

ETUDES NUMERIQUES ET EXPERIMENTALES COMPARATIVES DU JET PLAN ANISOTHERME EN REGIME DE CONVECTION MIXTE FAVORABLE

A. Benkhelifa, L. Thomas, J. Robert et F. Penot
Laboratoire d'Études Thermiques (UMR CNRS N°6608)
École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique
BP 40109 – 1, avenue Clément Ader, 86961 Futuroscope Chasseneuil Cedex, Poitiers, France

Résumé - Dans cet article, nous présentons les résultats d'une comparaison entre expérience et simulation numérique pour un jet plan vertical anisotherme dans sa zone de développement. L'écoulement d'air, en régime de convection mixte favorable, se disperse depuis une buse rectangulaire dans un milieu ambiant calme plus chaud.

Deux codes traitant les équations de Navier–Stokes turbulentes en moyenne (RANS), le code CFD Fluent et le code Aquilon, associés à différents modèles de turbulence ont été utilisés. Si un bon accord est constaté entre les deux codes, en revanche, des écarts très nets, de l'ordre de 100 % sur les débits entraînés par exemple, sont observés entre les simulations et l'expérience, démontrant ainsi que les zones de développement des jets en convection mixte échappent encore aux modèles de turbulence existants.

Abstract - In this paper, a comparative study between experiments and numerical simulations in the developing zone of a non isothermal plan vertical jet is presented. The airflow, in aiding mixed convection regime, discharges from a rectangular nozzle in a quiescent medium at a higher temperature.

The "Reynolds-Averaged" Navier-Stokes equations (RANS) are solved with two codes, the CFD code Fluent and the Aquilon code, including different turbulence models. If a good agreement is noticed when we compare the two numerical codes, large discrepancies are observed, in the order of 100 % on the carried flow rate, between simulations and experiments, showing that developing regions of jets in mixed convection regime are not yet correctly described by usual turbulence models.

Mots-clés : Jet plan anisotherme – Convection mixte favorable – Zone de développement – Modèles de turbulence $k-\epsilon$ – Volumes finis - Code CFD – Fluent – Aquilon

1. INTRODUCTION

Les écoulements de type jet sont fréquemment rencontrés dans différentes applications et notamment dans les secteurs industriels tels que le séchage, le refroidissement, la propulsion, la climatisation, l'isolation dynamique... Cependant, on continue souvent à caractériser leurs propriétés empiriquement (transport de masse, de quantité de mouvement, d'énergie thermique...) et on ne comprend pas encore parfaitement les mécanismes responsables de ces propriétés. Des modèles élaborés sont, en conséquence, développés. De plus, une maîtrise de leur comportement dynamique et thermique permettrait une amélioration de leurs caractéristiques et un impact positif sur l'économie.

Théoriquement dans une première approche, un jet peut être défini comme étant le résultat d'une injection de fluide, à débit constant, à travers une surface fixe, dans un milieu fluide d'extension infinie. Selon leur surface d'injection, on peut distinguer au moins deux types de jets : le jet cylindrique qui est caractérisé par la continuité de la pression le long de sa périphérie, et le jet plan, pour lequel il peut exister, éventuellement, une discontinuité de pression de chaque côté. Un jet peut être examiné sous quatre visions différentes : dans son intégralité (on s'intéresse alors à des quantités globales), sous son aspect instationnaire (basé sur des études de stabilité linéaire ou non linéaire), sous son aspect structurel, on étudie alors les caractéristiques des structures cohérentes (résultant des instabilités arrivées à saturation et leurs interactions) et, enfin, comme un système dynamique (qu'on essaye de contrôler). Dans cette étude, seules les caractéristiques globales du jet seront étudiées (modèles de turbulence).

Plusieurs recherches ont été faites sur ces différents aspects, tant du point de vue expérimental que du point de vue numérique. En général, ces travaux ont été axés sur l'étude de la stabilité de l'écoulement. Dans ce sens, en 1959, Sato [1] a examiné le cas d'un jet dont la surface d'injection est négligeable. Il a constaté que le jet est toujours instable au-dessus d'un nombre de Reynolds critique $Re_D \approx 50$, que le mode le plus instable est symétrique et que le nombre de Strouhal associé est voisin de 0,17. Alvinerie [2] a trouvé, à l'aide d'une étude de stabilité linéaire, que plus on refroidit le jet, plus le nombre de Reynolds critique est faible et que le mode le plus instable est symétrique pour un profil d'injection plat, alors qu'il est antisymétrique pour un profil parabolique. De leur côté, Yu et Monkewitz [3] ont montré que les jets froids sont convectivement instables pour un rapport de densité $S = \mathbf{r}_s / \mathbf{r}_{amb} \leq 0,95$. Winant et Browand [4] ont trouvé que les jets n'ont pas de mode instable unique mais une bande de fréquences instables.

