

Effet de la variation de la température de deux jets inclinés sur leur dispersion au sein d'un écoulement transversal de température constante

Amina RADHOUANE^{1*}, Nejla MAHJOUR SAÏD¹, Hatem MHIRI¹, George LEPALEC², Philippe BOURNOT²

¹Unité de Thermique et Thermodynamique des Procédés Industriels, Ecole Nationale d'ingénieurs de Monastir, Route de Ouardanine, 5000 Monastir - Tunisie.

²IUSTI, UMR 6595, Technopôle Château-Gombert 5 rue Enrico Fermi, 13013 Marseille, Cedex 20, France

* (auteur correspondant: radhouane_amina@yahoo.fr)

Résumé – Cette étude numérique traite de deux jets elliptiques similaires alignés et inclinés de 60° par rapport à un écoulement transversal de moindre température. Les buses d'injection sont espacées de trois diamètres (le petit diamètre) et le centre de la buse amont coïncide avec l'origine du système de coordonnées. L'étude de l'écoulement résultant passera d'abord par la résolution des équations de Navier-Stokes afin de décrire à la fois l'interaction des deux jets ainsi que leur mélange au sein de l'écoulement environnant. La fermeture du système d'équations est assurée par le modèle turbulent de second ordre RSM. Le maillage appliqué au domaine est non uniforme et particulièrement resserré près des buses. L'ensemble des conditions adoptées permet au modèle d'assurer une bonne reproduction des données expérimentales. La généralisation des conditions adoptées, comme l'introduction d'une fumée au sein des jets, permet la caractérisation de la dispersion de la fumée sous différents gradients entre la température des jets et celle de l'écoulement transversal.

Nomenclature:

g	force de gravité	ms^{-2}	x_i	coordonnées dans la direction i	m
d	diamètre de la buse	m	μ	viscosité cinétique	$kgm^{-1}s^{-1}$
α	inclinaison des buses	$^\circ$	f	fraction massique	
D	distance inter-buses	m	R	rapport d'injection	
\tilde{u}_i	vitesse selon la direction i	ms^{-1}			

1. Introduction

La configuration des « jets dans un écoulement transversal » a été considérée maintes fois et ce pour sa large application dans plusieurs domaines qu'ils soient industriels ou académiques. Nous pouvons citer à titre d'exemples l'échappement des fumées à partir des cheminées industrielles ou de paquebot, l'injection de carburant dans les chambres de combustion, les avions V/STOL, etc... La configuration a particulièrement été traitée dans le cas d'émission d'un jet unique et un peu moins pour des jets multiples alors que la configuration à double jet a été quelque peu négligée. La première étude qui traite de cette configuration intermédiaire remonte à 1970 et a été conduite par Ziegler et Wooler [1]. Les deux jets y ont été considérés en tandem puis côte à côte par rapport à la direction de l'écoulement transversal et ont été émis suivant un angle droit. Ces dispositions ont permis de suivre l'interaction des différents écoulements présents, de noter le processus de déflexion des jets, plus marqué sur le jet amont, et de déduire l'influence de chacun des jets sur l'autre ainsi que sur l'écoulement principal. Schwendemann [2] a pour sa part considéré les jets

doubles en variant à la fois leur angle d'émission (droits et inclinés) ainsi que leur arrangement par rapport à l'écoulement environnant (tandem et côté à côté).

Makihata et Miyai [3] se sont exclusivement consacrés aux jets alignés par rapport à la direction de l'écoulement environnant. Les jets ont été initialement inclinés selon 45° et ont été placés selon un rapport de 0,8 entre l'espace inter-buses et le diamètre des jets. Dans cette étude, les auteurs ont abouti à des prédictions théoriques au moyen de la méthode aux différences finies. Les résultats numériques validés par les expérimentations réalisées ont permis de suivre les trajectoires des jets doubles et de les comparer par rapport à celle des jets uniques dans un écoulement transversal.

L'étude de Ibrahim et Gutmark [4] s'est restreinte à l'examen expérimental au moyen de la PIV de l'effet du rapport d'injection sur la dynamique d'un jet unique et d'un jet double émergeant dans un écoulement transverse. Les caractéristiques étudiées incluent la trajectoire et la pénétration des jets, la déflexion de la trajectoire, le transfert de masse qui lui est relatif, l'expansion supérieure et inférieure des jets, ainsi que la taille, l'endroit et l'amplitude de la zone de recirculation produite. Les deux derniers travaux se sont accordés, entre autre, à conclure quant à la similitude des caractéristiques des jets doubles et celles d'un jet unique à fort rapport d'injection.

