

Etude numérique d'une interaction de deux jets inclinés avec un écoulement transversal

Amina RADHOUANE¹, Nejla MAHJOUB SAÏD¹, Hatem MHIRI¹, George LEPALEC², Philippe BOURNOT²

¹Unité de Thermique et Environnement, Ecole Nationale d'ingénieurs de Monastir, Route de Ouardanine, 5000 Monastir - Tunisie.

²Institut de Mécanique de Marseille, 60 rue Juliot Curie Technopôle de Château-Gombert 13453 Marseille Cedex 13 - France.

* (auteur correspondant: radhouane_amina@yahoo.fr)

Résumé:

Une étude numérique est menée autour d'une configuration fondamentale constituée par deux jets circulaires, inclinés de 60° et débouchant dans un écoulement transversal. Cette étude consiste à simuler l'écoulement à l'aide des équations de Navier-Stokes avec un modèle de fermeture au second ordre. Le maillage est non uniforme et raffiné autour des buses d'éjection. Les résultats obtenus en configuration tridimensionnelle permettent, de déterminer l'effet de la variation de plusieurs paramètres tels que le rapport d'injection sur les caractéristiques de l'écoulement (les contours de la vitesse, les structures tourbillonnaires, la température, la distribution des différents constituants de la fumée, etc...). Il en a été déduit que, plus le rapport d'injection est faible, plus le rattachement de la fumée à la paroi est important.

Nomenclature:

R rapport d'injection S espace entre les deux buses m
D₀ diamètre de la buse m

1. Introduction

La prise de conscience croissante de la pollution de l'environnement et l'effort considérable en vue de la combattre ont fait que l'étude des jets émis dans un écoulement transversal suscite un intérêt pratique majeur. Les configurations les plus courantes varient d'un jet unique, droit ou incliné, à des jets doubles ou multiples émis à travers un écoulement transverse; le but de la multiplication des jets étant toujours un souci de performance. Les jets doubles en particulier trouvent application dans divers domaines tels que les émissions des tours de refroidissement, le déchargement d'eau chaude à travers des conduites dans l'océan, le déversement de polluants dans les rivières, les cheminées émettant de la fumée à haute température dans l'atmosphère, le refroidissement des aubes des turbines à gaz, etc... Selon le type d'application, l'objectif étant d'optimiser le mélange ayant lieu entre les jets ainsi qu'entre les jets et l'écoulement transverse qu'on tend soit à chauffer soit à refroidir.

Zieger and Wooler [1] font partie des pionniers qui se sont proposés de considérer des jets doubles émergeant normalement dans un écoulement transversal au moyen d'un modèle physique. Deux configurations ont été proposées pour l'orientation: côte à côte et en tandem. Pour le dernier cas, le modèle a été développé en supposant que le jet amont abrite complètement le jet aval de l'écoulement transverse. Isaac and Schetz [2] ont également considéré une configuration de jets doubles mais en introduisant le facteur d'inclinaison. En effet, ils ont examiné deux jets en tandem émergeant selon un angle de 60° puis deux autres côte à côte émergeant selon un angle de 90° dans un écoulement transversal. La trajectoire avale des jets en tandem, a prouvé être sensiblement influencée par la présence du jet amont.

V. Kolar et al. [3] ont également traité de l'interaction de deux jets dans un écoulement transverse. Leur configuration expérimentale a consisté en deux jets en tandem et côte à côte avec un espacement de $5D$ entre les centres des buses, l'objectif étant d'examiner la structure tourbillonnaire dominante de l'écoulement résultant, analogue à la paire de tourbillons contrarotatifs relative à un jet unique. La formation et le fléchissement de ce vortex dominant sont étroitement liés au transport de la vorticité turbulente. Chacune des deux configurations a ses propres structures tourbillonnaires qui sont visualis es et interpr et es en termes de flux. L'analyse du transport de la vorticité montre une déclinaison de la force des tourbillons. Ceci a conduit à l'examen et à la discussion des similarités et des différences entre les structures tourbillonnaires associ es aux deux configurations de jets doubles et à celle d'un jet unique: les deux jets dans un écoulement transverse représentent l'interaction de deux jets uniques dans un écoulement environnant. V. Kolar et al. [4] ont r -exploré cette même configuration afin d'examiner la distribution de la vorticité et le transport de la vorticité turbulente associ e à la structure tourbillonnaire dominante du flux résultant. Le champ de la vitesse moyenne et les statistiques turbulentes associ es sont déterminés par anémométrie à fil chaud. Les composantes instationnaires du mouvement du fluide ne sont pas prises en compte et sont consid r es comme étant une contribution induite des valeurs moyenn es sur le temps des quantités correspondantes. Le comportement dans ce cas de figure est semblable à celui de la paire de tourbillons contrarotatifs relative à un jet unique dans un écoulement transversal.