A l'aide d'une expérience, Gros [5] a examiné l'influence des conditions initiales (forme du profil d'injection) sur le développement du jet. Il s'est plus particulièrement penché sur les profils plats et triangulaires. Mousset [6], en

1999, a cherché à caractériser les performances d'une maquette de taille réelle d'un meuble frigorifique à l'aide de méthodes de caractérisation globales et rapides. Il a constaté l'apparition de structures cohérentes tridimensionnelles, source de l'explosion turbulente du jet, en fin de cône potentiel. De son côté, L. Thomas [7], en utilisant la vélocimétrie laser à effet Doppler (LDV) et la visualisation par tomographie laser, associée à un procédé de traitement d'images, a pu obtenir, respectivement, les champs de vitesse moyenne permettant la caractérisation globale du jet et son contour instantané. Ce dernier a été analysé à la fois dans des domaines espace – fréquence et espace – temps où les spirales responsables de l'entraînement ont été détectées et suivies. Enfin, des structures cohérentes ont été extraites des champs instantanés de vitesse issus de la vélocimétrie par image de particules (PIV) et des statistiques ont été faites sur les populations obtenues.

Les études expérimentales sont souvent difficiles à réaliser, très longues et onéreuses, en revanche, les modèles numériques, grâce au développement accéléré des moyens de calcul, peuvent commencer à prétendre résoudre convenablement le comportement réel de jets turbulents.

Dans ce cadre, une étude comparative est proposée ici. Des résultats numériques obtenus par Fluent [9], code de calcul déjà largement éprouvé et par Aquilon [8, 10], logiciel multiphysique, développé au Laboratoire MASTER – ENSCPB, Université de Bordeaux I sont confrontés aux résultats expérimentaux de Thomas [7], relatifs à un jet plan non isotherme.

Il est démontré, par voie numérique, que l'approximation bidimensionnelle du jet est satisfaisante. Puis, la comparaison des résultats numériques utilisant deux algorithmes très différents montre qu'il n'y a pas d'erreur dans les calculs. Et enfin il est avéré que les modèles de turbulence usuels ne décrivent pas toujours correctement les phénomènes.

Pour cette démonstration, on considère le jet plan, en phase d'établissement dynamique et thermique, en régime

de convection mixte favorable. Le nombre d'Archimède de buse, Ar , défini par : $Ar = \frac{g\mathbf{b}(T_s - T_{am})D}{V_s^2}$, est pris

égal à 0,05. Ce qui signifie qu'à une distance de l'ordre de quelques diamètres de buse les effets cumulés de convection naturelle sont importants. De plus, il est caractérisé par une vitesse d'injection faible ($V_s \leq 1$ m/s), dans une buse de grande dimension ($D = 0,083$ m) pour conserver une grande valeur au nombre de Reynolds ($Re = 4\ 220$). Le schéma de principe d'expansion du jet est donné sur la figure 1.

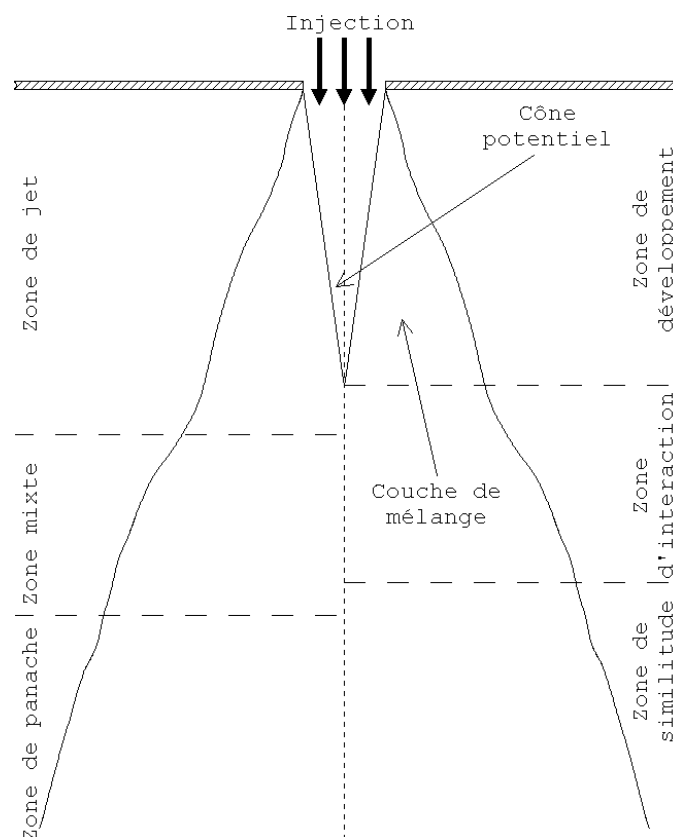


Fig. 1 : Définition des différentes zones d'expansion du jet libre plan.

2. FORMULATION MATHÉMATIQUE, CONDITIONS AUX LIMITES

Le jet plan anisotherme est issu d'une buse rectangulaire dont les dimensions sont faibles vis-à-vis de celles du milieu ambiant. Le fluide considéré est de l'air ($Pr = 0,71$), supposé newtonien et incompressible. Ses propriétés physiques sont constantes, sauf dans le terme de gravité où l'hypothèse de Boussinesq est adoptée, elle se justifie par les faibles écarts de température envisagés.

Moyennant ces hypothèses, les équations turbulentes classiques, données explicitement dans [9], sont résolues avec l'apport de différentes équations de fermeture pour l'énergie cinétique turbulente k et son taux de dissipation ϵ . Trois formes sont proposées par les différents logiciels : $k-\epsilon$ Standard, *Realizable* et RNG.