Le dernier travail en date sur ce type de configurations a été conduit par Kolar *et al.* [5] et a examiné le champ dynamique de l'écoulement résultant en se basant sur des techniques de décomposition cinématique. Cette procédure a permis de mieux caractériser les processus de mélange et de dispersion de deux jets droits disposés selon différents arrangements. Des similarités et des différences ont été relevées entre les structures tourbillonnaires dominantes de l'écoulement moyen, la vorticité et la circulation associées aux trois types d'arrangements considérés (tandem, côté à côté et arrangement oblique) ; une comparaison avec le cas d'un jet unique a également été effectuée.

Nous voyons ainsi que dans la majorité des travaux disponibles, il a plus été question de suivre la progression des différents écoulements en interaction sous des conditions géométriques, dynamiques et massiques fixes. Les paramètres les plus fréquemment évalués sont le rapport d'injection et la distance entre les buses. Cependant peu de travaux ont considéré l'impact du facteur d'inclinaison bien que ce dernier affecte fortement l'efficacité du mélange et de bien d'autres caractéristiques de l'écoulement résultant. Nous allons justement adopter ce facteur dans le présent travail puisque nous nous proposons de considérer deux jets inclinés dans un écoulement transversal. Notre objectif consistera en revanche d'évaluer l'impact de la variation du gradient de température entre les jets et l'écoulement principal sur la dispersion même des jets. Ce paramètre est primordial dans des applications où l'efficacité de refroidissement et/ou de chauffage constitue le premier challenge à réaliser puisqu'elle signifie en fait l'efficacité de l'application elle-même. Cette configuration est rencontrée dans des applications courantes telles que l'échappement des fumées industrielles sous différentes températures au sein de l'atmosphère, l'injection de carburant dans les chambres de combustion, etc... Dans ces applications apparaît inévitablement le côté environnemental puisque dans la première par exemple, l'échappement de fumées à haute température génère la formation de produits secondaires nuisant à l'atmosphère et leur nuisance est d'autant plus dangereuse que la température d'émission est grande. Bien sûr il existe d'autres dangers dans ce type d'applications comme l'atteinte de la température de fusion des matériaux constituant les dispositifs abritant l'interaction en question ce qui conduit à leur destruction.

Nous nous restreindrons dans ce travail à la considération du côté environnemental de la question. Pour ce faire, nous allons introduire une fumée non réactive au sein des jets pour ensuite suivre sa progression au sein du domaine. Ceci est une première approche dont l'objectif est de cerner le processus de mélange des jets sous différents gradients de température. Une fois tous les mécanismes de base détaillés, nous élargirons notre exploration

par la manipulation d'une fumée réelle et donc réactive afin d'évaluer les dangers susceptibles d'être engendrés à l'échelle réelle.

2. Mise en équations

Les deux jets traités dans notre configuration sont émis à partir de buses circulaires de diamètre d , affleurant au niveau de la plaque d'injection résultant ainsi en deux jets elliptiques de petit diamètre d et de grand diamètre $d/\sin\alpha$; α étant l'angle d'inclinaison par rapport à l'écoulement transverse (figure 1) et égal à 60° . Les deux jets sont émis à une vitesse V_0 et contiennent de l'air et un mélange de gaz chimiquement inerte (fumée) à la température T_0 (initialement) ; l'écoulement environnant est de l'air à la température T_∞ constante émis à la vitesse uniforme U_∞ . Les centres des buses sont placés à une distance de $D=3d$ et le rapport des vitesses testé expérimentalement est équivalent à $R=1,29$.

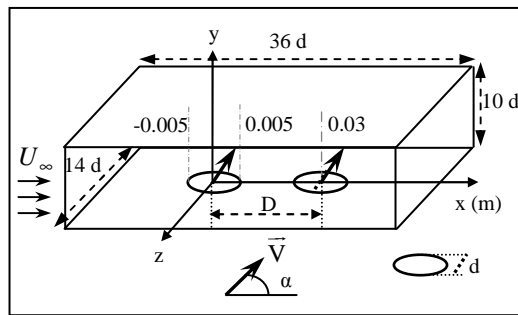


Figure 1: Disposition des jets au sein du domaine de calcul

L'écoulement résultant est supposé tridimensionnel, turbulent et stationnaire en moyenne. Il répond donc aux équations de Navier Stokes qui, discrétisées avec la décomposition de Favre s'écrivent sous la forme suivante :

