

ETUDE D'UN JET PLAN TURBULENT IMPACTANT SUR UNE SURFACE

Cătălin TEODOSIU¹, Gilles RUSAOUËN², Raluca TEODOSIU¹

The purpose of this study is the numerical assessment of plane turbulent jet by means of CFD approach using a revised $k-\varepsilon$ turbulence model. The configuration under study represents a ventilated enclosure. We first present the main features of the considered model (test room and air supply terminal). This is followed by the numerical model and its key components. We focus afterward on the jet analysis, straight numerical – experimental confrontations being taken into account.

L'objectif de cette étude est de représenter numériquement un jet plan turbulent, par l'intermédiaire de la technique CFD, en utilisant une version améliorée du modèle de turbulence $k-\varepsilon$. La configuration prise en compte est une pièce ventilée. Ainsi, nous commençons par une description des principaux éléments du modèle étudié (cellule d'essais et soufflage d'air). Ceci est suivi par la présentation du modèle numérique avec ses principales composantes. Nous focusons ensuite sur des comparaisons directes résultats numériques – données expérimentales concernant les principales caractéristiques des jets.

Mots clés: modèle numérique, CFD, modèle de turbulence, jet plan

1. Introduction

L'étude des jets présente une importance toute particulière pour les phénomènes de transfert de masse et de chaleur au sein des écoulements turbulents du fait de leurs multiples applications industrielles. C'est la raison pour laquelle de nombreux travaux, expérimentaux [1,2] et numériques [3,4], y sont consacrés. Malgré ceci, le domaine des jets confinés à bas nombre de Reynolds initial reste moins exploré. Cependant, ce type de jet est largement rencontré à l'intérieur des locaux climatisés. De plus, le développement d'un tel jet est très complexe, sa diffusion étant étroitement liée à son interaction thermique avec la cavité (échanges convectifs avec les frontières solides). Le comportement d'un jet est aussi influencé considérablement par la géométrie de la pièce dans laquelle il diffuse [5]. Ainsi, selon les dimensions du local, de grands gradients de pression peuvent être créés le long de la paroi, entraînant une séparation prématurée avec la paroi. Or, il est extrêmement difficile de bien quantifier tous ces facteurs d'une manière expérimentale. Par conséquent, cette étude porte sur une analyse numérique d'un jet plan turbulent impactant sur une surface. Le but est de

¹ Maître de conférences, Département des Systèmes Thermiques, Hydrauliques et de la Protection de l'Environnement, Université Technique de Constructions de Bucarest, Romania, e-mail: cteodosiu@yahoo.com / ralucahohota@yahoo.com

² Maître de conférences, Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon (CETHIL UMR5008), Université de Lyon et INSA Lyon, France, e-mail: gilles.rusaouen@insa-lyon.fr

déterminer la capacité du modèle numérique mis au point à correctement prédire le développement du jet et son couplage avec le local où il pénètre.

2. Configuration étudiée

Notre étude numérique est entièrement basée sur les résultats expérimentaux présentés dans le travail [6]. Le support de cette étude est constitué par une cellule d'essais en vraie grandeur ($3,1 \times 3,1 \times 2,5 \text{ m}^3$) gardée thermiquement sur cinq de ses faces, la sixième étant en contact avec un caisson climatique dont la température peut varier. La Fig. 1 donne une vue de cette cellule expérimentale et son système de ventilation par mélange.

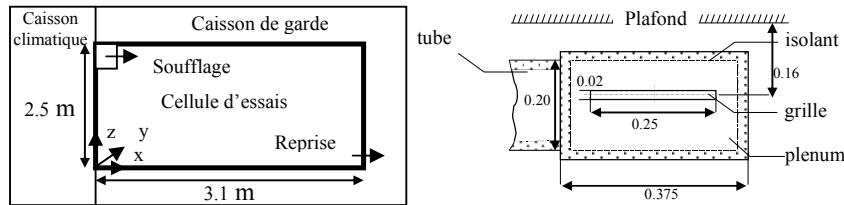


Fig. 1. Vue de la cellule d'essais et du système de ventilation (soufflage) [6]