Le jet présentant une symétrie plane verticale, la résolution du système d'équations a été faite dans un domaine se limitant à une seule moitié du jet, comme montré sur la figure 2. Des conditions de vitesse, de température et de grandeurs turbulentes, identiques à celles mesurées par thermométrie miniaturisée et vélocimétrie dans le montage [7], sont imposées, sous forme de profils, dans la section de soufflage, $x=0$ et $y \leq D/2$ (fig. 3). Le plafond du domaine est, dans la réalité et les simulations, constitué d'une paroi horizontale et adiabatique, la frontière verticale droite est une frontière libre, sans perte de charge particulière, comme dans le cas de l'expérience. Le fluide pénètre latéralement à température ambiante. Le long de la frontière inférieure, une aspiration d'une largeur égale à celle du soufflage existant dans l'expérience, a été simulée par une condition de vitesse appropriée, le reste constitue une sortie libre pour l'air. Sur les faces avant et arrière, constituées de 2 doubles vitrages dans l'expérience, les calculs 3D considèrent l'adhérence du fluide et l'adiabaticité. Les calculs 2D n'ont pas besoin de condition à la limite dans cette direction.

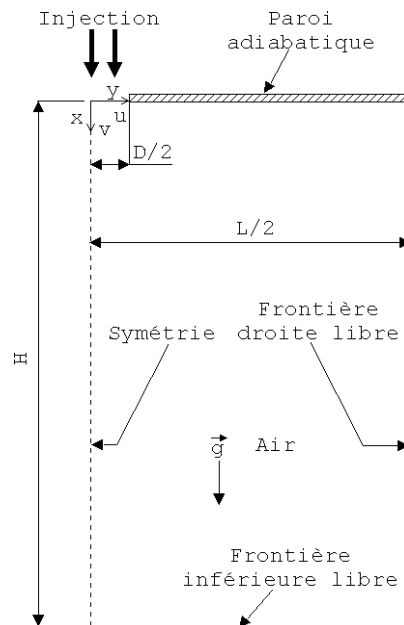


Fig. 2 : Domaine de simulation 2D du jet.

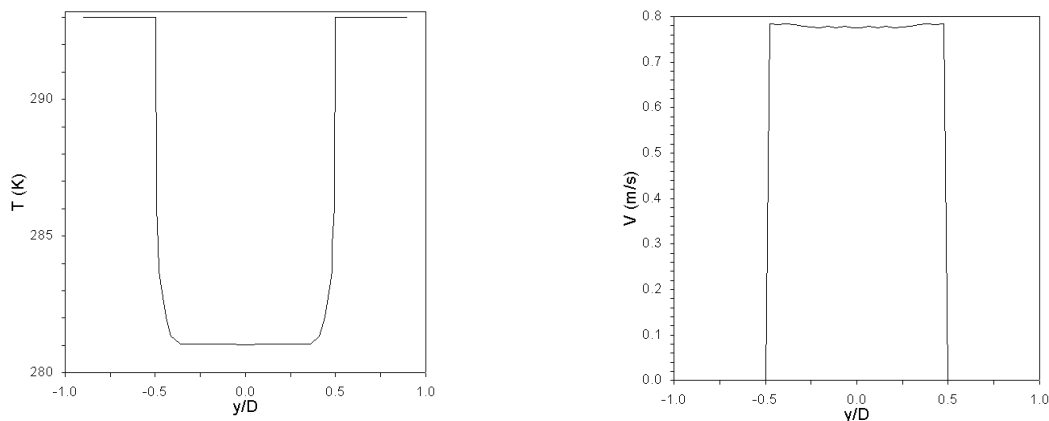


Fig. 3 : Profils de température et de vitesse à la sortie de la buse, tirés de l'expérience [7] et utilisés pour les simulations numériques.

Pour bien préciser les conditions de la comparaison, les caractéristiques du domaine de calcul sont donc les suivantes : largeur de la buse d'injection : $D = 0,083$ m ; demi-largeur du domaine : $L/2 = 0,25$ m ; hauteur du domaine : $H = 0,8$ m, profondeur de la buse et du domaine $P = 0,40$ m.

Les conditions d'injection sont données par les profils indiqués sur la figure 3, ils tiennent compte des 2 minces couches limites qui amorcent leur développement sur les parois du convergent du jet. La vitesse moyenne de l'air, à la sortie de la buse est prise égale à $V_s = 0,78$ m/s, soit un nombre de Reynolds de jet, Re , de l'ordre de 4 220. On considère des valeurs de k et ϵ uniformes et respectivement égales à $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ et $4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^3$. La température moyenne de l'air dans la section de la buse est égale à $T_s = 281$ K, la fluctuation de température dans la buse a été négligée (elle est négligeable dans l'expérience) et enfin, la température de l'air ambiant est choisie telle que $T_{am} = 293$ K.

La description détaillée des expériences sur lesquelles s'appuient ces comparaisons sort du cadre de cet article. Il faut seulement se rappeler qu'un effort important a été fait pour examiner le jet sous son aspect tridimensionnel. Si les instabilités qui apparaissent démontrent clairement l'apparition de phénomènes 3D, l'examen des champs locaux de vitesse et de température donnent des champs moyens et fluctuants parfaitement bidimensionnels jusqu'à des distances en aval du soufflage de l'ordre de 8 fois la largeur de buse (aux effets des couches limites latérales le long des parois de confinement avant et arrière près).