D'autres auteurs ont contribué au sujet par comparaison des jets doubles à d'autres configurations: jet unique ou jets multiples; dont Makihata and Miyai [5] qui se sont proposés de comparer les trajectoires de deux jets à celle d'un jet unique émergeant dans un écoulement transverse. Ces deux configurations ont été test es avec et sans condition de flottabilité et les mesures de la vitesse ont été recueillies dans le champ proche de la sortie de la buse d'éjection à une distance normalis e (coordonn e curviligne/diamètre) de $\xi/D_0=2$   4 le long de la trajectoire. Dans le cas des jets doubles, les buses ont été align es en tandem, selon un angle de 45° et à un rapport S/D_0 (espace entre les buses par diamètre des deux jets)  gal à 0.8. Les contours de la vitesse sont passés de la forme circulaire en $\xi/D_0=2$ à la forme en reins en $\xi/D_0=4$. Isaac et Jakubowski [6] ont repris les deux configurations du jet unique et des jets double (en tandem) avec injection normale dans un tunnel de vent afin d'examiner les propriétés de l'écoulement résultant au moyen de l'anémométrie à fil chaud. Pour le cas des jets doubles, les mesures ont été relev es à une distance de 4 diamètres de la buse pour un rapport d'injection (v_0/u_∞) $R=2$. Il en a été déduit que les jets doubles développent une trajectoire plus prononc e que celle d'un jet unique. Khan [7] a reconsidéré les cas d'un jet unique et celui de jets en tandem et ce dans trois différentes positions en aval afin de représenter les contours de la concentration moyenne ainsi que ceux de l'intensité des fluctuations. Ceux de la concentration moyenne ont montré une structure en forme de reins plus prononc e dans le cas du jet unique. Pour la configuration en tandem, les contours situés sur le bord inférieur des jets se sont étendus plus an aval; quant à la concentration moyenne transverse de cette même région (près de la paroi), elle a accusé une distribution plus prononc e et sur des distances plus importantes. Quant aux contours des intensités fluctuantes, ils ont affiché une structure en reins moins d velopp e pour les deux cas de configurations. Xiao [8] a mené une étude comparative de différentes dispositions des jets: jet unique, jet double et jet triple. Il s'agit de l'étude numérique et expérimentale de ces différentes configurations de jets tous émergeant dans un écoulement transversal confiné et sous des conditions aux limites constantes aussi bien pour les jets que pour la conduite où à lieu l'écoulement. La distance entre les centres des buses a été respectivement 0.68m et 0.20m. L'effet de bloc et la recirculation de l'écoulement principal se sont affaiblis pour un système à distance inter buses plus importante et ont augmenté lorsque le nombre de jets a augmenté. Les mesures de la vitesse des jets le long de la ligne centrale du système jets multiples ont été recueillies: on en a relevé que l'affaiblissement de la vitesse du jet amont a été plus rapide par comparaison au jet aval (dans la configuration en tandem).

