

Etude comparative des jets elliptiques et tourbillonnaires

A. KHELIL^{a,*}, H. NAJI^{b,c}, L. LOUKARFI^a, M. BRAIKIA^a, Y. BOUHAMIDI^a, S. NECHAD^a

^aLaboratoire de Contrôles, Essais, Mesures et Simulations Mécaniques, Université de chlef, chlef, Algerie, khelila@yahoo.fr

^bLaboratoire Génie Civil et géo-Environnement & Université d'Artois, F-62400 Béthune, France.

^cUniversité Lille Nord de France, Lille, France)

Résumé :

Cette étude présente une simulation numérique tridimensionnelle des caractéristiques aérodynamiques de jets turbulents soufflés à travers deux diffuseurs à géométries différentes. Le premier diffuseur à une forme elliptique avec différents rapports d'aspect, tandis que le second engendre des jets tourbillonnaires à travers un orifice muni d'ailettes inclinées de 60°. Une comparaison des résultats numériques du jet tourbillonnaire et ceux du jet elliptique, en gardant le même diamètre hydraulique pour l'orifice de soufflage et les mêmes conditions d'écoulement vers le milieu ambiant, est présentée et commentée. La simulation numérique est réalisée via le modèle de turbulence des contraintes de Reynolds (RSM). La méthode numérique utilisée est celle des volumes finis avec un maillage non structuré de type tétraédrique. A la lumière des résultats obtenus, on constate que le jet tourbillonnaire assure, comparativement à tous les jets elliptiques étudiés, une meilleure stabilité dynamique avec un important épanouissement radiale des vitesses et ce dans toutes les sections du jet résultant.

Abstract:

This study presents a three-dimensional numerical simulation of aerodynamic characteristics of turbulent jets blown through two diffusers with different geometries. The first diffuser is an elliptical shape with different aspect ratios, while the second generates the swirling jet through an orifice provided with 60 ° inclined vanes. A comparison of the numerical results of the swirling jet and those of the elliptical jets, keeping the same hydraulic diameter to the blowing port and the same flow conditions to the ambient environment, is presented and discussed. The numerical simulation is performed via the turbulence model Reynolds stress (RSM). The numerical method used is that of finite volume with an unstructured tetrahedral mesh type. In the light of the results, we find that the vortex jet provides compared to all studied elliptic jets, improved dynamic stability with a large radial velocities spreading in all sections of the resultant jet.

Mots clefs :

Jet elliptique, jet tourbillonnaire, turbulence, rapport d'aspect, simulation numérique.