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_i\tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) + (\bar{\rho}_\infty - \bar{\rho})g\delta_{ij} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{T})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial\tilde{T}}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{f})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{\sigma_f} \right) \frac{\partial\tilde{f}}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

L'introduction des grandeurs fluctuantes rend ce système ouvert. Nous avons adopté pour sa fermeture le modèle turbulent de second ordre RSM. Son introduction mène à la résolution de l'équation suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \underbrace{(\bar{\rho}\tilde{u}_k \overline{u_i u_j})}_{C_{ij}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u_i u_j})}_{D_{ij}^L} - \underbrace{\bar{\rho} \left[\overline{u_i u_k} \frac{\partial\tilde{u}_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial\tilde{u}_i}{\partial x_k} \right]}_{P_{ij}} + D_{ij}^T + G_{ij} + \phi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

C_{ij} étant le terme convectif et respectivement D_{ij}^L le terme de diffusion moléculaire, P_{ij} le terme de production dû aux gradients moyens, D_{ij}^T le terme de diffusion turbulente, G_{ij} le

terme de production dû à la flottabilité, ϕ_{ij} le terme de corrélation pression - déformation et ε_{ij} le terme de dissipation.

Les équations de l'énergie cinétique turbulente (k) et celle de son taux de dissipations (ε) associées au modèle de fermeture s'écrivent comme suit :

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2}(P_{ii} + G_{ii}) - \bar{\rho} \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2}(P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii}) \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

Pour compléter le problème, outre les systèmes d'équations cités ci-dessus, il faut tenir compte des conditions aux limites récapitulées dans le tableau suivant (tableau1). Les températures sont comme déjà dit égales lors des expérimentations et ne sont variés qu'une fois le modèle validé

Buses d'injection	$u=v_0 \cos 60^\circ, v=v_0 \sin 60^\circ$ $T_0 = T_\infty = 303,15K$	$k = 10^{-3} v_0^2$ $\varepsilon = k^{3/2} / 0,5d$
Ecoulement transverse	$u=u_\infty, v=0$ $T_\infty = 303,15K$	$k = \varepsilon = 0$
Composition de la fumée	$N_2:76,9\%, CO_2:20,9\%, O_2:1,8\%, SO_2:0,4\%$	

Tableau 1: Conditions aux limites

3. Résolution numérique

La résolution des équations moyennées de Navier Stokes décrites ci-dessus est effectuée au moyen de la méthode aux volumes finis. Un maillage non uniforme est appliqué à la totalité du domaine et est particulièrement resserré près des buses, là où ont lieu les principales interactions entre les jets et entre les jets et l'écoulement principal. Le système d'équations discrétisées est résolu par la méthode itérative de Gauss-Seidel.

4. Résultats et discussion

Une validation du modèle numérique conçu s'impose pour pouvoir discuter les résultats correspondants. Pour ce faire, les résultats calculés ont été confrontés à ceux relevés expérimentalement sur la configuration déjà décrite (fig.1). Rappelons que aussi bien les jets que l'écoulement transversal contiennent initialement de l'air et sont soumis à la même température T_∞ . Le rapport entre les vitesses des jets et celle de l'écoulement environnant est égale à $R = 1,29$ et les dimensions du domaine de calcul ont été adoptées suite à plusieurs essais qui ont prouvé la non influence de ses frontières sur les interactions ayant lieu.

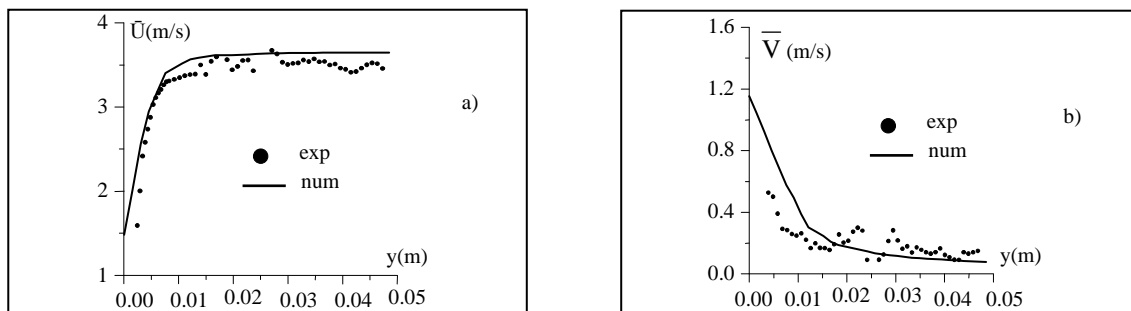


Figure 2 : Validation des calculs numériques par confrontation des composantes de la vitesse

Une concordance satisfaisante est obtenue suite à la confrontation des résultats numériques et expérimentaux relatifs aux composantes longitudinale et verticale de la vitesse (fig. 2). Seul un écart infiniment faible apparaît sur la distribution de la composante verticale et peut être négligé vu l'extrême faiblesse de tout l'intervalle de variation de cette composante par rapport à celui de la composante U.