Dans notre cas, il s'agit d'une étude numérique de deux jets (de fumée) circulaires chauds inclinés de 60° , disposés en tandem (figure 1) et émergeant dans un écoulement transversal de température inférieure. Lors de ce travail, nous nous proposons de décrire le champ résultant de l'interaction ayant lieu entre les jets et l'écoulement transversal et entre les jets eux-mêmes. Cette description concernera les différentes structures tourbillonnaires de l'écoulement résultant ainsi que les différentes grandeurs dynamiques le caractérisant. Nous aurons également à varier le rapport d'injection et à évaluer son effet sur ces mêmes grandeurs ainsi que sur la température et les composantes de la fumée.

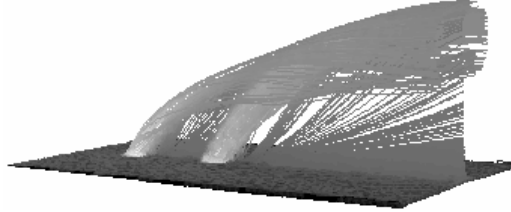


Figure1: Disposition des jets émis dans un écoulement transverse

2. Mise en équations

Considérons deux jets circulaires de diamètre d inclinés de 60° qui émettent à travers une paroi de l'air contenant un mélange de gaz chimiquement inerte (fumée) avec une vitesse d'éjection v_0 et à une température T_0 . Ces jets sont soumis à un écoulement transversal de vitesse u_∞ , la température ambiante étant T_∞ . L'écoulement est considéré tridimensionnel, turbulent et stationnaire en moyenne. L'origine du système de coordonnées est située au centre de la section d'éjection du premier jet (figure 2).

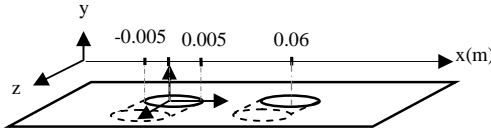


Figure2: Disposition des buses d'injection et du système de coordonnées dans le domaine de calcul

Les équations régissant ce problème, sont obtenues en utilisant la décomposition de Favre et s'écrivent donc 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. Sa fermeture nécessite l'utilisation d'un modèle de turbulence qui permet d'obtenir un nombre d'équations égal au nombre d'inconnues. Pour cette étude, nous avons utilisé un modèle de fermeture au premier ordre. En utilisant ce dernier, les équations de transport pour l'énergie cinétique turbulente (k) et son taux de dissipation (ε), sont les suivantes :

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

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

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 (tableau 1):

Buses d'injection	$u=v_0 \cos 60^\circ, v=v_0 \sin 60^\circ$ $T_0=403.15^\circ\text{K}$	$k=10^{-3}v_0^2$ $\varepsilon=k^{3/2}/0.5d$
Ecoulement transverse	$u=u_\infty, v=0$ $T_\infty=303.15\text{K}$	$k=\varepsilon=0$
Composition de la fumée	$\text{N}_2:76.9\%, \text{CO}_2:20.9\%, \text{O}_2:1.8\%, \text{SO}_2:0.4\%$	

Tableau 1: Conditions aux limites

3. Résolution numérique

La simulation numérique de cet écoulement pose plusieurs problèmes de taille. La topologie de l'écoulement nécessite un maillage très fin dans une grande partie du domaine. Afin de suivre avec précision toute variation des champs massique et aérodynamique, particulièrement dans la région où les gradients sont importants, nous avons adopté un maillage non uniforme, fortement resserré près des buses d'injection. Puis nous avons utilisé la méthode aux volumes finis pour résoudre les équations moyennées. Le système d'équations discrétisées est résolu par la méthode itérative de Gauss-Seidel.

4. Résultats et discussion

Pour valider notre modèle numérique, nous avons comparé les profils théoriques et expérimentaux obtenus avec la technique de mesure PIV [9]: ces comparaisons sont effectuées sur les composantes longitudinale et verticale de la vitesse moyenne (figure 3).

