

Effet de la variation de la température sur les structures tourbillonnaires dans un écoulement swirlé

Yoldoss CHOUARI^{1*}, Wassim KRIAA¹, Hatem MHIRI¹, Phillipe BOURNOT²

¹Unité Thermique et Thermodynamique des Procédés Industriels (UTTPI), ENIM, Monastir, Tunisie

²UNIMECA, Marseille, France

* (yoldoss chouari : yoldoss.chouari@yahoo.fr)

Résumé - Les écoulements de type jet sont fréquemment rencontrés dans différentes applications industrielles telles que le séchage, le refroidissement, la propulsion, la climatisation, l'isolation dynamique, etc....

On s'intéresse aux jets swirlés. Ce sont des écoulements hélicoïdaux fortement tridimensionnels. Ce type d'écoulement trouve son intérêt dans différentes applications techniques comme les séparateurs à effet de cyclones et surtout dans divers types de brûleurs.

On a effectué la simulation d'un jet swirlé généré par injection tangentielle à l'aide du code commercial Fluent qui nous a permis d'avoir un bon accord entre les résultats numériques et expérimentaux. Dans cette étude, on va présenter l'effet de la variation de la température sur l'écoulement et les structures tourbillonnaires.

Nomenclature

D	diamètre cylindre, m	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
d	diamètre injecteur, m	ε	taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence, $m^2.s^{-3}$
L	longueur total, m	<i>Indices et exposants</i>	
L_c	longueur chauffée, m	-	moyenne de Reynolds
k	énergie cinétique de turbulence, $m^2.s^{-2}$	~	moyenne de Favre
U	vitesse axiale, $m.s^{-1}$	w	paroi
u_i	composantes de la vitesse moyenne, $m.s^{-1}$	av	moyenne
x_i	coordonnées cartésiennes (i=1,2,3), m	c	centrale
K	température, K	av	moyenne
<i>Symboles grecs</i>		inj	injecteur
μ	viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$	ex	extérieur

1. Introduction

Les jets 'swirlés' sont des écoulements hélicoïdaux fortement tridimensionnels. Ce type d'écoulement trouve son intérêt dans différentes applications techniques comme le tube vortex Ranque-Hilsch, les séparateurs à effet de cyclones et surtout dans divers types de brûleurs. Les écoulements 'swirlés' restent un important sujet d'étude, car ils favorisent la stabilisation de la flamme, ils sont couramment employés pour mélanger efficacement le combustible à l'air et ils permettent d'améliorer l'échange thermique entre les fluides.

Plusieurs études sur les écoulements 'swirlés' ont été menées, tant du point de vue expérimental que du point de vue numérique. O. Lucca-Negro et al [1] ont présenté un guide bibliographique sur les différents études effectuées (expérimentales, numériques, théoriques) sur les structures tourbillonnaire (vortex breakdown) d'un écoulement swirlé.

Ces structures tourbillonnaires peuvent être modifiées en faisant varier les conditions d'émission telles que : le nombre de Reynolds, nombre de 'swirl', la méthode de génération de l'écoulement, la fréquence et l'amplitude de pulsation des jets.

H.F. Guo et al[2] ont réalisé une étude numérique sur un écoulement compressible 'swirlé' engendré par injection tangentielle. Ils ont étudié l'effet de paramètres géométriques des injecteurs (le nombre, le diamètre, inclinaison, position et longueur) sur l'écoulement.

On caractérise ce type d'écoulement par un nombre sans dimension, le nombre de 'swirl':

$$S = \frac{G_{\theta}}{RG_Z}$$

Où R est le rayon, G_{θ} le flux de quantité de mouvement tangentielle et G_Z le flux de quantité de mouvement dans la direction de propagation.

Ce nombre permet la comparaison du moment axial et angulaire de l'écoulement et la classification des différents types d'écoulements 'swirlés' existants.

2. Mise en équation

La modélisation numérique de l'écoulement tridimensionnel et tourbillonnaire se base sur la résolution des équations de conservation (1),(2) et (4) de manière à calculer en tout point du système modélisé les grandeurs caractéristiques du fluide.