1 Introduction (16 gras)

Les écoulements impliquant des jets se rencontrent dans une grande variété d'applications industrielles. La plupart des jets sont turbulents et sont utilisés dans la technologie des systèmes de climatisation, de refroidissement, de combustion et de séchage, etc. L'imposition du tourbillonnement favorise les processus de mélange ainsi que les transferts de masse et de chaleur. Il favorise des changements des propriétés physiques et chimiques de l'écoulement moyen ainsi que les caractéristiques turbulentes. Sous l'effet du tourbillonnement, les particules fluides ont tendance à s'éloigner de l'axe sous l'effet de la force centrifuge. Par contre, l'effet essentiel de la turbulence est un accroissement de la diffusion au sein du fluide. La diffusion turbulente entraîne une homogénéisation très rapide des milieux. Les jets libres turbulents ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche expérimentaux et numériques en vue de montrer l'importance de la turbulence et l'influence du tourbillonnement pour l'écoulement étudié. La plupart des travaux effectués sur les jets libres sont orientés vers les chambres de combustion des moteurs, des réacteurs nucléaires et les brûleurs afin d'obtenir un mélange homogène de carburant et de comburant [1,2]. Les jets tourbillonnaires sont particulièrement intéressants dans la mesure où ils incorporent les caractéristiques de l'écoulement rotatif. La nature du système de soufflage, la disposition, le nombre des jets, l'inclinaison des ailettes, la température de l'air soufflé sont autant de paramètres nécessaires pour parvenir à la maîtrise de jet rotationnel [3-5]. Lee et Baek [6] ont noté qu'il y avait une différence notable dans le taux d'épanouissement dans la direction radiale le long des plans majeur et mineur. Ils ont constaté aussi que les effets de rapport d'aspect sur les caractéristiques de la turbulence du jet elliptique étaient apparents, et en particulier le cas de jet elliptique de rapport d'aspect $AR = 2$ exhibe des caractéristiques de forte intensité de turbulence dans les champs d'écoulement proches de l'orifice de soufflage. Quinn [7] a effectué des mesures par anémomètre à fil chaud sur un jet libre turbulent, isotherme et incompressible issu d'une plaque à orifice elliptique vif. Ils ont montré que le mélange est plus élevé que pour les jets ronds et les jets elliptiques sortant des buses profilées. Les effets de la géométrie des jets isothermes à l'entrée du diffuseur de soufflage sur le processus de mélange à densité variable ont été étudiés numériquement par Imine et al. [8]. Les jets étudiés sont issus d'un orifice rectangulaire et elliptique avec un rapport d'aspect $AR = 2:1$. Ils ont constaté que la géométrie asymétrique améliore sensiblement le mélange en comparaison avec le cas axisymétrique. Koseoglu et Baskaya [9] ont étudié les différences entre les jets ronds impactant et les jets elliptiques, en termes de caractéristiques de champ d'écoulement et de transfert thermique. Ils ont constaté que les différences sont réduites avec l'augmentation de la distance du jet à la plaque. Kuznik et al. [10] ont testé quatre modèles de turbulence à deux équations, à savoir le modèle $k-\varepsilon$ standard, le modèle $k-\varepsilon$ réalisable, le modèle $k-\varepsilon$ -RNG et le modèle $k-\varepsilon$ -SST. Ils ont constaté que, même si les modèles peuvent raisonnablement prédire les jets chauds et isothermes, aucun de ces modèles n'est fiable pour simuler les jets froids. Sur la base de certains travaux [11], il a été suggéré qu'un modèle de turbulence d'ordre deux de type RSM serait plus adéquate pour la simulation des enceintes ventilées avec des effets thermiques. L'effet de différents paramètres sur le développement des écoulements derrière un diffuseur à ailettes inclinées a été largement étudié expérimentalement et numériquement par Raj et Ganesan [12]. Ce travail a mis en évidence les principales caractéristiques du champ d'écoulement générées par diffuseur à ailettes inclinées. L'originalité de cette étude est de trouver le meilleur angle des ailettes en utilisant des modèles de turbulence. Ils ont constaté que pour un tourbillonnement faible, le modèle $k-\varepsilon$ standard est suffisant, alors que pour un fort tourbillonnement, c'est le modèle des contraintes de Reynolds (RSM) qui convient le mieux. Ahmadvand et al. [13] ont étudié expérimentalement et numériquement l'influence de diffuseur à ailettes axiales sur l'augmentation du transfert de chaleur et l'écoulement de fluide turbulent. Leur étude a été effectuée pour trois angles d'ailettes de 30° , 45° et 60° avec des conditions uniformes de flux de chaleur, l'air étant utilisé

comme fluide de travail. Ces auteurs ont confirmé que l'utilisation d'ailettes, pour générer de tourbillonnement, conduit à un transfert de chaleur plus élevé par rapport à celui obtenu à partir de tubes sans ailettes. Ils ont constaté aussi que le rendement thermique augmente lorsque l'angle d'ailette est élevé et diminue quand le nombre de Reynolds augmente. Escue et Cui [14] ont réalisé une étude numérique d'un écoulement tourbillonnaire à l'intérieur d'un tuyau droit. Les simulations sont effectuées en utilisant le logiciel Fluent. Dans cette étude, les modèles de turbulence utilisés sont les modèles RNG k-ε et le modèle à contraintes de Reynolds (RSM). Ces auteurs ont constaté que le modèle RSM est plus approprié [15]. Pour cette étude, nous nous intéressons à l'influence de la géométrie de l'orifice de soufflage sur la structure d'un jet libre turbulent. La simulation numérique porte sur un jet composé d'un gaz léger comme l'air sortant d'un orifice elliptique conique avec différents rapports d'aspect ou d'un orifice à ailettes inclinées avec un angle de 60° (en gardant le même diamètre hydraulique pour les orifices et les mêmes conditions d'émission) vers le milieu ambiant. Ce manuscrit s'organise autour de quatre parties. Dans la première partie, on présente une revue bibliographique sur les jets elliptiques et tourbillonnaires. On y expose aussi les principaux résultats établis. Dans la deuxième partie, on présente les modèles et la formulation mathématique des cas considérés pour les simulations numériques mises en œuvre. Dans la troisième partie, on développe à l'aide du logiciel *Fluent*, une procédure pour obtenir la solution numérique. Les résultats seront comparés avec les résultats d'un jet tourbillonnaire disponibles dans la littérature [1, 2 et 3]. La validation et la discussion des résultats obtenus sont présentées dans la dernière partie afin de choisir la meilleure configuration qui assure une stabilité rapide et un large épanouissement.