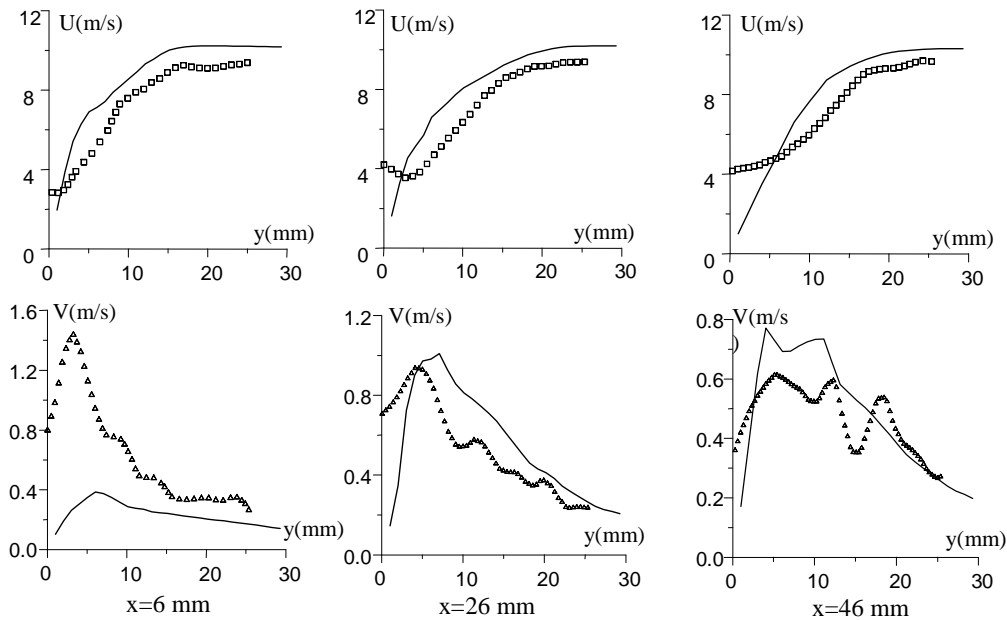


Figure 3: Confrontation numérique expérimentale des composantes de la vitesse pour $R=0.67$ dans le plan $z=0$

Dans la zone de sillage, en aval du premier jet et pour des valeurs de y faibles (pour les $y \leq 5\text{mm}$), les profils numériques et expérimentaux sont relativement différents. Toutefois, il faut remarquer que les mesures ont une grande imprécision dans la zone de fluide mort où les modules de vitesse sont très faibles, alors que cette précision est de l'ordre de 5% dans les régions où l'écoulement est bien établi. Nous remarquons aussi que les profils de vitesse verticale sont quantitativement non concordants au niveau du premier jet. Par contre, du point de vue qualitatif, on note une concordance acceptable.

Une fois le modèle numérique est validé, nous montrons que suite à leur éjection à partir des buses d'injection, les jets interagissent entre eux ainsi qu'avec l'écoulement transverse environnant. Cette interaction engendre le développement de structures tourbillonnaires à travers le champ de l'écoulement résultant. D'abord, des tourbillons en fer à cheval (figure 4-a) entourent les jets dès leur sortie des buses d'injection, ensuite et à mesure que les jets évoluent, une zone de sillage (figure 1) se crée entre le panache résultant et la couche limite se développant le long de la plaque d'injection, cette zone est favorisée par l'inclinaison initiale des jets en plus de la présence de l'écoulement transverse qui engendre leur déflexion et donc leur maintien proche de la paroi. En aval des buses d'injection, une paire de tourbillons contrarotatifs (CVP) (figure 4-b) apparaît, et plus loin dans le sens de l'écoulement, lorsque les deux jets se combinent, le panache analogue à celui d'un jet unique évolue avec des tourbillons en forme de reins (figure 4-c).

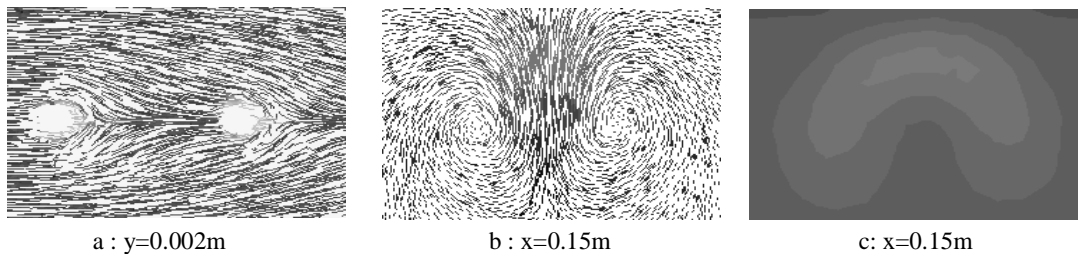


Figure 4: Différents structures tourbillonnaires apparaissant au sein de l'écoulement résultant

