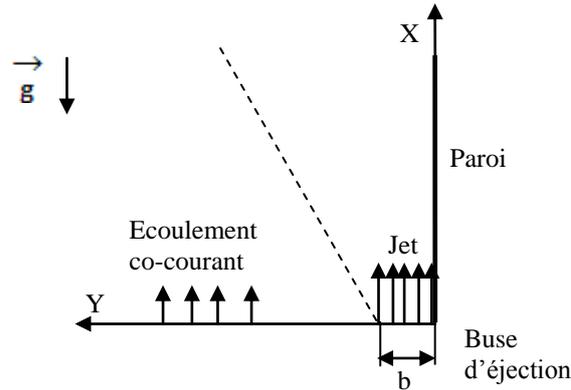


Figure.1: Configuration géométrique de l'écoulement

2.2 Mise en équations

En utilisant les variables sans dimensions suivantes

$$X = \frac{x}{b} ; Y = \frac{y}{b} ; U = \frac{u}{u_0} ; V = \frac{v}{u_0} \quad \text{et} \quad \theta = \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} \quad (1)$$

Les équations adimensionnées régissant l'écoulement s'écrivent alors sous la forme suivante :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (2)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \varepsilon \frac{1}{Fr} \theta \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Re Pr} \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (4)$$

2.3 Conditions aux limites :

Les conditions aux limites écrites sous forme adimensionnelle, du jet pariétal évoluant tangentiellement à une paroi adiabatique dans un écoulement co-courant, sont les suivantes:

$$X = 0 \begin{cases} 0 < Y < 1; V = 0; \theta = 1; U = 1 \\ Y \geq 1; V = 0; U = r; \theta = 0 \end{cases} \quad X \geq 0 \begin{cases} Y = 0; U = 0; V = 0; \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \\ Y \rightarrow \infty; U = r; \theta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

2.4 Méthode de résolution numérique

La résolution numérique, des équations gouvernant l'écoulement, est assurée par une méthode aux différences finies utilisant un schéma implicite. Le maillage utilisé suivant la direction longitudinale est non uniforme. Tandis que, selon la direction transversale, le pas de calcul est pris constant. La méthode utilisée consiste à un balayage ligne par ligne associé à la méthode d'élimination de Gauss-seidel. La convergence de la solution globale est considérée atteinte lorsque le changement relatif de u lors de deux itérations successives est inférieur à 10^{-4} pour chaque nœud du domaine.

3. Résultats et discussion

3.1 Validation numérique

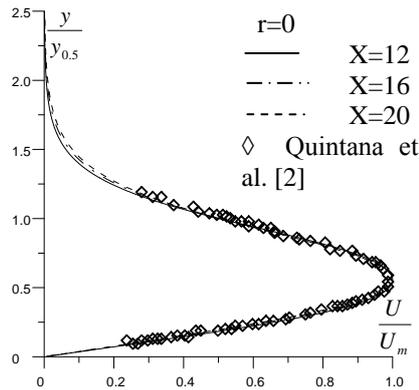


Figure 2 : Evolution transversale de la vitesse verticale pour une plaque chauffée ($T_p/T_\infty=1.03$)

Afin de tester la validité de notre code de calcul numérique, on a comparé les résultats de la simulation numérique avec ceux expérimentaux obtenus par Quintana et al. [2] pour le cas d'une paroi chauffée. Sur la Figure 2, nous représentons les résultats numériques et expérimentaux de la vitesse longitudinale normalisée par la vitesse maximale en fonction de la coordonnée transversale normalisée par la demi-épaisseur dynamique du jet et pour différentes hauteurs du jet ($X=12$, $X=16$ et $X=20$). Les mêmes conditions aux limites prises dans notre étude sont celles de Quintana et al. [2]. À partir de cette figure, nous constatons que nos résultats concordent bien avec ceux expérimentaux [2] dans toutes les sections du jet.

3.2 Influence de la vitesse du milieu extérieur sur l'écoulement

Nous étudions l'influence de la vitesse de co-courant sur un écoulement non isotherme pour différents régimes d'écoulement (régime de convection mixte pour $Fr=22.5$ et régime de convection forcée pour $Fr=2250$) en maintenant le nombre de Reynolds fixé à 1500.