Maintenant que nous avons validé notre modèle numérique, nous allons généraliser nos conditions en adoptant un rapport d'injection de $R=2$ par une meilleure visualisation de l'expansion des jets avant leur déflexion, en introduisant une fumée non réactive au sein des buses ce qui est le cas dans les échappement des fumée industrielles et enfin en imposant un gradient de température variable entre les jets et l'écoulement environnant puisque généralement les écoulement en interaction sont presque toujours de différentes températures et nous comptons évaluer l'influence de ce dernier paramètre sur la dispersion même de la fumée contenue au sein des jets.

La figure 3 représente l'évolution verticale de la fraction massique d'un des polluants contenus dans la fumée. Notre choix du polluant s'est porté sur le dioxyde de carbone (CO_2) étant donnée la non réactivité de la fumée considérée. La distribution est estimée au niveau de quatre zones principales du domaine ; à savoir au sein des deux buses, entre les colonnes de jets et enfin loin en aval. Au niveau de la buse amont tous les profils, quelque soit le gradient de température imposé, partent de la même valeur initiale égale à 21%. La différence apparaît à mesure que nous fuyons la plaque d'injection puisqu'une pente de décroissance plus raide se manifeste sous les gradients de température les plus importants ce qui signifie un mélange plus rapide et donc plus significatif. Ce n'est qu'au voisinage de $x=11$ mm que les pentes se stabilisent pour marquer un court palier signalant notre déplacement vers la périphérie de la zone d'interaction. Le niveau de ces pentes devient plus faible sous les gradients les plus élevés puisque la quantité initiale de fumée a été plus rapidement dispersée dans ce cas.

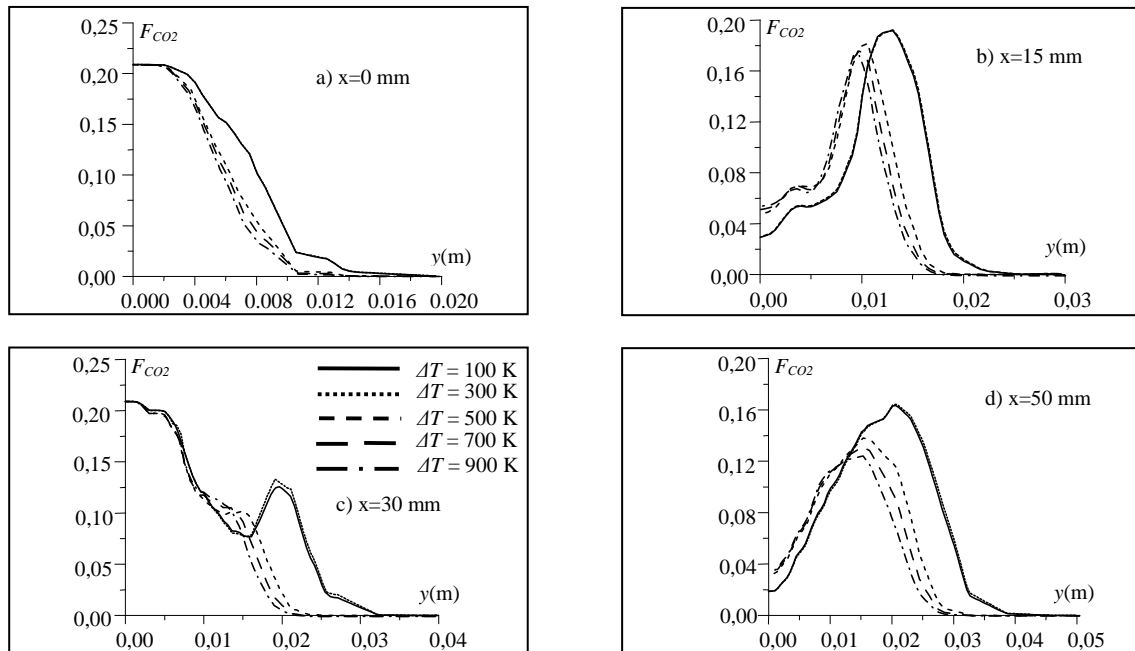


Figure 3 : Variation verticale de la fraction massique du polluant (CO_2) sous différents gradients de température dans les différentes zones du domaine ($x=cste$) et sur le plan $z=0$