1. Simulation numérique

Le présent travail traite la simulation numérique d'un écoulement cisailé de type jet libre turbulent isotherme tridimensionnel. Celui-ci est issu d'un orifice elliptique conique ou d'un un orifice à ailettes inclinées avec angle de 60° et peut avoir plusieurs rapports-d'aspect (AR). L'analyse de l'écoulement turbulent vise à déterminer le champ moyen de vitesses pour le jet libre. Une telle analyse est réalisée en utilisant la méthode des volumes finis et le modèle de turbulence des contraintes de Reynolds (RSM). Les simulations tridimensionnelles ont été menées à bien via code de calcul Fluent 6en considérant toutes les géométries de l'orifice elliptique (quatre au total). Il convient de noter que ces simulations ont été accomplies sur un ordinateur (PC) doté d'un microprocesseur Pentium 4HT avec une fréquence d'horloge de 2.13 GHz et de 3Go de mémoire vive (RAM). La prédiction numérique a été réalisée en conjecturant que l'écoulement est stationnaire, rotationnel et isotherme. Par ailleurs, les algorithmes PRESTO et SIMPLE ont été utilisés respectivement pour l'interpolation de la pression et le couplage de la pression avec la vitesse. Notons qu'ici, la pression est fixée à 101000 Pa (1Atm).

2-1 Modèle de turbulence

Pour un écoulement stationnaire, tridimensionnel, incompressible et turbulent d'un fluide ayant des propriétés physiques constantes, les équations gouvernantes sont l'équation de conservation de la masse et les équations de quantité de mouvement, lesquelles sont comme suit:

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad (2)$$

Où U_i désigne la vitesse moyenne, u'_i est la composante fluctuante correspondante, $-\overline{\rho u'_i u'_j}$ sont les tensions (contraintes) de Reynolds qui nécessitent d'être modélisées afin d'assurer la fermeture des équations. Il convient de noter qu'ici, les variations de température sont négligeables et le nombre de Mach est faible (< 0.3). Ici, seul le modèle RSM a été utilisé. Il est maintenant bien connu que dans les écoulements turbulents où les effets de non-équilibre sont importants, l'hypothèse de Boussinesq n'est plus valide et les résultats des modèles basés sur cette hypothèse peuvent s'avérer inexacts. Aussi, les modèles des contraintes de Reynolds ont montré des performances prédictives supérieures par rapport aux modèles qualifiés d'isotropes (basés sur une telle hypothèse). Par conséquent, les modèles anisotropes tels que les modèles à contraintes de Reynolds (RSM) deviennent nécessaires pour une prédiction fine des flux turbulents. Dans ces modèles, les tensions de Reynolds sont gouvernées par une équation de transport qui peut être formulée comme suit:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j})}_{\text{Convection}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u'_i u'_j} \right)}_{\text{Diffusion moléculaire}} = \underbrace{D_{T,ij}}_{\text{Diffusion turbulente}} + \underbrace{P_{ij}}_{\text{production}} \quad (3)$$

$$+ \underbrace{\phi_{ij}}_{\text{Effort de pression}} + \underbrace{\varepsilon_{ij}}_{\text{Dissipation}} + \underbrace{F_{ij}}_{\text{Production par le system de rotation}}$$

où les différents termes (de gauche à droite) représentent, respectivement, la convection, la diffusion, la production, la contrainte-pression, dissipation visqueuse et la production supplémentaire des contraintes. Notez que les termes de convection et de production sont exacts, tandis que les termes restants doivent être modélisés [16]. Pour plus de détails, le lecteur pourra consulter, par exemple, les références [17, 18].

2-2 Description du problème

L'écoulement de type jet libre à travers un orifice elliptique conique, avec différents rapports d'aspect (AR) ou de type jet tourbillonnaire, est fortement influencé par les effets de changement de géométrie de l'orifice. Pour mettre en lumière ces effets, le maillage doit être assez raffiné. Ensuite, la simulation passe par un choix judicieux de différents paramètres du code de calcul.

Tableau 1: les dimensions de l'orifice elliptique conique et de l'orifice à 14 ailettes inclinées à 60°.