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Effets 3D

Pour la valeur nominale de vitesse à la buse ($Re = 4 220$), un cas de calcul tridimensionnel a été effectué avec le modèle de turbulence dit *Realizable*. Le maillage 3D prend en compte le même nombre de nœuds que le code 2D dans le plan vertical (voir § 3.2) et calcule 50 plans suivant la profondeur z . Comparé à la même simulation effectuée en 2D avec le logiciel Fluent, on ne peut que constater que les résultats tridimensionnels s'avèrent pratiquement identiques dans les 2 cas. Les figures 4 et 5, donnent respectivement différents profils de vitesse et de température moyenne à différentes distances du soufflage. En dehors des 2 couches limites se développant sur les parois de confinement avant et arrière du jet (pour le calcul 3D seulement), les courbes se superposent parfaitement.

Les expansions latérales thermique et dynamique sont identiques, l'entraînement aussi. La seule différence discernable concerne le cône potentiel qui est très légèrement plus grand dans les simulations 3D, induisant d'une part une moindre diminution de la température sur l'axe vertical du jet et une survitesse plus prononcée. A 6 fois le diamètre de buse, ces différences restent toutefois inférieures à 5 %. En conséquence, il n'est pas nécessaire de faire des calculs tridimensionnels pour simuler le comportement de ce type d'écoulement.