Le développement et l'évolution de ces structures tourbillonnaires ainsi que ceux des différentes grandeurs dynamiques caractéristiques du champ de l'écoulement dépendent de plusieurs paramètres dont le rapport d'injection. Les espèces constituant la fumée étant inertes, le comportement des grandeurs thermique et massiques de l'écoulement s'avère identique comme le montre bien la figure 5. C'est ainsi que nous nous restreindrons à l'étude de l'influence de la variation du rapport d'injection sur la distribution thermique au sein du champ d'écoulement résultant.

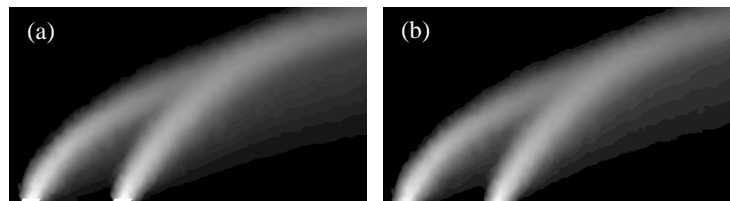


Figure 5: Similitude du comportement dans le plan de symétrie ($z=0$) de la température (a) et de la fraction massique du CO_2 (b)

La figure 6 illustre bien cette influence puisqu'elle représente l'expansion latérale du profil de la température pour des rapports variant de 0.5 à 5 en passant par 2 (figure 6-a). Nous voyons bien que lorsque la vitesse des jets est faible, l'influence des jets au sein de l'écoulement principal l'est également; ainsi ils ne peuvent imposer leur température et sont presque immédiatement refroidis par l'écoulement environnant. Plus le rapport des vitesses croît, plus les jets s'affirment et imposent leurs propriétés au sein de l'écoulement principal; dont leur température; qui en partant du plan central ($z=0$) de l'écoulement a tendance à accuser un pic de chaque côté pour finalement décroître et atteindre l'homogénéisation thermique du domaine considéré. Ce profil montre également l'importante de l'expansion verticale de la température lorsque le rapport d'injection augmente; puisque dans ce cas, la vitesse d'injection est capable de donner d'avantage d'élan pour les panaches respectifs des jets afin d'évoluer plus en profondeur au sein de l'écoulement transverse et ainsi faire parvenir leur chaleur à une zone plus éloignée. Dans son évolution verticale, le profil de la vitesse reste encore et toujours sous "l'emprise" de la variation du rapport d'injection (figure 6-b) puisque nous voyons bien que plus ce dernier augmente, plus le pic de température a lieu plus loin.