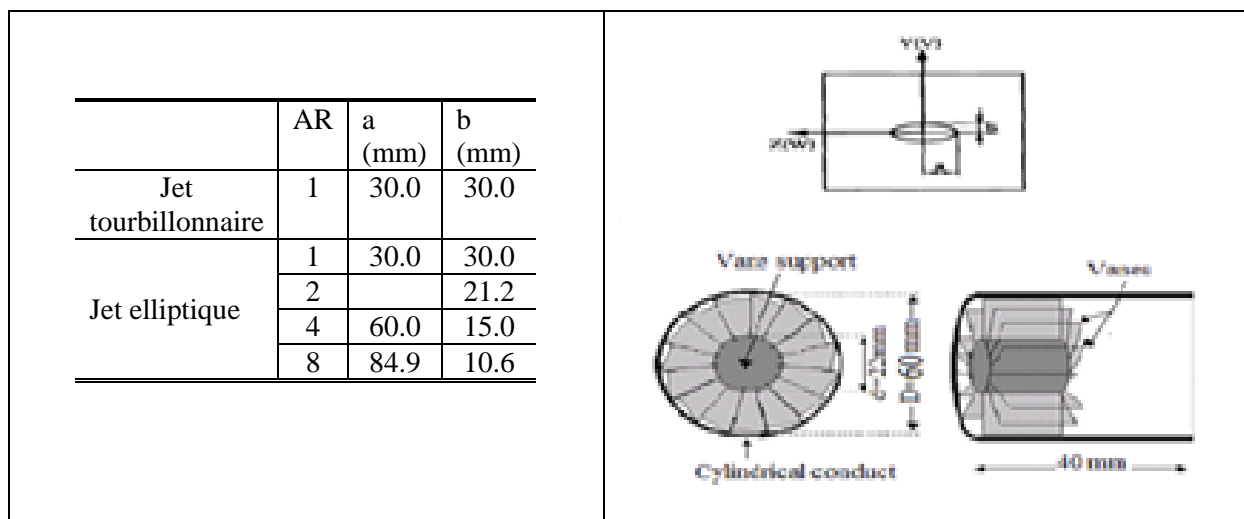


Figure 1: Schéma du dispositif de générateur du jet elliptique [6] et du jet tourbillonnaire [1-5]

2. Géométrie et maillage

La Figure 1 présente succinctement les dispositifs considérés dans cette étude. Le jet est caractérisé par un jet d'air sortant d'une buse, à une vitesse $U = 10 \text{ m/s}$ et à une température de 18°C vers le milieu ambiant. Le fluide est viscosité dynamique $\mu = 1.789 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$, et de masse volumique $\rho =$

1.225 kg/m^3 . La buse a un diamètre équivalent (D_e) de 60 mm et une épaisseur de 4 mm (voir Table 1 et Figure 1). Le deuxième cas est caractérisé par un diamètre $D = 400 \text{ mm}$, et une longueur (X) de 1000 mm (voir Fig.2). Le préprocesseur Gambit est utilisé pour générer la géométrie, et le maillage de domaine étudié. Le maillage adopté, est un maillage non uniforme sous forme de tétraèdres/hybrides (Fig.2). Cette figure montre la géométrie et le maillage de l'orifice adopté ayant des rapports d'aspect $AR = 1; 2; 4$ et 8 . Des calculs sur différents maillages (voir Fig. 3) montrent que la profil de la vitesse radiale ne change pas de manière significative. Ainsi, on peut conclure que la solution est indépendante du maillage. Le type de maillage utilisé, nous a permis d'engendrer un nombre de nœuds d'environ 2790648 pour les différentes géométries. Notons que, pour notre étude, les surfaces des cellules ne sont pas nécessairement planes. Pour calculer les volumes des cellules et les vecteurs de surface de leurs faces, des approximations appropriées sont nécessaires. La méthode la plus simple est de représenter la face de la cellule par une série de triangles plans (voir Fig. 2).