Pour ce qui est du système de ventilation, la pièce est alimentée en air par l'intermédiaire d'un tuyau circulaire situé dans la partie haute de la pièce. Ensuite, l'air est introduit dans la cellule au travers d'une grille à ailettes avec double déflexion du jet, devant laquelle une plaque percée d'une fente horizontale a été installée. La liaison tube circulaire – grille (fente) est réalisée à l'aide d'un plenum (Fig. 1). Plus de détails en ce qui concerne la cellule d'essais et le soufflage peuvent être consultés dans les études [6,7]. Compte tenu de la configuration du soufflage (bouche rectangulaire dont le rapport de forme est de 12,5), le jet qui en résulte est un jet plan [8]. De plus, étant donné l'emplacement de la diffusion au voisinage du plafond, le jet adhère à cette frontière (effet Coanda) ce que modifie considérablement son évolution. D'ailleurs, l'adhérence d'un jet à la paroi peut être jugée par l'expression donnée par Farquharson et citée par Awbi [9]. Ainsi, dans le cas d'un jet horizontal isotherme, l'auteur trouve une condition en terme de distance critique d'attachement: $D_c = 6 \cdot \sqrt{A_0}$, où A_0 - surface de la bouche de soufflage. Cette distance représente l'espace qui sépare l'axe du jet du plan de la paroi pour laquelle l'attachement n'a plus lieu. Dans notre cas la distance de l'axe du jet au plafond [7] est largement inférieure à la distance critique déterminée à l'aide de l'expression antérieure, ce que signifie que le jet adhérerait au plafond. Ceci est confirmé par Lionnet [10] qui considère les jets dont la distance plafond – bord supérieur du soufflage est inférieure à 0.3 m comme des jets de paroi.

Le Tableau 1 présente les caractéristiques des essais pris en compte.

Tableau 1

Conditions des essais pris en considération [6]

ESSAI	taux de brassage d'air (vol/h)	Température au soufflage (°C)	Nombre de Reynolds initial	Nombre d'Archimède initial
B2	2.02	31.4	13566	0.0032
B4	2.06	9.7	13999	0.0042
B6	2.02	21.3	13628	0.0002

Il faut également préciser que la diffusion de l'air dans la pièce conduit à un écoulement essentiellement turbulent. Ceci est dû aux grandes vitesses au soufflage (environ 4 m/s) et aussi, aux différences de température jet – air de la pièce. En plus, la configuration de la bouche de soufflage (ailettes avec double déflexion du jet) favorise l'apparition d'une intensité accrue de la turbulence à l'origine du jet (approximativement 75-80%) [7]. D'autre part, le jet d'air étudié dans nos configurations impacte sur la paroi opposée. Cet effet de déflexion dû à la paroi est ressenti au niveau du jet à une distance appréciable de la paroi en cause. En conséquence, le jet est dévié ce qui conduit à l'apparition d'un courant de recirculation dans la pièce. Tous ces phénomènes énoncés ci-dessus (jet turbulent, adhérence au plafond et influence de la paroi opposée) seront pris en compte dans les parties qui suivent sur le comportement du jet issu du soufflage.

3. Méthode numérique

Le modèle numérique sur lequel s'appuie notre étude fait appel à l'approche CFD (Computational Fluid Dynamics). En effet, nous avons pu constater ces dernières années un progrès important de l'application des codes CFD afin de résoudre les équations de type convection – diffusion qui décrivent un écoulement turbulent dans un confinement. D'autre part, étant donné que notre but réside dans la mise au point d'une méthode numérique (avec des temps de calculs convenables), bien adaptée aux jets plans confinés qui se développent au sein des pièces ventilées, notre choix s'est porté vers un modèle de turbulence à deux équations qui corresponde le mieux possible à ce type d'écoulements. Il s'agit du modèle $k-\varepsilon$ realizable [11] qui permet une meilleure description d'un jet impactant. Ce modèle s'appuie sur une nouvelle formulation au niveau du coefficient qui intervient dans le calcul de la viscosité turbulente: $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$

densité, k - énergie cinétique turbulente, ε - taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente). Ainsi, le coefficient C_μ n'a plus une valeur constante comme dans le modèle $k-\varepsilon$ standard (normalement 0,09). Sa valeur dépend principalement des grandeurs turbulentes k , ε et des taux de déformation [11]. De plus, au sein du modèle $k-\varepsilon$ realizable, des modifications interviennent aussi dans l'équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε (par exemple,

par rapport au modèle k- ε classique le terme qui exprime la production de ε n'est plus lié à la génération de k). La démarche est intégralement donnée dans [11].

La résolution numérique des équations qui gouvernent l'écoulement (équation de continuité, conservation de la quantité de mouvement, conservation de l'énergie et équations de transport pour les grandeurs turbulentes k et ε) et l'imposition des conditions aux limites sont effectuées à l'aide d'un code CFD commercial (Fluent). Les équations sont ainsi intégrées sur des volumes de contrôle, la solution finale obtenue étant indépendante du maillage [7].

4. Analyse du jet

L'étude d'un jet s'appuie sur des lois de comportement spécifiques, en fonction de la distance par rapport à la sortie du jet. Ainsi, son comportement est partagé en zones spécifiques qui correspondent à des lois particulières d'évolution de la vitesse sur l'axe du jet (Fig. 2).