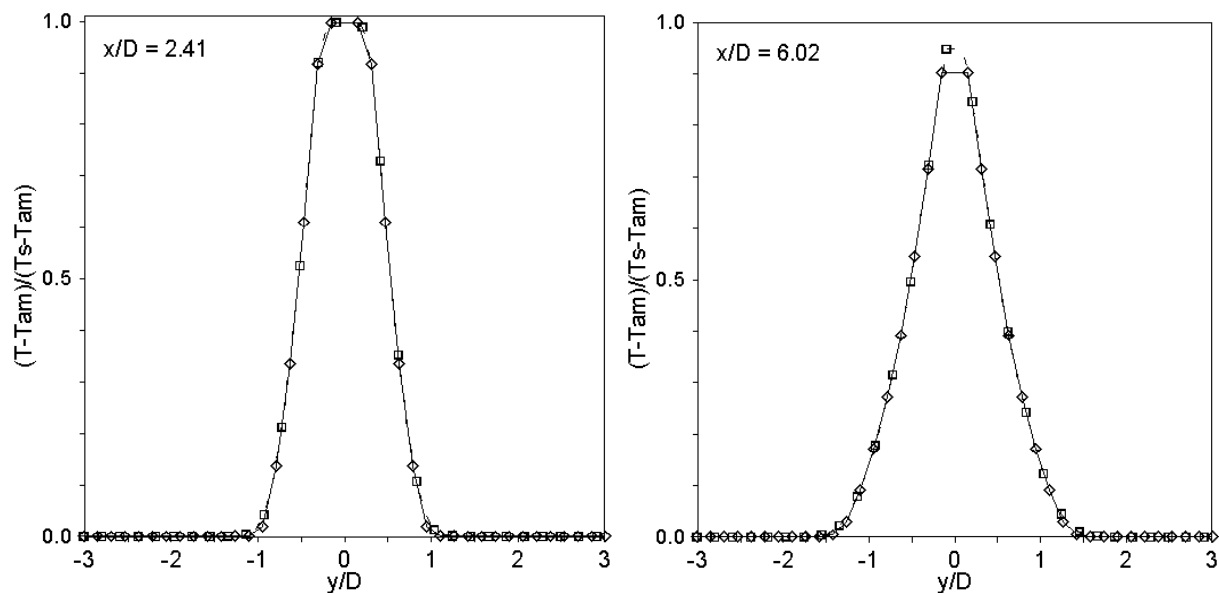


Fig. 4 : Profil horizontal de température : —◇— : Fluent 2D, --□-- : Fluent 3D

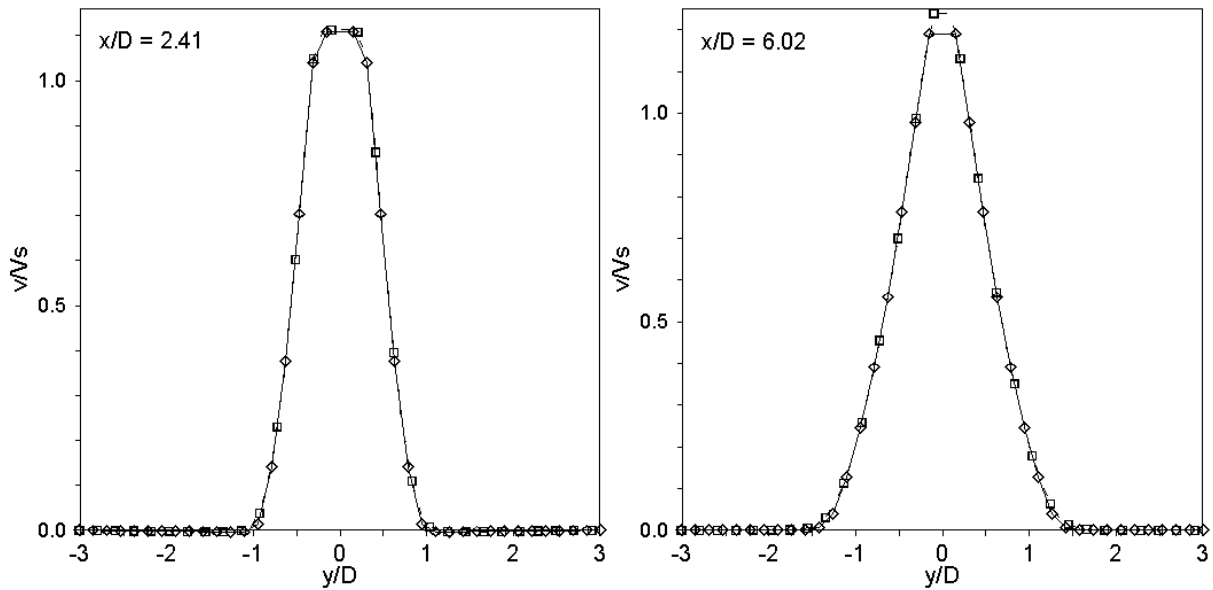


Fig. 5 : Variation de la vitesse verticale : —◇— : Fluent 2D, --□-- : Fluent 3D

3.2. Insensibilité des résultats au maillage

La convergence spatiale des calculs a été testée dans le cas des codes 2D. Dans le but d'avoir des résultats indépendants du maillage, deux grilles de N_f nœuds dans la direction x et $(N_i + N_p)$ dans la direction y , ont été testées, soit : $100 \times (11 + 44)$ nœuds et $100 \times (30 + 50)$ nœuds. Aucun écart significatif n'est observé entre les 2 simulations comme le montrent les profils de température et de vitesse donnés sur les figures 6 et 7. Le maillage de $100 \times (30 + 50)$ nœuds a cependant été conservé pour la suite des calculs.

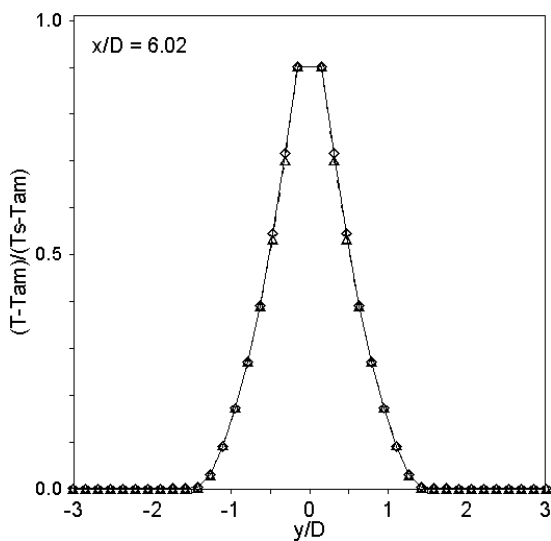


Fig. 6 : Température pour 2 maillages différents :
—◇— : Fluent $100 \times (30 + 50)$ nœuds,
--△-- : Fluent $100 \times (11 + 44)$ nœuds.

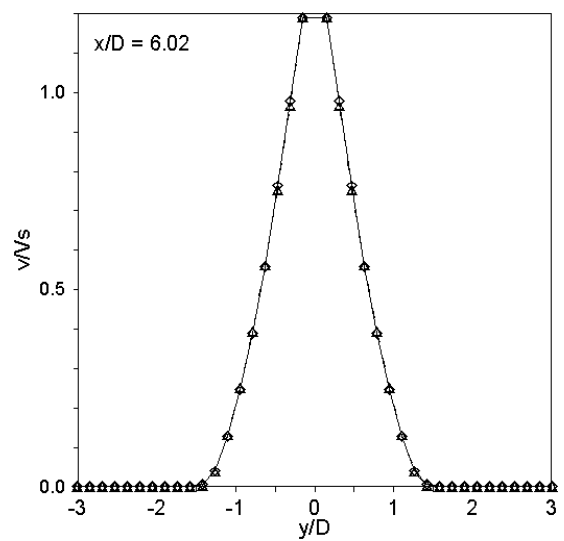


Fig. 7 : Vitesse verticale pour 2 maillages différents :
—◇— : Fluent $100 \times (30 + 50)$ nœuds,
--△-- : Fluent $100 \times (11 + 44)$ nœuds.

3.3. Comparaison entre les différents modèles de turbulence

Pour cette configuration de jet, il pouvait paraître intéressant d'examiner les modifications apportées par différents modèles de turbulence. Les logiciels offrant plusieurs possibilités, celles-ci ont été testées, notamment à l'aide du logiciel Fluent.

L'examen des figures 8 et 9, qui présentent de la même façon que précédemment des profils de vitesse et de température à une distance de 6 fois la largeur de buse du soufflage, montre que la différence dans les solutions est vraiment minime.