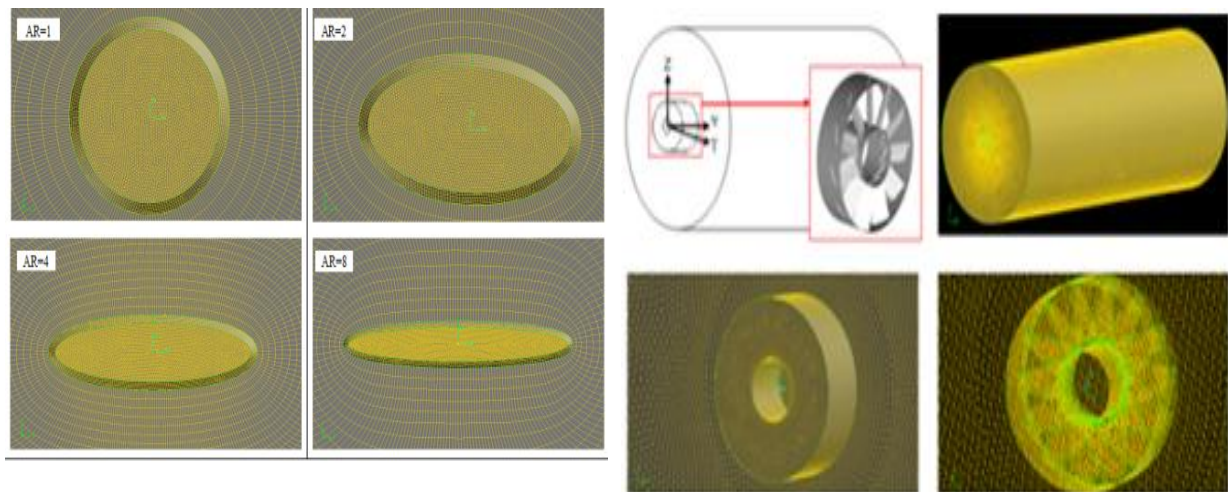


Figure 2:Domaine de calcul et grille de maillage.

Figure 3: Indépendance de la solution vis-à-vis du maillage. Cas jet elliptique avec $AR=1$.

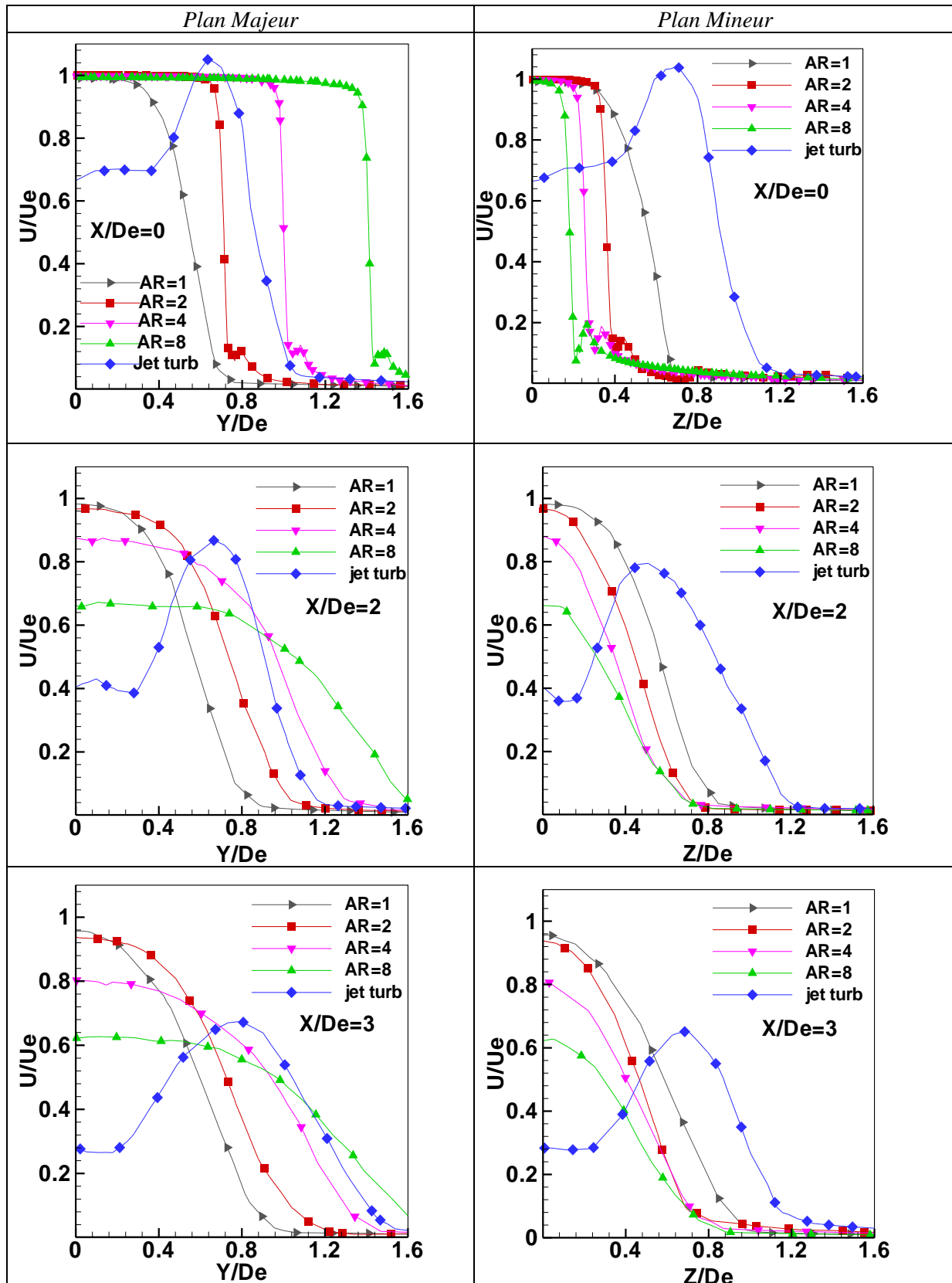
3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites utilisées dans cette étude sont les suivantes: vitesse à l'entrée prescrite, pression à la sortie et conditions d'adhérence aux parois.