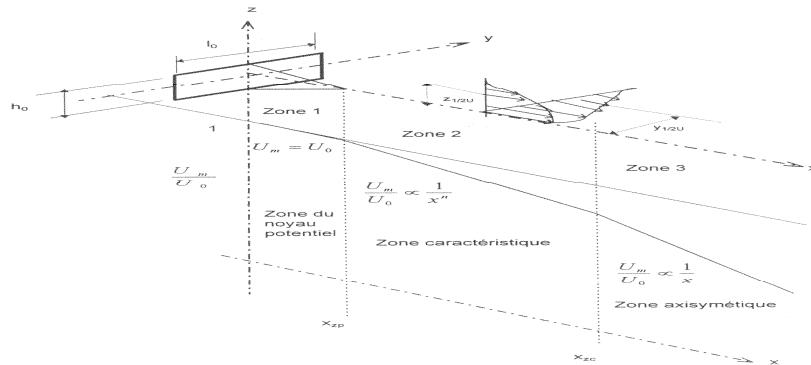


Fig. 2. Evolution d'un jet plan

Une première zone est celle d'établissement de l'écoulement où la vitesse reste égale à la vitesse de la diffusion initiale du jet (zone du noyau potentiel), suivie par une région (zone caractéristique) dans laquelle la vitesse axiale diminue progressivement, la loi de comportement étant comparable à celle d'un jet plan de paroi. Enfin, il existe une troisième région (zone axisymétrique) appelée zone radiale en raison des similitudes avec le comportement d'un jet radial de paroi [12]. Cette zone précède la zone terminale du jet caractérisée par une diffusion très rapide avec des vitesses relativement faibles. Les étendues de ces zones dépendent fortement de la géométrie du soufflage. Il est ainsi montré dans la littérature que le paramètre prépondérant est le rapport de forme du diffuseur [5]. Malgré ceci, les résultats basés sur les données de la littérature sont relativement divergents. A titre d'exemple, nous présentons dans le Tableau 3 l'étendue de la zone bidimensionnelle en utilisant les corrélations de la littérature appliquées pour notre configuration. Ces valeurs peuvent être confrontées aux données issues de

notre étude. Les longueurs sont exprimées par rapport à l'emplacement du soufflage.

*Tableau 3
Frontière zone bidimensionnelle – zone axisymétrique (décroissance de la vitesse axiale)*

Etude	Yevdjevich [8,9]	Sforza et Herbst [12]	Trentacoste et Sforza [13]	actuelle
Etendue zone caractéristique - par rapport au soufflage (m)	négligeable	0,67	1,13	1,07

En raison des similitudes au niveau de comportement entre les jets plans ou axisymétriques, les lois d'évolution de la vitesse axiale pourraient s'exprimer de la manière suivante : $\frac{U_{\max}}{U_0} = K_U \sqrt{\frac{h}{x}}$ (zone caractéristique) et

$$\frac{U_{\max}}{U_0} = K_U \frac{\sqrt{A_o}}{x} \quad (\text{zone axisymétrique}), \text{ où } U_{\max} - \text{vitesse axiale maximale; } U_0 -$$

vitesse initiale; K_U - constante de décroissance de la vitesse; h - hauteur de la bouche de soufflage ; x – coordonnée. Pourtant, si nous réalisons un inventaire succinct des études sur les jets de paroi, nous constatons que les pentes de décroissance proposées pour ces lois sont très différentes. Ainsi, nous citons premièrement l'analyse de Sforza et Herbst [12] qui ont déterminé pour un rapport de forme égal à 10, un exposant de -0,16 pour la zone plane et -1,09 pour la zone radiale, respectivement. D'autre part, les résultats consignés dans [9] montrent que la décroissance de la vitesse axiale dans la région axisymétrique est caractérisée par un seul exposant (-1,15) pour tous les rapports de forme. Par contre, dans la région bidimensionnelle, l'évolution est directement déterminée par le rapport de forme. De ce fait, une expression appropriée afin d'y exprimer le comportement du jet est difficile à déduire. C'est la raison pour laquelle, dans notre étude, la confrontation des données obtenues avec les corrélations analytiques est réalisée exclusivement dans la région radiale du jet.