Une fois ce palier dépassé, la fraction massique du polluant s'évanouit complètement indiquant l'établissement de l'homogénéisation finale de l'écoulement au voisinage de $y=20$ mm. Au sein de la buse aval se développent deux pics. Le premier est relatif au panache émis à partir de la seconde buse et le second à l'extension du panache du jet amont. La valeur du

second pic est évidemment moins élevée étant donné que le jet amont a déjà parcouru du chemin avant de rejoindre celui qui le suit ; il a donc perdu un peu de son « envergure ». La croissance de la température des jets réduit leur densité et donc leur masse volumique leur permettant ainsi de traverser le domaine plus rapidement au point de ne plus percevoir le pic relatif au polluant du second jet. Ceci résulte en une homogénéisation plus rapide de l'écoulement résultant c'est d'ailleurs ce qui apparaît sur le profil tracé dans cette zone (fig. 3-c) puisque cet état s'établit aux environs de $y=21$ mm sous les gradients les plus importants alors qu'elle est différée à $y=32$ mm pour ceux inférieurs. Entre les buses et loin en leur aval, nous relevons un comportement analogue de la fraction massique du polluant. Il consiste en une croissance à partir d'une valeur initiale faible pour ensuite s'évanouir suivant une pente relativement raide. Quelques différences sont à relever tout de même entre les deux comportements. En effet, la valeur de départ est encore plus faible lorsque nous nous situons en aval des deux buses. Ceci est dû à la supériorité de la distance séparant notre emplacement en aval de la seconde buse de cette dernière (20 mm) par rapport à la distance séparant la position d'inter buses de la buse amont (15 mm). Un autre facteur entre jeu : c'est le fait que le premier jet est nettement plus affecté par l'écoulement transversal que le jet aval alors que ce dernier est « protégé » par la couverture du premier. Ainsi, il se retrouve plus dévié et fortement écrasé ce qui augmente la quantité de fumée qui retombe sur la plaque d'injection et dont nous percevons l'intensité sur la valeur de départ sur les profils tracés. Le rôle de la température des jets est non moindre puisque son augmentation accélère la dispersion de la fumée et plus particulièrement dans la direction longitudinale. La croissance suivante de la quantité de polluant traduit la traversée du panache émanant du jet amont lorsque nous sommes entre les deux colonnes de jets alors qu'elle traduit le passage du panache combiné des deux jets lorsque nous sommes loin en aval. Les pics sont toutefois atteints à différents moments suite à la différence des gradients de température imposés à cause de l'accélération de la dispersion de jets les plus chauds.

5. Conclusion

Ce travail a permis d'étudier le transfert massique de deux jets inclinés de 60° , alignés, contenant une fumée non réactive et soumis à différentes températures au sein d'un écoulement transversal de température constante. Il en a été déduit que l'augmentation de la température des jets accélère leur mélange au sein de l'écoulement environnant mais réduit d'un autre côté l'étendue spatiale de leur dispersion puisque l'homogénéisation de la composition de l'écoulement résultant est d'avantage confinée près la plaque d'injection.

Références

- [1] H. Ziegler, P.T. Wooler, "Multiple Jets Exhausted into a Crossflow", *J. Aircraft*, Vol. 8, No. 6, May 1970, pp. 414-420.
- [2] M.F. Schwendemann, "A Wind Tunnel Investigation of Stratified Jets and Closely Spaced Jets Exhausting into a Cross Flow", Northrop Aircraft Division, Hawthorne, CA, Rept. NOR 73-98, May 1973.
- [3] T. Makihata, and Y. Miyai, "Trajectories of Single and Double Jets Injected Into a Crossflow of Arbitrary Velocity Distribution", *J. Fluids Eng.*, Vol. 10 1, June 1979, pp. 217-223
- [4] I.M. Ibrahim, E.J. Gutmark, "Dynamics of single and twin circular jets in crossflow". *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, 9 - 12 January 2006
- [5] V. Kolar, E. Savory, "Dominant flow features of twin jets and plumes in crossflow", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95, 1199–1215 (2007)