4. Résultats et discussions

La figure 4 présente et compare les profils adimensionnels U/U_e des jets tourbillonnaire et elliptique aux stations $x/D_e = 0, 2, 3, 5$ et 7 . On peut remarquer que les allures des courbes du jet tourbillonnaire sont différentes par rapport à celles des courbes des jets elliptiques sur les deux plans majeur (X, Y) et mineur (X, Z). Notant que, dans le cas du jet elliptique avec $AR=1$ et le jet tourbillonnaire, les plans majeur et mineur sont identiques. Pour le jet tourbillonnaire, nous avons, dans le plan (XY) et dans le plan (XZ), des valeurs de pic semblables à chaque station et des distributions sinusoïdales où il y a une diminution de l'amplitude de la vitesse, en raison de l'existence des zones de recirculation internes (voir Figure 4). On note aussi que ces pics sont plus élevés en s'approchant axialement de l'orifice de soufflage. Tout en s'éloignant en aval de l'orifice de soufflage et de la ligne centrale de jet, on remarque que la vitesse diminue jusqu'à la valeur zéro. Le profil des vitesses adimensionnelles se déplace à partir de valeurs élevées, diminue et puis se rapproche enfin de sa valeur asymptotique qui correspond aux conditions de sortie ($U=0$). De ce fait, on peut déduire que l'écoulement s'élargit dans la direction radiale. Pour les jets elliptiques, nous remarquons, que les profils de la vitesse de l'écoulement sont uniformes et présentent des écarts entre eux à chaque station. On note aussi, une

diminution de la vitesse moyenne lorsqu'on augmente le rapport d'aspect. Par ailleurs, on obtient des valeurs des vitesses moins élevées aux niveaux des stations $x/D_e = 2, 3, 5$ et 7 dans les deux plans, sauf à $x/D_e = 0$. La figure 4 montre clairement cette constatation. Notons que pour toutes les stations des plans majeur et mineur, le jet tourbillonnaire exhibe un grand épanouissement dans la direction radiale en comparaison avec le jet elliptique et ce pour tous les rapports d'aspect considérés.