Equation de conservation de la masse
$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Equations de conservation de la quantité de mouvement

$$\underbrace{\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t}}_{\text{Transport}} + \underbrace{\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i)}{\partial x_j}}_{\text{Forces dues au Pression}} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right]}_{\text{Forces de viscosité}} + \underbrace{\frac{\partial (-\overline{\rho u'_i u'_j})}{\partial x_j}}_{\text{Forces générés par la turbulence}} + \underbrace{F_i}_{\text{Forces de volume}} \quad (2)$$

Où les $(-\overline{\rho u'_i u'_j})$ sont les composantes du tenseur des contraintes de Reynolds. Pour les relier à l'écoulement moyen, on a recours au concept de Boussinesq qui permet de les exprimer en fonction des gradients des vitesses moyennes :

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\bar{\rho} k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3)$$

Equations de conservation de l'énergie

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{T})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{T})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} - \overline{\rho u'_j T''} \right) + S_h \quad (4)$$

S_h : Energie due à la réaction chimique et au rayonnement.

3. Etude numérique

On a étudié la configuration expérimentale de F.chang and V.K.Dhir [3]. C'est un écoulement "swirl", dans une cylindre de longueur $L=1.5\text{m}$ de diamètre $D=88,9\text{ mm}$, généré par l'injection tangentielle de l'air par 6 buses de diamètre $d=22,23\text{ mm}$. Une partie de la section de test ($L_c= 1.08\text{m}$) est chauffée par une puissance maintenue à environ 250W ce qui a donné un flux de chaleur d'environ 860 W/m^2 sur la paroi interne.

Une vue générale du dispositif est donné sur la figure 1 :

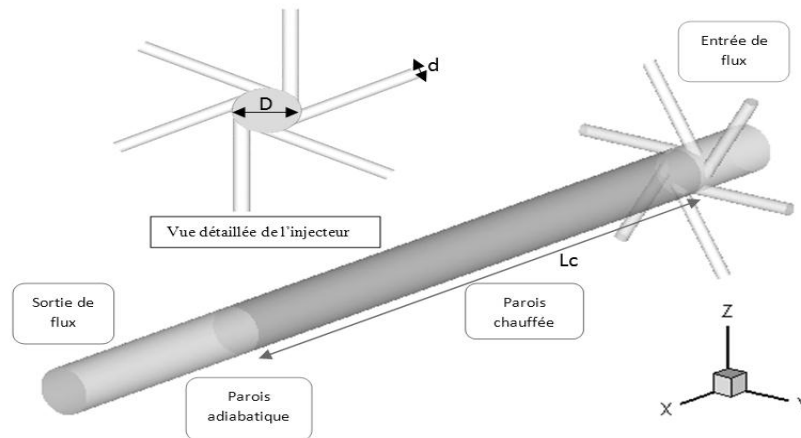


Figure1: Géométrie étudiée

Le maillage du domaine est constitué de 1233024 volumes de contrôle ou cellules mixtes. Partout dans le domaine et où la géométrie le permet, les cellules hexaédriques ont été préférées à celles tétraédriques, pour assurer la création d'un maillage qui s'adapte bien à la géométrie considérée. En l'occurrence, seul le maillage au niveau des injecteurs nécessite de recourir à des cellules tétraédriques.

Afin de simuler convenablement l'écoulement d'un jet "swirlé", on a considéré les hypothèses suivantes :

- ✓ L'écoulement stationnaire et turbulent
- ✓ Le fluide utilisé est l'air considéré comme gaz parfait $\rho=f(T, P)$
- ✓ Effet de rayonnement négligé
- ✓ Les propriétés physiques (viscosité, chaleur spécifique, conductivité thermique...) sont constantes.

Pour résoudre les équations (2), (3) et (4) qui gouvernent l'écoulement "swirlé", il est nécessaire de fixer convenablement les conditions aux limites du problème traité qui, en se référant aux données de F.chang and V.K.Dhir [1] se présentent comme suit :

	Type de condition	données
Entrées jet "swirlé"	"Velocity-inlet "	$Re =12500$
Sortie de flux	"Pressure-outlet"	Pression atmosphérique
Parois chauffée	Heat flux	$Q= 860\text{ W/m}^2$

Tableau 1 : Conditions aux limites

4. Résultats et discussions

Dans cette partie, nous présentons une analyse sur le comportement d'un jet "swirlé". Nous avons comparé la validité des modèles k- ϵ réalisable et RSM pour décrire cet écoulement.