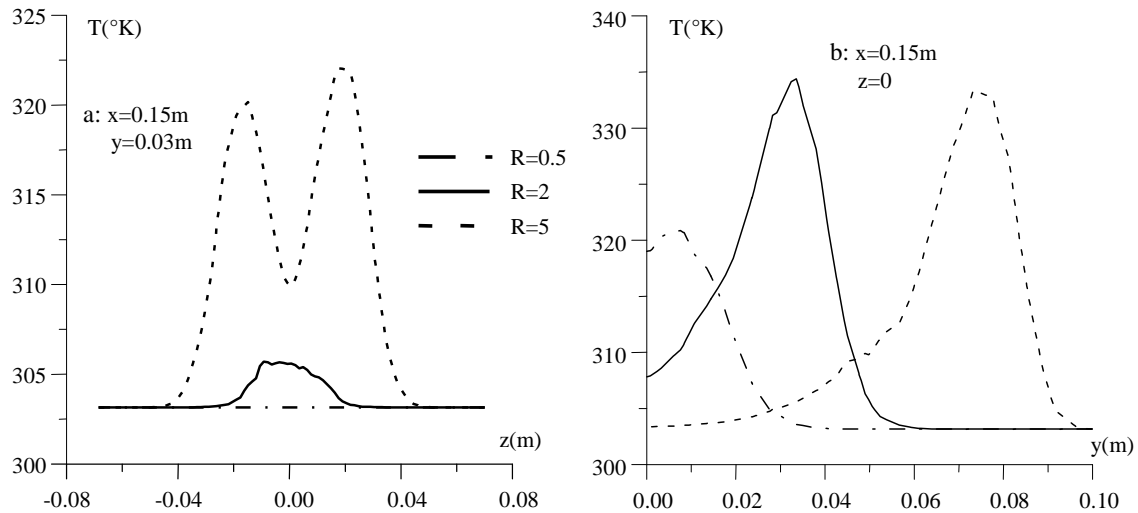


Figure 6: Influence du rapport d'injection sur la distribution de la température

Ceci conforte ce que nous avons déjà dit: plus la vitesse des jets s'affirme, plus leur panache respectif s'éloigne de la paroi de la plaque d'injection et pénètrent plus au sein de l'écoulement environnant. L'affirmation des jets s'exprime également par la croissance de la valeur du pic de température atteint au sein de l'écoulement, ce que nous notons bien sur la figure 6-b; cette croissance s'accompagne d'un autre côté par une décroissance finale plus rapide pour atteindre la température d'homogénéisation du domaine.

5. Conclusion

Lors de ce travail, nous avons mis en évidence les différentes structures tourbillonnaires présentes dans le champ d'interaction de deux jets circulaires inclinés avec un écoulement transverse. Le rapport d'injection est un facteur très influant sur ces structures ainsi que sur les différentes grandeurs dynamiques et thermiques caractéristiques de l'écoulement résultant. Son augmentation favorise une expansion latérale et verticale plus prononcée au niveau du profil de la température. Ce comportement est intimement relié à celui des panaches respectifs des deux jets inclinés mis en jeu.

Références:

- [1] H. Ziegler, and P.T. Woolar, , "Multiple Jets Exhausted into a Crossflow," J. Aircraft, Vol. 8, No. 6, May 1970, pp. 414-420.
- [2] K.M. Isaac, and J.A. Schetz, "Analysis of Multiple Jets in a Crossflow," J. Fluids Engineering, Vol. 104, Dec. 1982, pp. 489-492.
- [3] V. Kolar, H. Takao T. Todoroki, E. Savory, S. Okamoto, N. Toy. "Vorticity transport associated with the dominant vortical structures of twin jets in crossflow" 14th Australasian Fluid Mechanics Conference, Adelaide University, Adelaide, Australia, 10-14 December 2001.
- [4] V. Kolar, H. Takao T. Todoroki, E. Savory, S. Okamoto, N. Toy. "Vorticity transport within twin jets in crossflow" Experimental Thermal and Fluid Science 27 (2003) 563-571.
- [5] T. Makihata, and Y. Miyai, "Trajectories of Single and Double Jets Injected Into a Crossflow of Arbitrary Velocity Distribution," J. Fluids Eng., Vol. 101, June 1979, pp. 217-223.
- [6] K.M. Isaac, A.K. Jakubowski, "Experimental study of the Interaction of Multiple Jets with a Cross Flow." AIAA Journal, Vol. 23, No. 11, Nov. 1985, pp. 1679- 1683.
- [7] Rafiqul Khan. "Mixing between single and tandem jets in a transverse duct flow". Thesis submitted in the Queen's University Kingston, Ontario, Canada December, 1997.
- [8] D. D. Xiao "Experimental and computational investigation of multiple jets in a duct crossflow" Ph.D. thesis, Dept. of Chemical Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada (1992).
- [9] Mahjoub Said N., Mhiri H., Le Palec G., Bournot Ph., Experimental and numerical analysis of pollutant dispersion from a chimney, Atmospheric Environment, 39 (2005) 1727-1738.