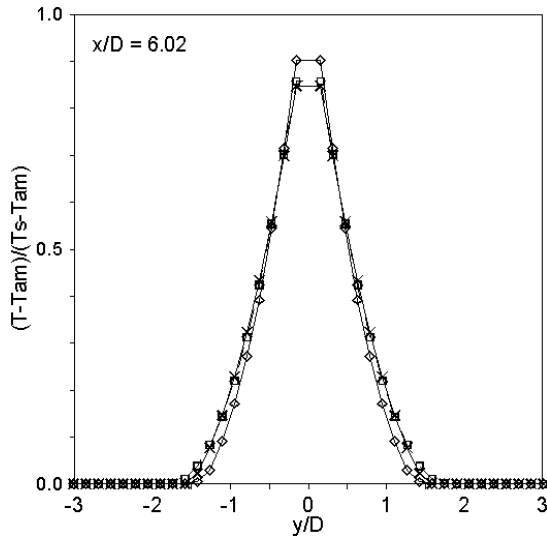


Fig. 8 : Variation de la température pour différents modèles de turbulence :
 -□-: *k-ε* Standard, -◇-: *k-ε* Realizable, -X-: *k-ε* RNG

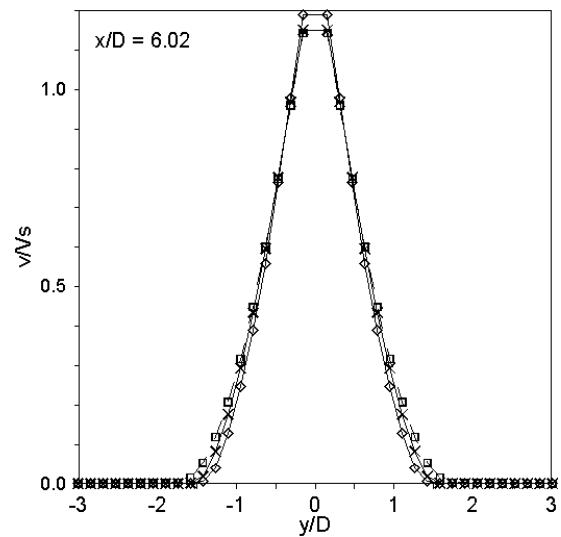


Fig. 9 : Variation de la vitesse verticale pour différents modèles de turbulence :
 -□-: *k-ε* Standard, -◇-: *k-ε* Realizable, -X-: *k-ε* RNG

Le modèle *k-ε Realizable* a tendance à limiter l'expansion latérale du jet, en conservant un cône potentiel plus loin vers l'aval que les 2 autres modèles. Mais encore une fois, les différences restent secondaires ; nul à 2 fois la largeur de buse (non montré sur une figure), l'écart atteint à peine 5 % à 6 fois la largeur de buse.

3.4. Confrontation entre les résultats numériques

Pour s'assurer de la validité des résultats numériques dans le sens où une erreur de programmation ou d'utilisation des codes est toujours possible, la confrontation des résultats donnés par deux logiciels différents semble importante. Celle-ci a été entreprise en introduisant les conditions aux limites décrites précédemment dans le logiciel Aquilon, avec un maillage voisin de celui choisi pour le code Fluent (100 × (25 + 30)). En analysant les figures 10 et 11, une très bonne concordance entre les deux logiciels est observée. Pour les profils de température, l'extension des couches de mélange est sensiblement plus grande pour le code Aquilon. Les zones potentielles restent parfaitement identiques dans les 2 cas.

Si l'on s'intéresse aux vitesses, une différence inférieure à 5 % sur la vitesse maximale est mesurée, le code Fluent semble moins dissipatif, avec aussi une extension un peu moins importante des couches de mélange. Les simulations numériques sont validées entre elles, il n'y a pas eu d'erreur de programmation.

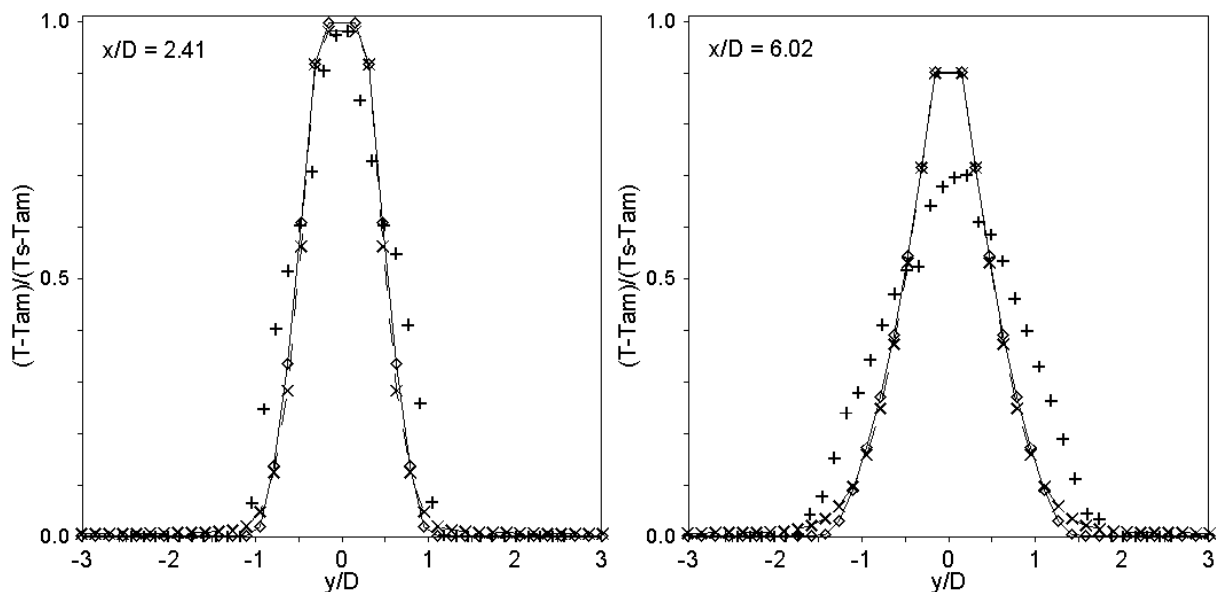


Fig. 10 : Comparaison de la température calculée et mesurée
 -◇-: Fluent 2D, -X-: Aquilon 2D, + : expérimentale