Nous nous intéressons ensuite à l'influence de la variation de la température sur les champs dynamique et thermique.

4.1. Validation du modèle

Pour valider notre code de calcul numérique, nos résultats obtenus par les deux modèles de turbulence (k- ϵ réalisable et RSM) sont comparés à ceux trouvés expérimentalement par F.Chang and V.K.Dhir [3].

La figure 2 présente les profils de vitesse axiale U adimensionnée par la vitesse moyenne U_{av} et de température adimensionnée $(T-T_c)/(T_w-T_c)$ avec T_c est la température au centre et T_w est la température sur la paroi solide.

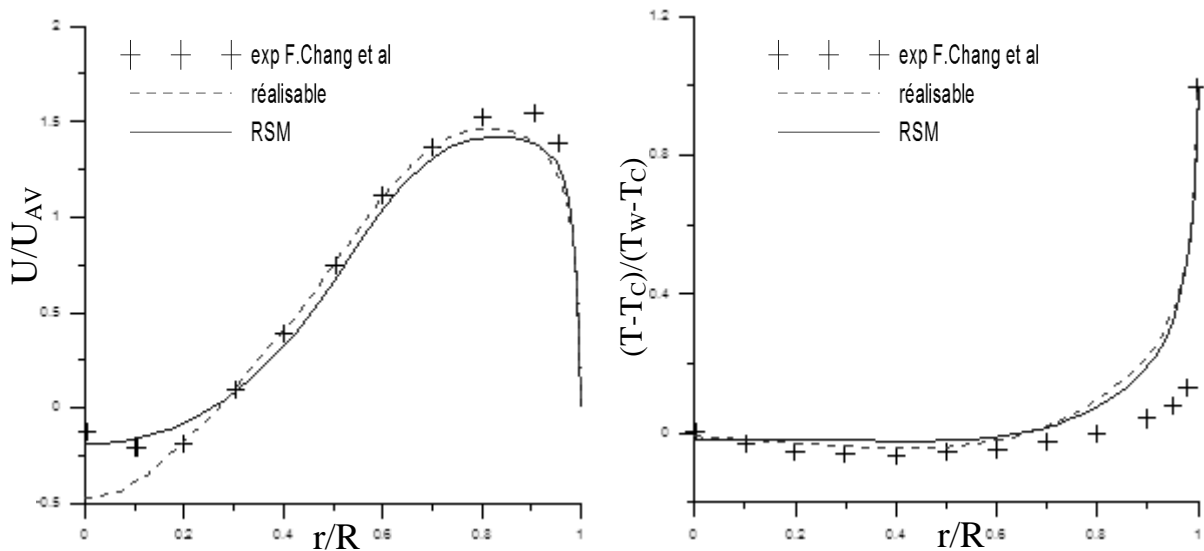


Figure 2 : Profils de la vitesse axiale et température adimensionnées pour la position axiale $x/D=6$

Les résultats montrent que le modèle RSM permet de mieux décrire l'écoulement inverse localisé dans la région centrale du tube. On relève une différence entre les profils de température adimensionnée obtenus par notre simulation et l'expérimentale de F.Chang et al.[3]. Cette différence peut être expliquée par l'effet de rayonnement qu'on a négligé dans notre simulation.

4.2. Effet de la variation de la température

Dans cette partie, on analyse l'effet de la variation de la température d'injection sur les zones tourbillonnaire d'un écoulement 'swirlé'. Pour cela, on propose d'étudier les deux cas suivant :

- Cas A : $T_{inj}=300K$; $T_{ex}=300K$
- Cas B : $T_{inj}=500K$; $T_{ex}=300K$

Sur la figure 3, on donne les lignes de courant tridimensionnelles pour les cas tests A et B. Les résultats montrent que l'aspect général des lignes de courant semble le même pour les deux cas tests ; en effet on voit bien que les lignes de courant ont une forme hélicoïdale. On note que la période d'ondulation des lignes de courant diminue en s'approchant de l'axe du cylindre jusqu'à atteindre un point d'arrêt. Cependant en observant bien la figure, on remarque que pour le cas A, où la température d'injection est de 300K, les lignes de courant centrale se présente plus étalées que celles du cas B.