Dans la zone axisymétrique, nous employons la loi d'évolution avec un exposant de -1,0. Celle-ci est la plus utilisée dans cette région afin de décrire les comportements des jets avec un rapport de forme du diffuseur proche de 12,5 [13-17]. Enfin, afin d'appliquer cette expression, il faut déterminer la valeur adéquate de la constante qui y intervient. Pour réaliser ceci, nous devrons tenir compte des paramètres qui influencent cette constante. En premier lieu, il faut préciser que la valeur de K_U dépend essentiellement du type de diffuseur. En effet, elle est liée en même temps à la géométrie du diffuseur mais aussi aux conditions de soufflage. En ce qui nous concerne, nous adaptons une valeur de 4,7 ce qui correspond à notre configuration au soufflage : grille (surface libre plus grande que 40%) et vitesse à la sortie entre 2,5 et 5 m/s [9]. De plus, à cette valeur, il faut ajouter l'effet induit par la présence d'une frontière solide au voisinage de la diffusion et

de l'axe de développement du jet. Ainsi, l'adhérence au plafond se traduit par deux phénomènes principaux. Premièrement, à cause des contraintes de frottement, la décroissance de la vitesse axiale doit être plus importante. En revanche, grâce à un entraînement beaucoup plus réduit de l'air ambiant par rapport à un jet libre, la décroissance de la vitesse se produit d'une manière moins rapide dans le cas d'un jet de paroi. En effet, les études expérimentales ont montré que le deuxième effet l'emporte sur le premier. Ceci conduit logiquement aux valeurs plus importantes des constantes de vitesse K_U par l'intermédiaire des facteurs de correction. Afin de qualifier le facteur qui doit être pris en compte, nous employons la corrélation de Farquharson reprise dans l'étude [10]. Ainsi, le facteur de correction par rapport à un jet libre est exprimé en fonction de la distance de l'axe du jet à la paroi. Nous obtenons dans notre cas un facteur correcteur de 1,3 ce qui se traduit par une valeur finale de K_U de 6,1. La valeur de l'indice de correction obtenue est très proche de celle recommandée par Li [17] de 1,4 suite aux travaux de Nottage et de Miller. En ce qui concerne l'action des forces de poussée dans le cas des jets diffusés à une température différente de l'ambiente, la littérature propose des corrections sur K_U en prenant en compte un terme de densité. Etant donné la variation négligeable de la masse volumique de l'air dans nos situations, ce terme de correction n'est pas introduit. D'ailleurs, Grimitlyn et Pozin [16] considèrent qu'un jet n'est pas affecté par les forces de poussée si le nombre d'Archimète local ne dépasse pas 0,1. Enfin, il nous reste à étudier l'effet de confinement sur la constante de vitesse. En utilisant les résultats présentés dans [16], en fonction de la section transversale du local traversée par le jet, il en résulte pour nos configurations une valeur négligeable pour le facteur de correction, même pour les sections éloignées de la sortie d'air. La valeur finale ($K_U = 6,1$) prise en compte peut être comparée à l'aide du Tableau 4 où nous regroupons les valeurs trouvées dans la littérature pour la constante de vitesse des jets de paroi. Les écarts montrés par le Tableau 4 ne peuvent s'expliquer que par les conditions expérimentales différentes au cours des essais (type de diffuseur, conditions au soufflage).

Tableau 4

Valeurs de la constante de vitesse (zone caractéristique et axisymétrique)

Etude	Lionnet et Meslem [10]	Sfeir [13]	Kirkpatrick et Kenyon [14]	Nielsen [15]
K_U	13,9	6,1	6,7	2-10

En conclusion, sur la Fig. 3, la décroissance analytique de la vitesse axiale du jet dans la zone axisymétrique est obtenue par l'intermédiaire de l'expression

$$\frac{U_{\max}}{U_0} = 6,1 \frac{\sqrt{A_o}}{x}.$$

Les données présentées dans la Fig. 3 montrent un bon accord

expérimental – numérique concernant l'évolution de la vitesse au sein du jet. Ceci signifie que le modèle numérique mis au point est capable de représenter d'une manière correcte le déploiement du jet dans sa région axisymétrique. Ainsi, les

effets énoncés plus haut sur la vitesse maximale du jet sont saisis dans le calcul numérique. Ceci est également soutenu par une bonne caractérisation du jet dans la zone bidimensionnelle [7]. En revanche, les résultats basés sur l'expression empirique montrent parfois des écarts relativement importants par rapport aux valeurs mesurées ou modélisées. Ceci traduit les difficultés qui apparaissent lorsque nous voulons représenter d'une manière analytique le comportement d'un jet confiné. Il est ainsi difficile de caractériser le développement du jet même sur une distance très réduite par une seule loi d'évolution avec une valeur K_U constante.

