

Etude numérique d'un jet plan turbulent à masse volumique variable se développant dans un écoulement co-courant

A. Elkaroui¹, S. Habli², N. Mahjoub Saïd², Ph. Bournot³

¹ LGM, École Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Université de Monastir, Tunisie
e-mail: amel.karoui@hotmail.fr

² LGM, Institut Préparatoire aux Etudes d'Ingénieur de Monastir, Université de Monastir, Tunisie
e-mail: sabra.habli@fsm.rnu.tn
e-mail: nejla.mahjoub@fsm.rnu.tn

³ IUSTI, UMR 6595, Technopôle de Château-Gombert, Marseille, France

e-mail: philippe.bournot@univ-amu.fr

Résumé—On se propose, dans ce travail, d'étudier numériquement l'effet de la vitesse du co-courant sur la production d'entropie d'un jet plan turbulent à masse volumique variable. La résolution des équations moyennées de Navier-Stokes a été effectuée par la Méthode des Volumes Finis (MVF). La fermeture des équations moyennées, gouvernant le problème, en régime turbulent, a été réalisée en utilisant le modèle $k - \varepsilon$. Suite à une étude comparative entre les résultats numériques et ceux expérimentaux, nous avons montré que ces résultats sont satisfaisants. Enfin, nous avons déterminé la production d'entropie pour différents cas de l'écoulement extérieur co-courant. Les résultats ont montré que la présence du co-courant conduit à la diminution de la production d'entropie totale.

Mot clés—Modélisation numérique, modèle $k - \varepsilon$, génération d'entropie, écoulement bidimensionnel, masse volumique variable

I. INTRODUCTION

Les jets turbulents à masse volumique variable interviennent dans plusieurs systèmes industriels tels que les brûleurs à flammes de diffusion.

Par ailleurs, vu l'importance pratique de l'état de l'écoulement secondaire, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'étude des jets turbulents déchargés dans un écoulement co-courant. En effet, Habli et al. [1] ont étudié numériquement un jet plan turbulent dans un environnement co-courant. Ils ont montré, d'une part, que la longueur du cône potentiel augmente lorsque le rapport de vitesse augmente. D'autre part, l'analyse des paramètres moyens et turbulents de l'écoulement ont montré que lors de l'utilisation d'une échelle de longueur de quantité de mouvement, ces paramètres peuvent atteindre une courbe asymptotique pour différents rapports de vitesse.

En outre, ces dernières années, l'attention des chercheurs en thermique est de plus en plus focalisée sur l'utilité du concept de génération d'entropie dans de nombreuses applications telles que les moteurs à combustion et les systèmes de transfert de chaleur par convection. Ce concept

nous permet d'évaluer le caractère irréversible du processus dû à la dissipation visqueuse et au transfert de chaleur.

Ainsi, Gazzah et Belmabrouk [2, 3] ont étudié la génération d'entropie dans les jets ronds turbulents en présence du co-courant. Ils ont montré que les principales raisons de la génération d'entropie sont le transfert de chaleur et le frottement du fluide. De plus, ils ont mis en évidence que le taux de production d'entropie totale augmente dans trois cas : l'augmentation de la température du jet d'air chaud à l'entrée, la diminution de la vitesse du co-courant et l'augmentation des angles de déviation du co-courant. Oztop et Al-Salem [4] ont aussi étudié la génération d'entropie dans des enclos. Ils ont établi que les principales raisons de la génération d'entropie sont le transfert de chaleur et le frottement du fluide. La création d'entropie dans un jet plan turbulent avec oscillations a été étudiée par Cervantes et Solorio [5]. Les résultats établis montrent que la génération d'entropie croît dans la direction de l'écoulement et dépend directement de l'entraînement du fluide ambiant. De plus, la production d'entropie tend vers une valeur maximale, asymptotique, loin de la sortie de l'écoulement, qui confirme les propriétés de similitude de l'écoulement dans la région de champ lointain.

Ainsi, l'objectif de ce travail consiste à étudier numériquement l'effet de la vitesse de l'écoulement extérieur co-courant sur le comportement dynamique et thermique d'un jet plan turbulent à masse volumique variable. Par ailleurs, peu de travaux numériques ont étudié le concept de production d'entropie dans ce type d'écoulement. En effet, le calcul de ce paramètre nous permet de mieux identifier l'origine des pertes et d'évaluer le caractère irréversible du processus. En conséquence, un des objectifs de cette étude est d'enquêter sur l'effet de l'écoulement co-courant sur la production entropie.

II. FORMULATION DU PROBLEME

A. Hypothèses:

On considère un jet d'air non isotherme s'écoulant verticalement à partir d'une buse plane d'épaisseur H . Le jet est déchargé dans un écoulement co-courant (Figure 1). L'écoulement turbulent est supposé bidimensionnel et stationnaire. Le fluide, à masse volumique variable, obéit à la loi des gaz parfaits: $P = \rho r T$.