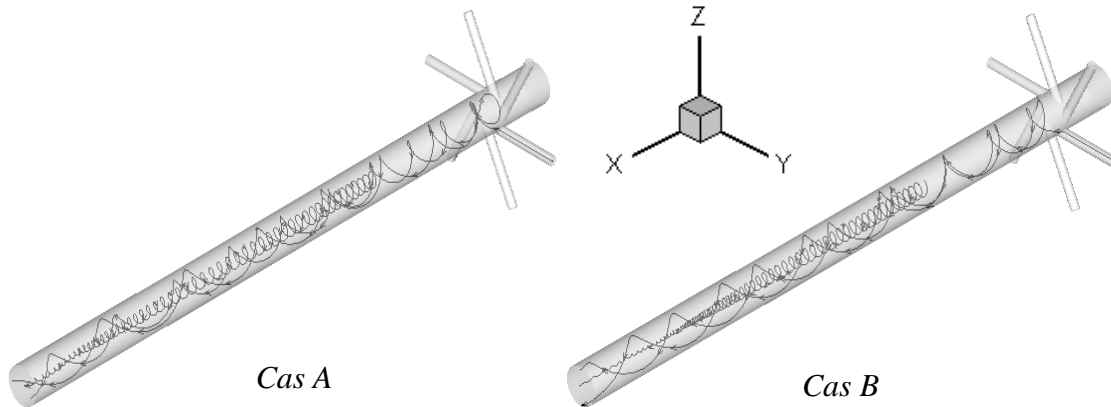


Figure 3 : lignes de courant tridimensionnelles des cas tests A et B

Afin de visualiser les zones de recirculation, on présente sur la figure 4 les contours de vitesse axiale et lignes de courant sur le plan ($Z=0$) respectivement pour les cas test A et B. D'après cette figure, on peut observer que les zones de recirculation du cas B sont plus intenses et moins étalées sur la longueur du cylindre, ceci est probablement dû à l'augmentation de la température du débit d'injection qui a accéléré l'écoulement près de la paroi du cylindre (force de flottabilité). Cette accélération accentue la dépression dans la région centrale provoquant un écoulement inverse plus intense et l'aspiration de l'écoulement externe.

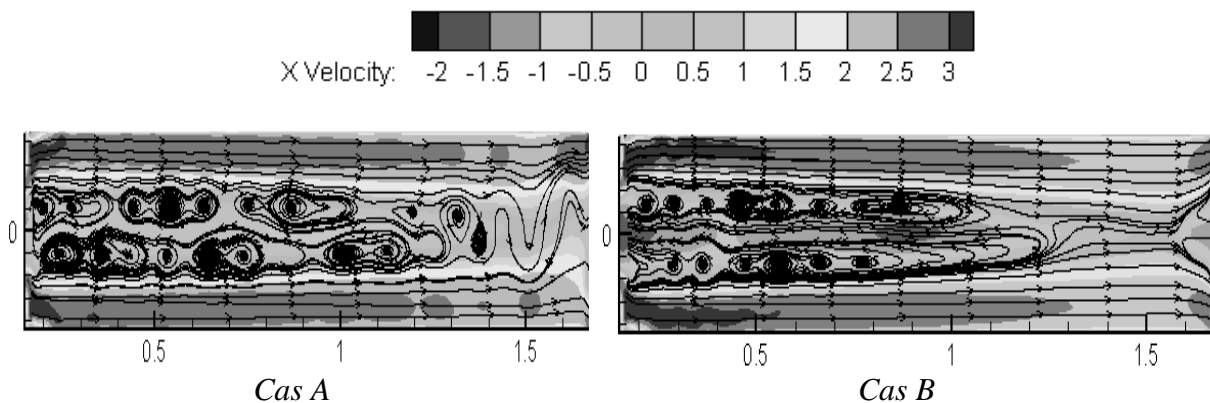


Figure 4 : Contours de vitesse axiale et lignes de courant sur le plan ($Z=0$) respectivement pour les cas test A et B