Un autre paramètre auquel nous nous intéressons dans le cas d'un jet anisotherme est l'écart de température maximal entre l'axe du jet et l'ambiance. D'une manière similaire à la vitesse, cet écart s'exprime sous une forme

$$\text{adimensionnée: } \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_o} = \frac{T_{\max} - T_a}{T_o - T_a}, \text{ où } T_{\max} - \text{température axiale maximale ; } T_o -$$

température initiale ; T_a - température de l'air ambiant. En ce qui concerne la loi d'évolution de l'écart de température maximale, elle est analogue à celle de la vitesse axiale du jet. En conséquence, la diffusion du jet au niveau thermique est

$$\text{donnée dans la région axisymétrique par : } \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_o} = K_T \frac{\sqrt{A_o}}{x}. \text{ En raison d'une}$$

diffusion thermique du jet plus importante que la diffusion dynamique, la constante de décroissance de la température, K_T comprend des valeurs inférieures à celles de la constante de décroissance concernant la vitesse, K_U . Ainsi, Hassani et al [18] se basent sur les résultats de la littérature et préconisent pour la constante K_T : $K_T = 0.85K_U$. A partir de cette expression, nous obtenons pour nos conditions $K_T = 5,2$. Cette valeur peut être comparée avec celle proposée par Sfeir [13] de 4,3 pour la région axisymétrique d'un jet anisotherme de paroi. L'écart important constaté entre ces deux valeurs montre l'influence des conditions initiales (en termes de nombre de Reynolds et d'Archimède respectivement) sur l'évolution du jet. D'ailleurs les études expérimentales menées sur les jets anisothermes horizontaux ne permettent pas de quantifier le rôle concomitant joué par les nombres de Reynolds et d'Archimède initiaux sur l'évolution ultérieure du jet [13]. Une solution à ce problème peut être constituée par des études numériques où les conditions d'essais peuvent être facilement modifiées afin de couvrir une plage large de variation pour les nombres de Reynolds et d'Archimède au soufflage. La décroissance de l'écart maximal de la température sur l'axe du jet est représentée dans la Fig. 3 où nous retrouvons les résultats issus de mesures, ceux numériques ainsi que ceux basés sur l'équation proposée par Hassani et al [18] avec une constante de décroissance $K_T=5,2$. Nous constatons l'échec d'une description analytique du jet sur toute l'étendue de la région axisymétrique. Ceci confirme les difficultés d'une bonne approximation du

comportement du jet par l'intermédiaire d'une approche analytique générale car K_T est très empirique.

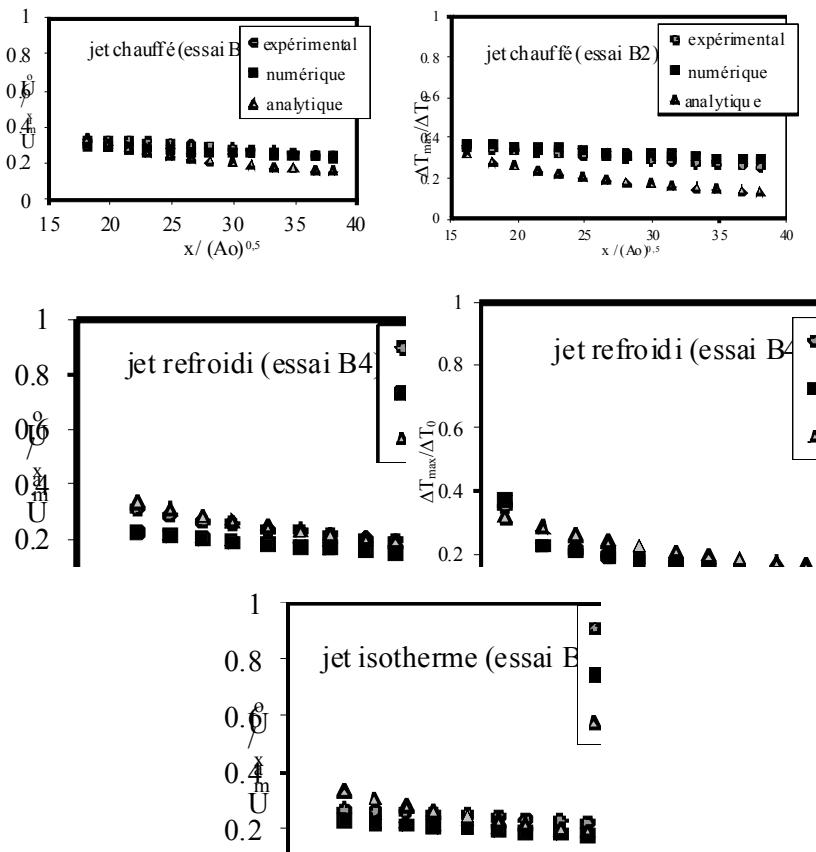


Fig. 3. Décroissance de la vitesse axiale et de l'écart de température (zone axisymétrique)