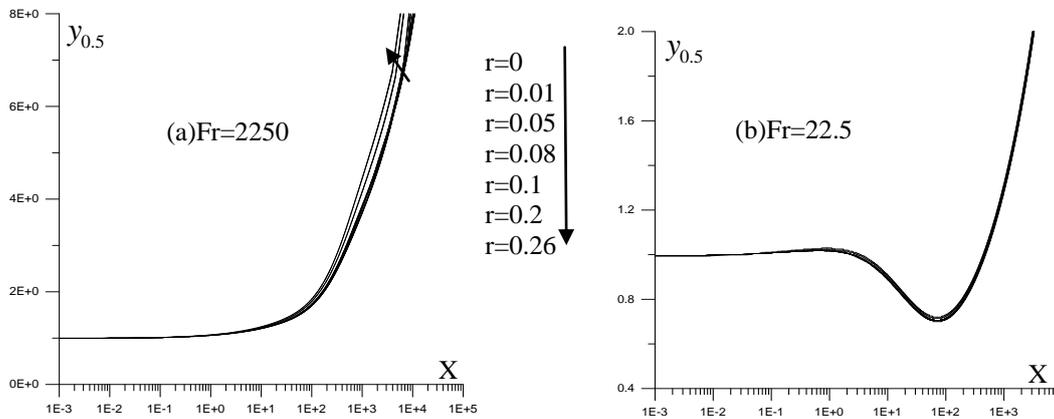


Figure 3 : Evolution longitudinale de la demi-épaisseur dynamique du jet pour différentes vitesses de l'écoulement secondaire et pour $Re=1500$

En se référant à la Figure 3(a), on donne la distribution longitudinale de la demi-épaisseur dynamique du jet pour $Fr=2250$ et pour différentes vitesses de l'écoulement secondaires. On remarque que les profils de cette grandeur sont confondus quelle que soit la vitesse du co-courant, au voisinage de la buse. Ce qui signifie que la variation de la vitesse du milieu ambiant n'engendre aucun effet sur la demi-épaisseur dynamique dans cette région. En s'éloignant de la buse, on constate qu'il y a un écart entre les profils de la demi-épaisseur dynamique qui commence à apparaître dans la zone intermédiaire. Cette différence devient plus importante lorsqu'on avance plus en aval. D'autre part, on note qu'une augmentation de la vitesse de l'écoulement extérieur, pour $r \leq 0.1$, engendre une légère augmentation de cette grandeur. Par contre, on remarque que, pour $r \geq 0.2$, l'écoulement co-courant influe plus significativement sur l'évolution de la demi-épaisseur dynamique du jet.

Sur la Figure 3(b), on trace l'évolution longitudinale de la demi-épaisseur dynamique du jet pour différentes vitesses de l'écoulement secondaire et pour $Fr=22.5$ en régime de convection mixte. Cette figure nous montre que l'augmentation de la vitesse de l'écoulement ambiant ne modifie pratiquement pas l'écoulement dans toutes les zones du jet.

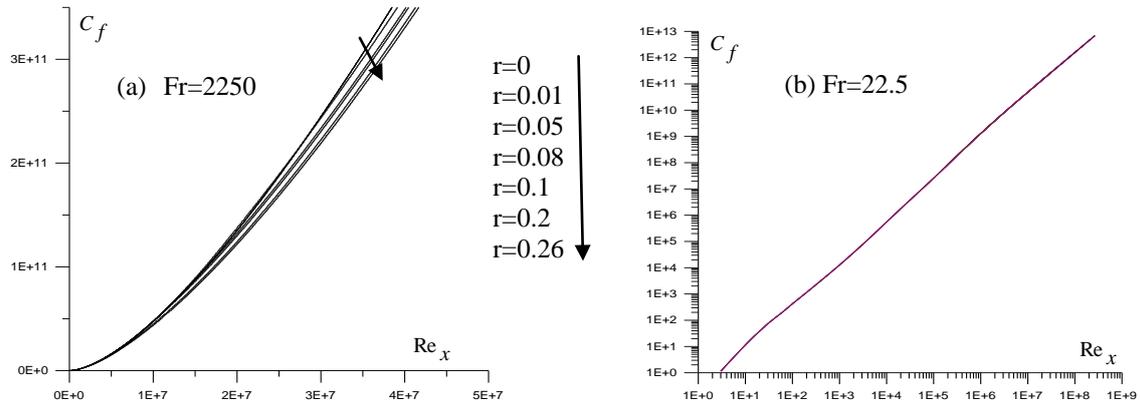


Figure 4 : Evolution longitudinale du coefficient de frottement pariétal pour différentes vitesses de l'écoulement secondaire et pour $Re=1500$