La figure 5 trace le profil de température axiale adimensionnée par la température du débit injecté T_{inj} sur l'axe centrale pour les deux cas tests A et B. On peut constater que la chaleur transmise par la paroi chauffée a permis d'atteindre une température maximale sur l'axe centrale de $T_{inj}+6\%$ pour le cas A (avec $T_{inj}=300K$) et $T_{inj}+3\%$ pour le cas B (avec $T_{inj}=500K$). Cette différence est probablement due d'une part à la zone de recirculation qui emprisonne l'écoulement au centre du cylindre et ne lui permet pas d'avoir un contact direct avec la paroi chauffée et d'autre part à l'écoulement aspiré de l'extérieur (déjà constaté précédemment $T_{ex}=300K$).

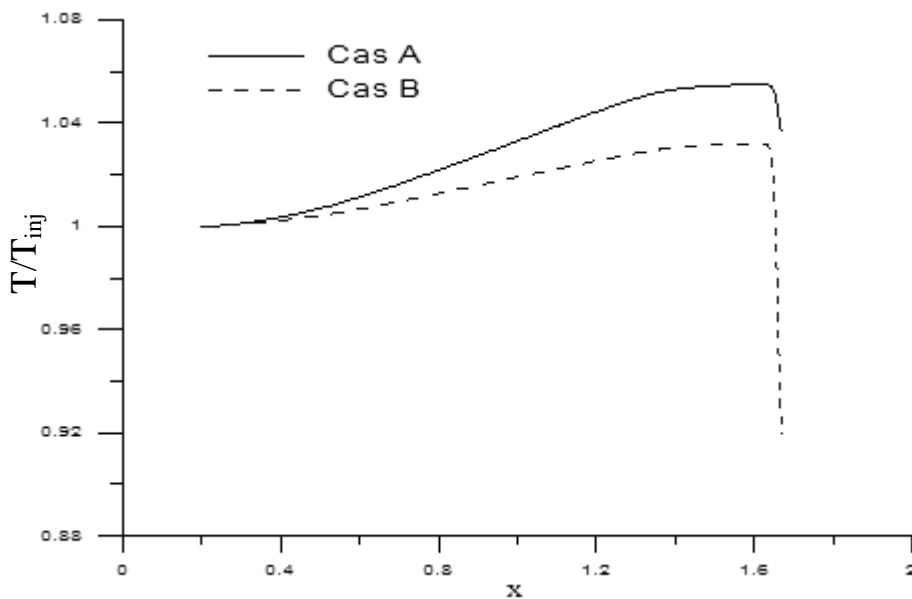


Figure 5 : Profils de la température adimensionnée sur l'axe central pour les deux cas tests A et B

5. Conclusion

Les résultats de l'étude numérique tridimensionnelle de l'écoulement d'un jet swirlé engendré par injection tangentielle ont montré que le modèle de turbulence RSM décrit mieux les zones tourbillonnaire de l'écoulement comparais au modèle de turbulence k- ϵ réalisable. Mais les résultats obtenue par le modèle RSM peuvent être améliorés en adoptant un modelé de rayonnement (DO ou DTRM).

D'après la comparaison des résultats obtenus par la variation de la température du débit d'injection, on peut dire que l'augmentation de la température permet l'accélération de l'écoulement. Cette accélération accentue la dépression dans la région centrale provoquant un écoulement inverse plus intense et l'aspiration de l'écoulement externe.

Références

- [1] O. Lucca-Negro, T. O'Doherty, Vortex breakdown: a review, Progress in Energy and Combustion Science 27 (2001) 431±481
- [2] H.F. Guo, Z.Y. Chen, C.W. Yu, Simulation of the effect of geometric parameters on tangentially injected swirling pipe airflow, Computers & Fluids (2009)
- [3] F. Chang and V. K. Dhir, Turbulent flow field in tangentially injected swirl flows in tubes, Int. J. Heat and Fluid Flow (1994), Vol. 15, No. 5