Par contre, au niveau des confrontations expérimental – numérique, nous apercevons une bonne cohérence des résultats pour les deux essais anisothermes pris en considération. D'ailleurs, ce bon accord au niveau de la diffusion thermique du jet est en étroite liaison avec les bons résultats obtenus sur la diffusion de la quantité de mouvement. Ainsi, il faut noter la bonne description numérique du jet, à la fois en terme de décroissance de vitesse maximale axiale et d'écart de température maximal dans l'axe du jet. Enfin, nous remarquons que le point de séparation entre les deux zones prépondérantes du jet (bidimensionnelle et axisymétrique) a lieu, dans ce cas, plus près de soufflage (0,8 m par rapport à 1 m pour la décroissance de la vitesse). Ceci traduit la diffusion plus rapide au niveau thermique, à la fois dans la région plane et axisymétrique du jet. Un paramètre qui présente aussi une importance particulière concernant l'étude du développement des jets est la largeur dynamique du jet. Ainsi, une bonne

description numérique de cette grandeur est étroitement liée à une prédiction exacte du profil de vitesse dans le jet. Ceci traduit pratiquement une prévision correcte du cisaillement entre le jet et le milieu environnant immobile, avec une prise en compte adéquate du taux d'entraînement du fluide extérieur dans le jet. Les demi-épaisseurs du jet obtenues numériquement sont présentées pour les trois essais considérés dans la Fig. 4. Faute de finesse spatiale dans nos données expérimentales, l'estimation précise de la largeur dynamique du jet n'est pas possible, nous confrontons donc nos résultats numériques aux données empiriques issues d'autres études sur des jets de paroi. Nous constatons ainsi que la croissance sur l'axe mineur (z) est monotone (à l'exception de la zone finale de la région axisymétrique pour le jet chauffé), tandis que celle sur l'axe majeur (y) se développe d'une façon plutôt complexe. Les mêmes évolutions ont été remarquées par Sforza et Herbst [13] pour un rapport de forme de 10, donc très proche de notre configuration. En effet, le comportement du jet étudié semble délimité par les évolutions des jets issus de diffuseurs avec un rapport de forme de 10 et 20 respectivement. Ainsi, selon les résultats expérimentaux de la littérature [8,12,14], il existe une importante décroissance de l'épaisseur $y_{0,5u}$ dans la région caractéristique d'un jet développé d'un orifice dont le rapport de forme est égal à 10. En revanche, lorsque le rapport de forme est doublé, la largeur sur l'axe majeur est quasi-constante. Ceci est accompagné dans les deux cas par une diffusion linéaire du jet sur son axe mineur dans la région caractéristique. Or, suivant les données regroupées dans la Fig. 4, nous retrouvons bien l'évolution linéaire de $z_{0,5u}$, alors que la décroissance de $y_{0,5u}$ est beaucoup réduite dans la région bidimensionnelle. Dans la région axisymétrique, le développement dynamique du jet obtenu numériquement concorde bien avec les résultats de la littérature qui montrent une croissance linéaire de deux épaisseurs avec la distance axiale [8,12,14]. Pourtant, il faut noter le comportement particulier du jet chauffé dont la demi-largeur $z_{0,5u}$ ne respecte pas entièrement une évolution monotone dans la zone terminale de la région radiale (Fig. 4). Cet étranglement du jet peut être expliqué par l'action favorable des forces de poussées et le développement plus précoce au voisinage du plafond du jet chauffé. D'ailleurs, l'impact des forces de poussées peut être aperçu également dans le cas du jet refroidi qui se traduit cette fois-ci par l'élargissement du jet dans la région axisymétrique (Fig.4).

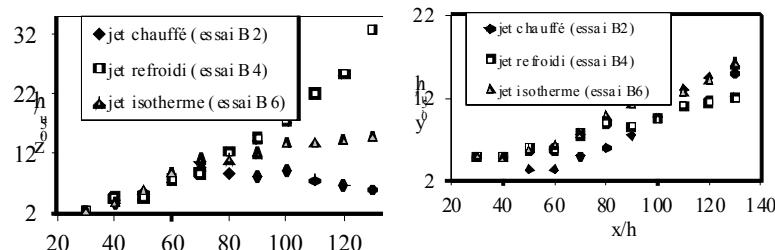


Fig. 4. Largeur dynamique du jet selon l'axe mineur (z) et l'axe majeur (y) du soufflage

A titre d'exemple, nous présentons aussi la loi d'évolution de $z_{0,5}$ obtenue à partir de résultats de la Fig. 4 pour le jet isotherme : $z_{0,5U} = 0.1268 \cdot x + 0.0036$. Par rapport aux résultats de Sfeir [13], qui déterminent pour les jets isothermes une évolution de l'épaisseur caractéristique $z_{0,5U}$ toujours proportionnelle à la distance axiale (Fig. 5), nous apercevons une diffusion légèrement supérieure dans le cas du jet modélisé.