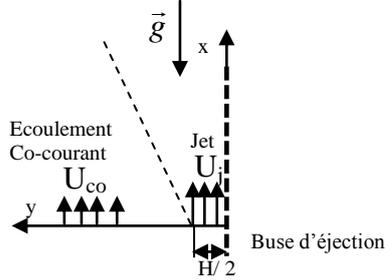


Fig.1 Configuration géométrique de l'écoulement

B. Mise en équations:

Dans le cadre des hypothèses citées précédemment, les équations moyennées, se basant sur la décomposition de Favre, qui gouvernent l'écoulement d'un jet turbulent à masse volumique sont écrites comme suit:

$$\frac{\partial \rho U_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho T U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_j''})$$

Où :

$$\tau_{ij} = \left[\overline{\mu} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \overline{\mu} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \text{ est le tenseur des contraintes}$$

visqueuses.

δ_{ij} est le symbole de Kronecker

$$\overline{\rho u_i u_j} = -\mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \text{ est la tension de Reynolds.}$$

$$\overline{\rho u_j''} = -\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial x_j} \text{ est le flux de chaleur turbulent.}$$

Pour la fermeture du système d'équations nous avons adopté le modèle de turbulence au premier ordre $k - \varepsilon$. Les équations, de l'énergie cinétique de la turbulence et son taux de dissipation, se réduisent à:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta g \overline{\rho''^2} - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

Avec : $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ est la viscosité turbulente.

Ce modèle nécessite l'utilisation des constantes empiriques suivantes:

$$\sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_t = 0.7$$

C. Taux de génération d'entropie locale :

En se basant sur le second principe de la thermodynamique et si les champs de température et de vitesse sont connus, le taux de production d'entropie volumétrique à chaque point du fluide peut être calculé comme suit:

$$S_{gen} = (S_{gen})_{cond} + (S_{gen})_{frott}$$

Où $(S_{gen})_{cond}$ et $(S_{gen})_{frott}$ représentent les taux de production d'entropie dû au transfert de chaleur par conduction et frottement du fluide. Ils sont donnés par les relations suivantes :

$$(S_{gen})_{cond} = \frac{K_{eff}}{T^2} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)$$

$$(S_{gen})_{frott} = 2 \frac{\mu_{eff}}{T} (S_{ij} S_{ij})$$

Où: $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ Avec: μ et μ_t sont respectivement la viscosité moléculaire et turbulente.

La conductivité thermique effective s'écrit comme suit: $K_{eff} = \lambda + \frac{C_p \mu_t}{\sigma_t}$ Avec: λ et $\frac{C_p \mu_t}{\sigma_t}$ sont respectivement la conductivité thermique et turbulente.

S_{ij} désigne le tenseur de déformation des vitesses qui se met

$$\text{sous cette forme : } S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right).$$

D. Conditions aux limites et procédure de la résolution numérique:

Les conditions aux limites sont imposées à la sortie du jet (pour $x=0$ et pour $0 \leq y < H/2$) avec une vitesse U_j , de température T_j , l'énergie cinétique est fixée à $k = 10^{-3} U_j^2$ et la dissipation de l'énergie cinétique est déduite de la relation:

$$\varepsilon = \frac{C_\mu k^{3/2}}{0.03H}. \text{ Le jet évolue dans un écoulement co-courant non}$$

turbulent (pour $x=0$ et pour $y > H/2$) avec une vitesse U_{co} à température ambiante. La simulation numérique est effectuée pour trois rapports de vitesse; $R=0.05, 0.1$ et 0.2 .

La résolution numérique du système d'équations associé à ses conditions aux limites, est effectuée par la Méthode des Volumes Finis (MVF). Le couplage vitesse-pression est résolu grâce à l'algorithme SIMPLE. Le maillage utilisé est non uniforme et s'étend progressivement selon les directions longitudinales et transversales.

III. RESULTATS DE LA SIMULATION NUMERIQUE

On représente sur la Figure 2, l'évolution axiale de la vitesse au centre du jet (U_c) adimensionnée $((U_c - U_{co}) / (U_j - U_{co}))$. Les résultats obtenus à partir de la simulation numérique sont comparés avec les mesures expérimentales de Youssef [6]. Cette figure montre un accord acceptable entre les résultats numériques et expérimentaux. Par ailleurs, la longueur du noyau potentiel est légèrement sous-estimée par la simulation

numérique. En effet, la longueur du noyau potentiel est fortement influencée par les conditions à la sortie du jet, à savoir le nombre de Reynolds, le rapport de masse volumique (fluide injecté/fluide ambiant), les profils de vitesse et de l'intensité à la sortie du jet.