Sur la Figure 4(a) on trace l'évolution longitudinale du coefficient de frottement pour des vitesses du co-courant variables et pour un nombre de Froude égal à 2250. Au voisinage de la buse, cette figure révèle une concordance parfaite entre les différents résultats quelle que soit la vitesse externe utilisée. Par contre, lorsqu'on s'éloigne de cette région, une différence entre les profils commence à apparaître dans la zone intermédiaire. Cette différence est plus importante dans la zone de panache. Par ailleurs, on note qu'une augmentation de la vitesse du milieu extérieur entraîne une diminution du coefficient de frottement.

Pour un nombre de Froude égal à 22.5 (Figure 4(b)) et pour différentes vitesses du co-courant, les profils du coefficient de frottement sont confondus dans toutes les régions de l'écoulement. Ce qui signifie que la vitesse de l'écoulement secondaire n'a aucun effet sur cette grandeur pour un écoulement en régime de convection mixte.

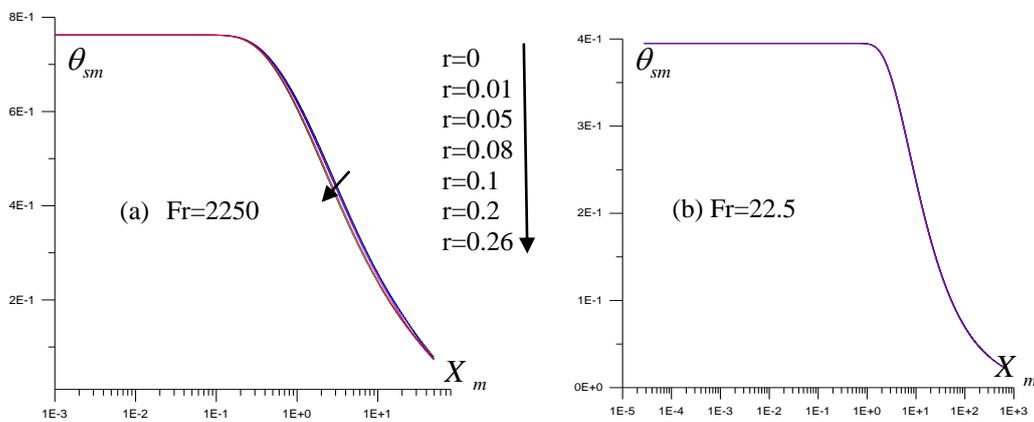


Figure 5 : Evolution longitudinale de la température de surface pour différentes vitesses de l'écoulement secondaire et pour $Re=1500$

Cette partie est consacrée à analyser l'aspect thermique de l'écoulement afin de détecter l'influence de la vitesse de l'écoulement secondaire sur la température de surface de la plaque. Pour cette raison, nous avons tracé sur la Figure 5(a), $\theta_{sm} = \theta_s \left[\frac{Re}{Gr} \right]^{1/7}$ en fonction de $X_m = X \left[\frac{Gr^4}{Re^{11}} \right]^{1/7}$, pour différentes vitesses du co-courant et pour $Fr=2250$. Des constatations identiques à celles trouvées précédemment, sont déduites à propos de cette figure révélant que l'influence de la vitesse extérieure apparait loin de la sortie du jet. On note également qu'une augmentation de la vitesse du co-courant entraîne une légère diminution de la température de surface dans la région intermédiaire et la région de panache.

L'examen de la Figure 5(b) qui représente l'évolution de cette grandeur pour un nombre de Froude égal à 22.5, révèle une concordance entre les résultats dans les différentes régions du jet. Ceci confirme que la vitesse

de l'écoulement secondaire n'a pas d'influence sur la température de surface, même dans la zone de panache en présence d'un écoulement fortement chauffé.

Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié numériquement un écoulement de type jet pariétal laminaire non isotherme évoluant dans un écoulement co-courant. La discussion porte essentiellement sur l'influence de la vitesse du milieu extérieur sur les grandeurs dynamiques et thermique de l'écoulement du jet en comparaison avec le jet simple (jet évoluant dans un milieu au repos).