Ce fait peut être la conséquence d'un modèle de turbulence trop diffusif, mais il faut également tenir compte des caractéristiques initiales de diffusion du jet (profil de vitesse, intensité de turbulence et nombre de Reynolds au soufflage) qui pèsent sur l'évolution ultérieure du jet. D'ailleurs, les études expérimentales ont montré une dépendance de l'évolution avec le type de diffuseur utilisé [9,13] (voir par exemple la Fig. 5 où la constante de la loi d'évolution varie de 0,104 à 0,115). En conséquence, une étude numérique plus approfondie des conditions initiales de diffusion est absolument nécessaire afin d'éclaircir cet aspect.

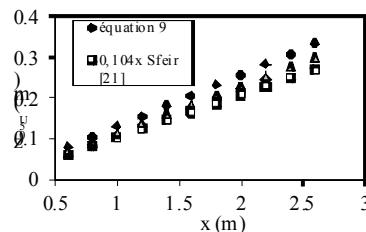


Fig. 5. Evolution de la largeur dynamique du jet isotherme selon l'axe mineur.
Comparaison avec les données de la littérature

Une dernière analyse du jet porte sur la distance de séparation du plafond dans le cas d'un jet à forces de poussée défavorables. En effet, un jet diffusé au voisinage d'une paroi adhère à celle-ci. Ce phénomène se produit à cause des forces de frottement qui induisent une zone de dépression qui conduit à son tour à une courbure des lignes de courant et ceci se manifeste par la déviation du jet vers la paroi (effet Coanda). D'autre part, dans le cas de la diffusion d'un jet froid dans la proximité du plafond, ceci se sépare de la frontière sous l'influence des forces de poussée. Cette distance de séparation (entre l'injection dans le local et le point où le jet se détache) présente un intérêt pratique particulier pour les installations de conditionnement de l'air. Ainsi, il faut la maîtriser afin d'éviter un éventuel inconfort dans la zone d'occupation produite par une chute prématurée du jet. Dans ce cas, le jet serait caractérisé en même temps par une vitesse et une température très éloignées vis-à-vis des valeurs demandées afin d'assurer le confort thermique. Les études menées sur ce sujet ont permis d'établir des lois empiriques afin de prédire la distance de séparation X_s . La forme générale de cette loi est donnée par : $X_s = aAr^{-b}$ (Ar - nombre d'Archimède). Par contre, en ce qui concerne les coefficients a et b de cette expression, les valeurs proposées varient selon l'étude

[7]. Le Tableau 5 donne les distances de séparation obtenues à l'aide de telles corrélations (jets axisymétriques et tridimensionnels) pour notre configuration. Nous y rajoutons la valeur à laquelle nous parvenons numériquement.

Nous constatons que le résultat acquis est en accord avec les études sur les jets tridimensionnels. D'autre part, nous remarquons que les prédictions des lois sur les jets axisymétriques sont beaucoup moins courtes (Tableau 5).

Tableau 5
Distance de séparation (essai B4). Confrontation aux études de la littérature

Etude	Anderson [10] jet axisymétrique	Nielsen [15] jet tridimensionnel	Grimitlyn [16] jet axisymétrique	Marchal [19] jet tridimensionnel	actuelle (numérique)
X _S (m)	1,42	1,58	1,35	1,60	1,72

Ceci remet en question l'extension de ces lois aux jets tridimensionnels malgré les similitudes de comportement constatées entre ces deux types de jets. Nous pouvons même conclure que l'application des lois caractéristiques aux jets axisymétriques n'est pas appropriée, bien que le détachement d'un jet tridimensionnel ait lieu dans la zone caractérisée par une évolution axisymétrique [13]. Il faut préciser aussi qu'il existe sans doute un impact des dimensions de la pièce et de l'emplacement de l'extraction sur la distance de détachement. De telles expressions sont déterminées par Adre et Abricht [10]. Ils trouvent des différences significatives (allant jusqu'à 30%) induites par la position de la reprise (par rapport au diffuseur) sur le point de décollement. Or, ces facteurs peuvent être pris aisément en compte dans le cadre des calculs de type CFD qui sont capables de prédire le point de décollement d'un jet d'une manière précise (voir les résultats regroupés dans le Tableau 5).