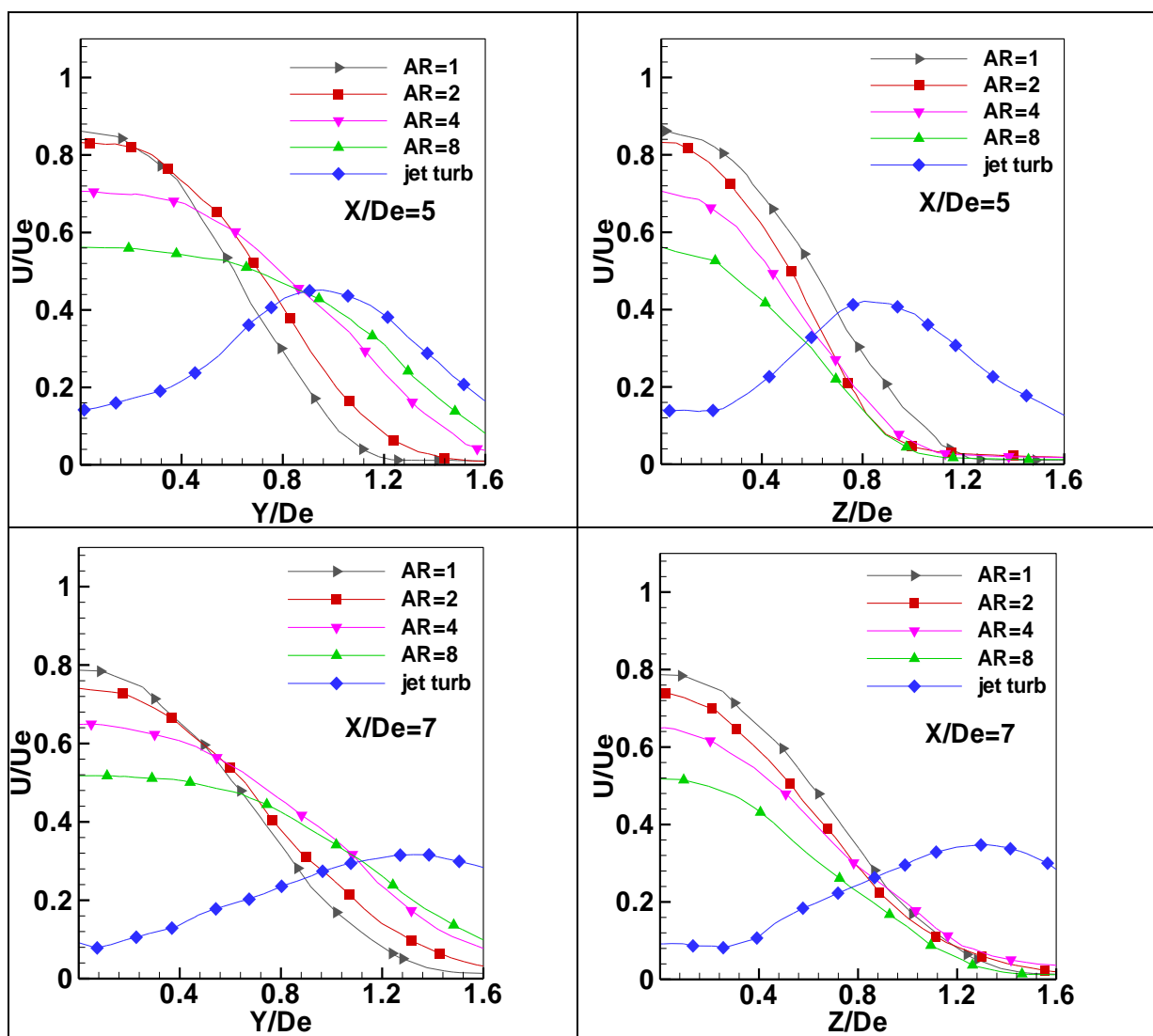


Figure 4: Profils de vitesse U/U_e du jet tourbillonnaire et elliptique paramétrés par le rapport d'aspect à $X/De = 0, 2, 3, 5$ et 7 ; modèle de turbulence RSM.

6. CONCLUSION

L'objectif principal ici est de réaliser une investigation numérique de l'aérodynamique du jet libre turbulent elliptique et tourbillonnaire. D'un point de vue technologique, ces jets peuvent être utilisés dans les dispositifs de climatisation et/ou de ventilation. De ce fait, il semble important de réaliser un bon mélange et une augmentation de l'épanouissement radial. Rappelons que cette étude est basée sur l'analyse des champs moyens de vitesses d'un écoulement libre, lequel est fortement dépendant des conditions géométriques d'orifice. Ainsi, sur la base des résultats expérimentaux et des simulations numériques obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes: L'étude expérimentale a montré que les caractéristiques de l'écoulement turbulent des jets elliptiques, avec 4 rapports d'aspect différents, sont tout à fait différentes comparés à celles des jets ronds et tourbillonnaires. Dans la région proche de l'orifice de soufflage, les jets elliptiques exhibent un entraînement et un mélange plus élevé que les jets ronds. En particulier, dans le cas de jets elliptiques à $AR = 2$, les vitesses moyennes ont des amplitudes plus élevées. De ce fait, ces jets elliptiques, peuvent être employés efficacement dans les dispositifs de ventilation et séchage par exemple. Aussi, pour déterminer la meilleure configuration du jet, une comparaison entre le jet tourbillonnaire et le jet elliptique a été entreprise. Les résultats obtenus montrent clairement que le jet tourbillonnaire induit une zone de recirculation interne caractérisée par une diminution des vitesses au niveau de la ligne centrale. Egalement, on constate que l'influence de la géométrie d'un jet est d'une grande importance. Le jet tourbillonnaire

assure l'amélioration de l'homogénéisation dynamique du mélange avec un étalement radiale important, ce qui permet de traiter un large espace. Il ressort également que le jet tourbillonnaire assure, comparativement à tous les jets elliptiques étudiés, une meilleure stabilité dynamique avec un important épanouissement des vitesses et ce dans toutes les sections du jet résultant.