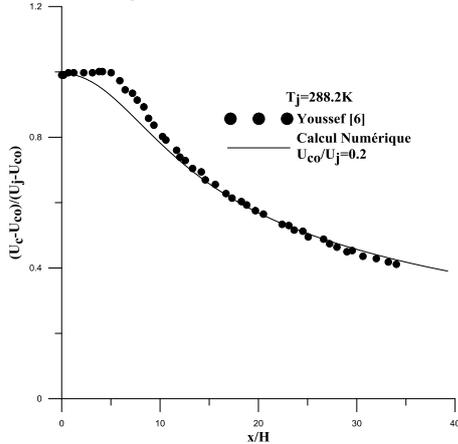


Fig.2 Evolution axiale de la vitesse au centre adimensionnée

Sur la Figure 3, on représente l'effet du rapport de vitesse (vitesse du co-courant/vitesse du jet) sur l'évolution axiale de la vitesse au centre adimensionnée $((U_c - U_{co})/(U_j - U_{co}))$. Les résultats prédits par la simulation numérique montrent que dans la région du cône potentiel, tout près de la sortie du jet, le rapport de vitesse du co-courant n'a aucun effet, et l'écoulement se comporte comme un jet évoluant dans un écoulement au repos. Par contre dans la zone de similitude, loin de la sortie du jet, la vitesse au centre décroît en $(x^{-1/2})$. On constate, également, que les profils de vitesse décroissent de la même manière. Cependant, la présence du co-courant augmente lentement la vitesse axiale sur l'axe.

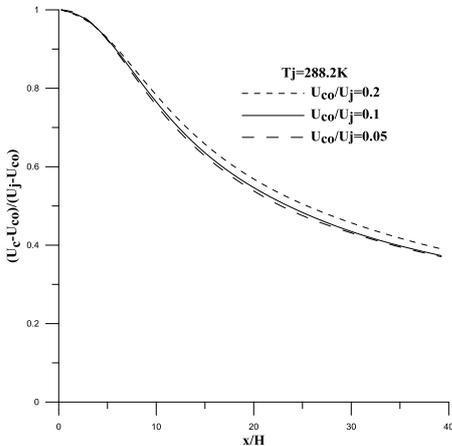


Fig.3 Distribution longitudinale de la vitesse au centre adimensionnée pour différents rapports de vitesse

La variation de la production d'entropie totale en fonction de la température du jet T_j à l'entrée est représentée sur la Figure 4 pour différents rapports de vitesse. Les résultats numériques montrent que l'entropie totale augmente d'une façon quasi-linéaire avec l'augmentation de la température du jet d'air à l'entrée. De plus, l'augmentation de la température

à l'entrée augmente l'efficacité du mélange turbulent conduisant à une augmentation de la production d'entropie totale. Cependant, la présence du co-courant permet de réduire l'efficacité du mélange turbulent et conduit à la diminution de la production d'entropie totale.

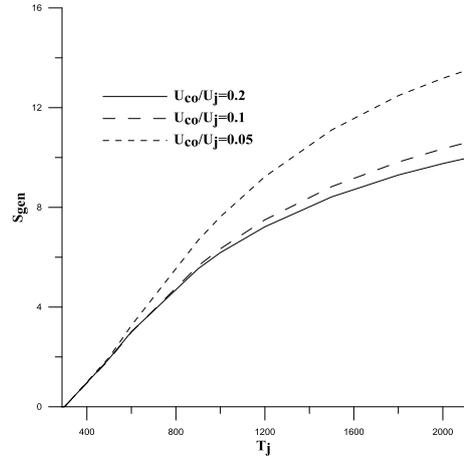


Fig.4 Variation de la production d'entropie totale en fonction de la température du jet à l'entrée pour différents rapports de vitesse

IV. CONCLUSION

Ce travail concerne l'étude numérique de l'écoulement d'un jet plan turbulent à masse volumique variable évoluant dans un écoulement co-courant. L'objectif du travail consiste à prédire l'effet du rapport de la vitesse de l'écoulement extérieur co-courant par rapport à celui du jet en sortie sur le comportement du jet et sur la production d'entropie. Les résultats numériques montrent que notre modèle prédit correctement le comportement des jets turbulents à masse volumique variable en présence du co-courant. Les résultats affirment également que la présence du co-courant conduit à la diminution de la production d'entropie totale. De plus, le taux de production d'entropie totale diminue avec une augmentation du co-courant et une diminution de la température du jet à l'entrée.

RÉFÉRENCES

- [1] S. Habli, N Mahjoub Said, Le Palec G, Bournot H "Numerical study of a turbulent plane jet in a coflow environment" Computers & Fluids, vol 89, pp. 20-28, 2014.
- [2] M.H. Gazzah, and H. Belmabrouk, "Local entropy generation in co-flowing turbulent jets with variable density," International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow vol. 24, pp. 1679-1695, 2014.
- [3] M. H. Gazzah, and H. Belmabrouk, "Directed co-flow effects on local entropy generation in turbulent heated round jets," Computers & Fluids, vol 105, pp. 285-293, 2014.
- [4] H.F. Oztop, and K. Al-Salem, "A review on entropy generation in natural and mixed convection heat transfer for energy systems," Renew. Sustain. Energy Rev., vol.16, pp. 911-920, 2011.
- [5] J. Cervantes, F. Solorio, "Entropy generation in a plane turbulent oscillating jet" International Journal of Heat and Mass Transfer, vol 45, pp. 3125-3129, 2002.
- [6] J. Youssef, "Etude expérimentale d'un jet plan turbulent se développant dans un flux uniforme en co-courant" Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie en matériaux mécanique énergétique et aéronautique, 2012.