5. Conclusion

Les résultats obtenus à l'aide d'une approche CFD basée sur le modèle de turbulence k- ϵ realizable afin d'approcher le développement d'un jet plan impactant sur une surface sont plutôt encourageants. Les confrontations effectuées, soit avec des données expérimentales sur les mêmes configurations, soit avec des résultats de la littérature, montrent la capacité d'un tel modèle numérique à prédire correctement l'évolution des grandeurs moyennes (vitesse et température) dans le jet. En conséquence, les études qui s'intéressent principalement aux champs moyens (par exemple la diffusion des jets au sein des pièces ventilées et l'écoulement qui en résulte) peuvent se baser sur des modèles de turbulence relativement simples dont la précision sur les grandeurs moyennes est satisfaisante. De plus, de telles études peuvent prouver leur utilité car elles sont en mesure de tenir compte aisément de tous les paramètres d'un problème (géométrie du soufflage et position par rapport aux frontières, conditions au soufflage, influence du confinement, etc.). Ainsi, les résultats issus de notre travail montrent que les modèles de type CFD relativement simples sont capables de

compléter les expérimentations qui peuvent s'avérer difficilement à mettre en œuvre afin d'accomplir une étude complète des jets turbulents confinés.

Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'Autorité Nationale (Roumaine) pour la Recherche Scientifique CNDI–UEFISCDI (projet PN-II-ID-JRP-RO-FR-2012-0071).

B I B L I O G R A P H I E

- [1]. Z. Yue, "An experimental investigation of turbulent wall jets", in ASHRAE Transactions, **vol. 108**, 2002, pp. 203-206
- [2]. R.M. Young, M.J. Hargather et G.S. Settles, "Shear stress and particle removal measurements of a round turbulent air jet impinging normally upon a planar wall", in Journal of Aerosol Science, **vol. 62**, Août 2013, pp. 15-25
- [3]. M. Shademan, R Balachandar et R.M. Barron, "CFD analysis of the effect of nozzle stand-off distance on turbulent impinging jets", in Canadian Journal of Civil Engineering, **vol. 40(7)**, Juillet 2013, pp. 603-612
- [4]. R. Banyassady et U. Piomelli, "Turbulent plane wall jets over smooth and rough surfaces", in Journal of Turbulence, **vol. 15(3)**, Mars 2014, pp. 186-207
- [5]. T. Karimipanah, Turbulent jets in confined spaces. Application in mixing ventilation, Experimental and Numerical Studies, Thèse de doctorat, Centre for Built Environment, Royal Institute of Technology, Gävle, Suède, 1996
- [6]. S. Castanet, Contribution à l'étude de la ventilation et de la qualité de l'air intérieur des locaux, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 1998
- [7]. C. Teodosiu, Modélisation des systèmes techniques dans le domaine des équipements des bâtiments à l'aide des codes de type CFD, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2001
- [8]. N. Rajaratnam, Turbulent Jets, Elsevier, Amsterdam, Pays-Bas, 1976.
- [9]. H.B. Awbi, Ventilation of Buildings, E & FN Spon, Londres, Grande-Bretagne, 1991.
- [10]. M. Lionnet et A. Meslem, Bibliographical survey of anisothermal jets in buildings, Rapport no. 95NM00020, Collection de notes internes de la DER – EDF, Chatou, France, 1994.
- [11]. T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang et J. Zhu, "A new k- ϵ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows", in Computers and Fluids, **vol. 24(3)**, Mars 1995, pp. 227-238
- [12]. P. Sforza et G. Herbst, "A Study of Three-Dimensional, Incompressible Turbulent Wall Jets", in AIAA Journal, **vol. 8(2)**, Février 1970, pp. 276-283
- [13]. A. Meslem, Contribution à l'étude du couplage thermique entre un jet et un local climatisé, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 1997
- [14]. A. T. Kirkpatrick et A. E. Kenyon, "Flow Characteristics of Three-Dimensional Wall Jets", in ASHRAE Transactions, **vol. 104**, 1998, pp. 1755-1762
- [15]. P.V. Nielsen "Models for the Prediction of Room Air Distribution", in Proceedings of the 12th Conference Air Movement & Ventilation Control within Buildings, Ottawa, Canada, 1991
- [16]. M. I. Grimitlyn et G. M. Pozin, "Fundamentals of Optimizing Air Distribution in Ventilated Spaces", in ASHRAE Transactions, **vol. 99(1)**, 1993, pp. 1128-1138
- [17]. Z. H. Li, J. S. Zhang et A. M. Zhivov, "Characteristics of Diffuser Air Jets and Airflow in the Occupied Regions of Mechanically Ventilated Rooms – a literature review", in ASHRAE Transactions, **vol. 99(1)**, 1993, pp. 1119-1127
- [18]. V. Hassani, T. Malmstrom et A. T. Kirkpatrick, "Indoor Thermal Environment of Cold Air Distribution Systems", in ASHRAE Transactions, **vol. 99(1)**, 1993, pp. 1359-1365
- [19]. D. Marchal, "L'adhérence des jets d'air froid au plafond des locaux climatisés", in International Journal of Thermal Sciences, **vol. 38(9)**, 1999, pp. 832-842