Référence:

- [1] M. Roudane, L. Loukarfi, A. Khelil, and M. Hemis, Numerical investigation of thermal characteristics of confined rotating multi-jet, *Mechanics & Industry*, 14, 04 (2013)317-324.
- [2] A. Khelil, H. Naji, M. Braikia, and L. Loukarfi, Comparative investigation on heated swirling jets using experimental and numerical computations, *Heat Transfer Engineering*, 35, 18(2014)701-713.
- [3] M. Braikia, L. Loukarfi, A. Khelil, and H. Naji, Improvement of thermal homogenization using multiple swirling jets, *Thermal Science*, 16, 1(2012).237-248
- [4] A. Khelil, H. Naji, L. Loukarfi, G. Mompean, Prediction of high swirled natural gas diffusion flam using a PDF model, *Fuel*, 15, 2 ,88(2008).374-381
- [5] A. Khelil, S. Nechad, H. Naji, L. Loukarfi, M. Braikia, and M. Beriache, Numerical study of the influence of combustion models and kinetic schemes when predicting the diffusion flames., *Journal of Mechanics*, 28, 4(2012).701-713.
- [6] L. Sang-Joon, and S. Baek, The effect of aspect ratio on the near-field turbulent structure of elliptic jet, *Flow Measurement and Instrumentation*, 5, 3(1994).170-180
- [7] W.R. Quinn, Experimental study of the near field and transition region of a free jet Issuing from a sharp-edged elliptic orifice plate, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 4, 26(2007).583-614B.
- [8] B. Imine, O. Imine, M. Abidat, A. Liqid, Study of non-reactive isothermal turbulent asymmetric jet with variable density, *Computational Mechanics*, 38(2006)151-162
- [9] M.F. Koseoglu, S. Baskayab, The effect of flow field and turbulence on heat transfer characteristics of confined circular and elliptic impinging jets, *International Journal of Thermal Sciences*, 47(2008)1332–1346.
- [10] F. Kuznik, G. Rusaouen, J. Brau, Experimental and numerical study of a full scale ventilated enclosure: Comparison of four two equations closure turbulence models, *Building and Environment*, 42, 3(2007).1043-1053.
- [11] F. Kuznik Brau, G. Rusaouen, A RSM model for the prediction of heat and mass transfer in a ventilated room, *Proceedings: Building Simulation* ,(2007) 919-926
- [12] K. Raj Thundil and V. Ganesan, Study on the effect of various parameters on flow development behind vane swirlers, *International Journal of Thermal Sciences*, 47, 9(2008)1204-1225,
- [13] M. Ahmad vand, A.F. Najafi, and S. Shahidinejad, An experimental study and CFD analysis towards heat transfer and fluid flow characteristics of decaying swirl pipe flow generated by axial vanes, *Meccanica*, 45, 1(2010)111-129.
- [14] A. Escue, and J. Cui, Comparison of turbulence models in simulation swirling pipe flows, *Applied Mathematical Modeling*, 34, 10(2010) 2840-2849
- [15] I. Conte, X. F. Peng and Z. Yang, Numerical Investigation of Heat Transfer Performance of Rectangularly Coiled Pipes, *Heat Transfer Engineering*, 30, 3(2009)207–220.
- [16] Y.A. El Drainy, K.M. Saqr, H.S. Aly, and M.N. MohdJaafar, CFD Analysis of incompressible turbulent swirling flow through zanker plate, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 3, 4(2009)562-572.
- [17] Fluent 6.3, User's Guide, Fluent Inc., Lebanon, NH, 2009.
- [18] N. Fadela, A. Abbes, T. Georgios, and A.J. Bassam, Reynolds Stress Transport Modeling of Film Cooling at the Leading Edge of a Symmetrical Turbine Blade Model, *Heat Transfer Engineering*, 29, 11(2008)950-960.