3.5. Confrontation entre les résultats numériques et l'expérience

Il reste à vérifier la validité des codes numériques par une comparaison de même type que celle précédemment effectuée. Les profils de température sont reportés sur la figure 10. Ces profils horizontaux laissent apparaître des écarts d'autant plus importants que l'on s'éloigne de la section de soufflage. A une distance de 2 fois le diamètre de buse du soufflage, l'expansion thermique du jet est déjà sensiblement plus importante dans les expériences que dans les simulations numériques. Paradoxalement, le cône potentiel ne semble pas trop affecté près de l'injection du jet, les zones à température proches de celle du soufflage sont identiques.

C'est plus en aval que les écarts deviennent vraiment importants. La zone froide du jet disparaît beaucoup plus vite dans l'expérience, le mélange dans le cœur du jet s'accélère en fin de cône potentiel faisant chuter la température sur l'axe jusqu'à une valeur de l'ordre de 0,7, alors qu'elle stagne encore à des valeurs proche de 0,9 dans les simulations. Quant à l'extension latérale des jets, conséquence de l'explosion turbulente se produisant dans les couches de mélange, on relève une différence de l'ordre de 30 % plus grande pour l'expérience.

L'examen des profils de vitesse donnés sur la figure 11, confirme ces tendances. Toutefois, on relèvera que les simulations numériques représentent bien l'évolution de l'augmentation de vitesse dans le cône potentiel (due à l'accélération induite par les forces de poussée d'Archimède). L'expansion latérale du jet est encore nettement sous évaluée par les simulations numériques.

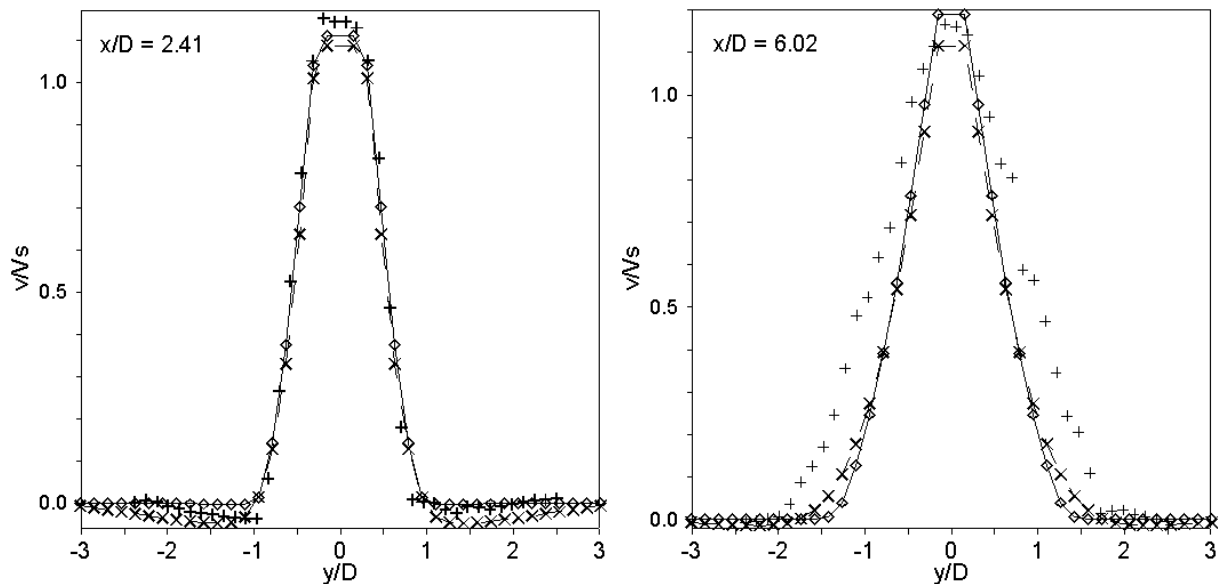


Fig. 11 : Comparaison de la vitesse verticale calculée et mesurée
 —◇—: Fluent 2D, --X-- : Aquilon 2D, + : expérimentale

Enfin, quelques bilans de masse dans le jet sont présentés dans le tableau 1. Le débit entraîné par le jet (massique ou volumique à 3 % près) est, dans l'expérience, deux fois celui calculé numériquement. Il en résulte que le débit dans le jet est expérimentalement très différent de celui qui est calculé par les codes. Ces résultats très divergents ne sauraient s'expliquer par des erreurs de mesure, les résultats expérimentaux ont été obtenus avec des dispositifs très différents (vélocimétrie laser, PIV et thermocouples pour les températures) dans leur usage et à des périodes différentes.

Les systèmes de déplacement des sondes de mesure ne peuvent conduire à des erreurs de l'ordre du centimètre sur le positionnement et les instruments de mesure donnent des valeurs frontières extrêmes correctes. Enfin, les mesures sont identiques et reproductibles dans tous les plans verticaux du jet.