Les principaux résultats établis dans cette étude montrent que pour un écoulement non-isotherme, deux paramètres peuvent influencer l'écoulement : les forces d'inertie et de flottabilité. En effet, dans un écoulement de jet non-isotherme, trois régions existent. La première, qui se produit près de la sortie du jet, est appelée région de jet pur, où les effets de flottabilité sont négligeables devant les forces d'inertie. Cette région est suivie d'une seconde de transition, région où la flottabilité et l'inertie jouent des rôles également importants. La troisième région, où l'écoulement est loin de la source, est un panache où les effets de l'inertie sont négligeables et la flottabilité devient le seul paramètre important.

En ce qui concerne, l'influence de la vitesse de l'écoulement secondaire sur la structure du jet, on a constaté que, l'augmentation de la vitesse du co-courant modifie légèrement l'écoulement pour un rapport de vitesses $r \leq 0.1$. Par contre, à partir de $r = 0.2$, l'introduction d'une telle perturbation influence l'écoulement principal d'une façon significative.

Nomenclature

b épaisseur de la buse d'éjection, m
 C_f Coefficient de frottement $C_f = 2\tau_p / \rho u_m^2$
 Fr nombre de froude $Fr = Re^2 / Gr$
 Gr nombre de Grashof $Gr = g\beta(T_0 - T_\infty)b^3 / \nu^2$
 Pr nombre de Prandtl $Pr = \mu C_p / \lambda$
 r rapport de vitesses ($r = u_{co} / u_0$)
 Re nombre de Reynolds $Re = bu_0 / \nu$
 Re_x nombre de Reynolds local $Re_x = u_m x / \nu$
 u, v Composantes longitudinale et transversale du vecteur vitesse, $m.s^{-1}$

x, y Coordonnées longitudinale et transversale, m

Symboles grecs

ρ masse volumique du fluide, kgm^{-3}
 μ viscosité dynamique du fluide, $kgm^{-1}s^{-1}$
 λ conductivité thermique du fluide, $wm^{-1}k$
 ν viscosité cinématique du fluide, $m^2.s^{-1}$.

Indices

p valeur à la paroi
 0 valeur à la sortie du jet
 ∞ milieu ambiant
 m valeur maximale

Références

- [1] R. S. Abdulnour, k. Willenborg, J. J. Mcgrath, J. F. Foss et B. S. Abdulnour, Measurements of the convection heat transfer coefficient for a planar wall jet: uniform temperature and uniform heat flux boundary, *Experimental Thermal and Fluid Science*, volume 22, Pages 123-131, 2000.
- [2] D. L. Quintana, M. Amitasy, A. Ortega et I.J. Wagnanski, Heat Transfer in the Forced laminar wall jet, *Int. J. Heat Transfer*, volume 119, Pages 451-459, 1997.
- [3] H. Mhiri, S. El Golli, G. Le Palec et Ph. Bournot, Influence des conditions d'émission sur un écoulement de type jet plan laminaire isotherme ou chauffé, *Rev. Gén. Therm.*, volume 37, Pages 898-910, 1998.
- [4] J. Kechiche, Application des modèles de turbulence à bas nombre de Reynolds pour l'étude des jets pariétaux turbulents, *Ph. D. thèse*, Université de la Méditerranée, France, Université de Monastir, Tunisie, 2006.
- [5] A. Mokni, J. Kechiche, H. Mhiri, G. Le Palec et Ph. Bournot, Inlet conditions effects on vertical wall jets in forced and mixed convection regimes, *Int. J. Thermal sciences*, volume 48, Pages 1884-1893, 2009.
- [6] A. Pantokratoras, The non-similar laminar wall jet along a moving wall, in a free stream and in a free stream/moving wall, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 35, Pages 471-481, 2011.
- [7] S. Habli, N. Mahjoub said, G. Le Palec et Ph. Bournot, Influence of a Coflowing Ambient Stream on a Turbulent Axisymmetric Buoyant Jet, *Journal of heat transfer*, Volume 130, Pages 022201-1, 2008.
- [8] T.B. Nickels et A.E. Perry, An experimental and theoretical study of the turbulent coflowing jet, *J. Fluid Mech.*, Volume 309, Pages 157-182, 1996.
- [9] H. Reichardt, Turbulence Strahlausbreitung in gleichgerichteter Grundströmung, *Forsch. Ingenieurwes.*, volume 30, Pages 133-164, 1964.