Tableau 1 : Comparaison des différents débits volumiques adimensionnels

Débit volumique entraîné	Fluent	Aquilon	Expérimental
	0,71	0,68	1,28
Bas ($x/D = 6$)	1,69	1,63	2,37

4. CONCLUSION

Cette étude comparative du jet plan anisotherme en régime de convection mixte favorable a montré que :

- Dans son développement au voisinage de la bouche de soufflage, le jet pouvait être considéré comme un jet plan bidimensionnel, les simulations numériques 2D ou 3D donnant des résultats similaires.
- Les codes numériques utilisés sont spatialement convergés et ne présentent pas d'anomalie de programmation, les deux codes très différents donnant des résultats identiques.
- Pour cette configuration, les modèles de turbulence donnent des résultats sensiblement identiques.
- Des différences importantes entre l'expérience et le calcul sont constatées, ces écarts sont trop grands pour être attribués à des erreurs lors des manipulations (50 % sur le débit du jet à une distance égale à 6 fois le diamètre de buse).

La physique particulière des écoulements que nous voulions décrire : en phase laminaire instationnaire, puis explosion turbulente caractérisée par de grosses structures avec une forte cohérence dans les couches de mélange, le tout localement stabilisé ou profondément déstabilisé par les forces de pesanteur locales, semble échapper encore aux modèles classiques développés pour décrire les phénomènes thermoaérauliques rencontrés dans de nombreuses circonstances. Des progrès substantiels restent donc à accomplir à la fois dans la description des phénomènes apparaissant dans ces écoulements et sur les modèles sensés les simuler.

NOMENCLATURE

<p>a diffusivité thermique de l'air (m^2/s)</p> <p>Ar nombre d'Archimède, $Ar = \frac{g\mathbf{b}(T_s - T_{am})D}{V_s^2}$</p> <p>$D$ largeur de la buse d'injection (m)</p> <p>g accélération de la pesanteur (m/s^2)</p> <p>H hauteur du domaine du jet (m)</p> <p>k énergie cinétique turbulente (m^2/s^2)</p> <p>L largeur du domaine du jet (m)</p> <p>N_i nombre de nœuds au niveau de l'injection</p> <p>N_f nombre de nœuds au niveau de la frontière verticale</p> <p>N_p nombre de nœuds au niveau de la paroi horizontale</p> <p>P profondeur du domaine (m)</p> <p>Pr nombre de Prandtl, $Pr = \frac{\mu}{a}$</p> <p>Re nombre de Reynolds $Re = \frac{V_s D}{\nu}$</p> <p>Re_D nombre de Reynolds critique du jet (≈ 50)</p>	<p>S rapport de densité $S = \mathbf{r}_s / \mathbf{r}_{amb}$</p> <p>$St$ nombre de Strouhal</p> <p>T température (K)</p> <p>v composante verticale de vitesse (m/s)</p> <p>V_s vitesse moyenne à la sortie de la buse d'injection (m/s)</p> <p>x, y variables indépendantes horizontale et verticale (m)</p> <p style="text-align: center;">symboles grecs</p> <p>\mathbf{b} coefficient de dilatation volumique à pression constante (1/K)</p> <p>\mathbf{e} taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (m^2/s^3)</p> <p>\mathbf{n} viscosité cinématique (m^2/s)</p> <p>\mathbf{r} masse volumique (kg/s^3)</p> <p style="text-align: center;">indices</p> <p>am relatif à l'air ambiant</p> <p>s relatif au jet au soufflage</p>
---	---

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] H. Sato, "The stability and transition of two-dimensional jet." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 7, pp. 53-84 (1959).
- [2] E. Alvinerie, "Contribution à l'étude des jets anisothermes plans par analyse de stabilité est simulation numérique directe." Thèse de Doctorat, Université de Poitiers (1996).
- [3] M. H. Yu, and P. A. Monkewitz, "The effect of non uniform density on the absolute instability of two-dimensional jets and wake." *Physics of Fluids A*, 2(7), pp.1175-1181 (1990).
- [4] C. D. Winant and F. K. Browand, "Vortex pairing: The mechanism of turbulent mixing-layer growth at moderate Reynolds number." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 63, pp. 237-255, (1974).
- [5] N. Gros, "Contribution à l'étude expérimentale du jet d'air plan en régime de convection mixte." Thèse de Doctorat, Université de Poitiers (1998).
- [6] S. Mousset, "Contribution à l'étude des jets plans verticaux en convection mixte par le développement de méthodes expérimentales, d'imagerie et de simulation numérique directe; application à la thermoaéraulique des meubles frigorifiques de vente." Thèse de Doctorat, Université de Poitiers (1999).
- [7] L. Thomas, "Contribution à l'étude et au contrôle passif d'un jet d'air plan, immergé, en régime de convection mixte favorable," Thèse de Doctorat, Université de Poitiers (2002).
- [8] J. Robert, "Simulation numérique d'un jet plan anisotherme en régime de convection mixte favorable." Rapport de DEA, Université de Poitiers (2001).
- [9] Fluent Incorporated, "[Fluent 5 User's Guide](#)," Fluent Inc. (July 1998).
- [10] "Logiciel multiphysique Aquilon," Laboratoire Master (Modélisation Avancée des Systèmes Thermiques et Ecoulement Réel), Ecole Nationale Supérieure de Chimie et de Physique de Bordeaux (ENSCPB), Université Bordeaux 1.