

ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DE L'ÉCOULEMENT DERRIÈRE UN BARREAU CARRÉ PLACÉ DANS UN MILIEU CONFINÉ ET GÉNÉRANT DES STRUCTURES TOURBILLONNAIRES COHÉRENTES

M.S. DHOUAIEB^{1*}, F. ALOUI², S. BEN NASRALLAH¹

¹ Laboratoire LESTE, Université de Monastir, Ecole Nationale d'Ingénieur de Monastir, Monastir,
5019, Tunisie

² Laboratoire GEPEA-CNRS-UMR 6144, Université de Nantes, Faculté des Sciences et des
Techniques, Nantes, 44322, France

Email: dhouaieb.sahbi@yahoo.fr

RESUME

Il s'agit d'une étude expérimentale menée dans une conduite horizontale rectangulaire de largeur 300mm, d'hauteur 30mm et de longueur 3000mm, au milieu de la quelle est placé un cylindre rectangulaire d'hauteur 10mm et de largeur 20mm (ou 10*10mm²). L'écoulement en amont de celui-ci est laminaire. Des mesures PIV ont été effectuées en aval afin de caractériser expérimentalement les structures tourbillonnaires et les différents régimes d'écoulement. D'autres mesures PIV complémentaires ont été menées par le dessus du canal en aval du cylindre afin de mettre une éventuelle tridimensionnalisation précoce de l'écoulement.

NOMENCLATURE

L	longueur canal	(m)	St	nombre de Strouhal
H	hauteur canal	(m)	f_s	fréquence de détachement (Hz)
La	largeur canal	(m)	ρ	masse volumique (kg/m ³)
l	largeur obstacle	(m)	μ	viscosité dynamique
h, d, d_c	hauteur obstacle	(m)	γ	paramètre de gap
x, y et z	coordonné cartésienne		β	taux de blocage
U_m, U_{moy}	vitesse moyenne	(m/s)	Γ_2	critères d'identification des structure
Re	nombre de Reynolds			

1. INTRODUCTION

L'étude des sillages autour des obstacles est d'un intérêt très important dans la pratique. En effet la connaissance des structures turbulentes générées derrière ces obstacles et leurs différents régimes est d'une utilité primordiale dans la conception des ouvrages exposés aux écoulements de fluides. Le choix de l'étude d'un cylindre découle de sa géométrie simple permettant d'avoir des facilités expérimentales et numériques. Breuer et al. (2000) et Saha et al. (2003) se sont intéressés à l'étude du sillage généré derrière un barreau carré. D'autres travaux se sont plutôt focalisés sur l'effet des impacts de tourbillons générés par un cylindre sur la couche limite d'une paroi plane (Bearman et al. 1978). A cause de la pratique intéressante de l'écoulement autour d'un cylindre carré, plusieurs travaux se sont intéressés à l'effet du blocage β , Davis et al. (1984) pour $\beta=1/4$ et $\beta=1/6$ et Suzuki et al. (1993) pour $1/20 \leq \beta \leq 1/2$.

Plusieurs études se sont aussi intéressées à un phénomène bien particulier tels que l'effet d'inversion des tourbillons de Von Karman dans le sillage de l'obstacle contrairement à un écoulement dans un milieu infini au il n'y a pas d'inversion, tels que Camarri et Giannetti (2007)

($1/10 \leq \beta \leq 1/6$). D'autre part, une partie des études se sont focalisées sur les différents paramètres régissant l'hydrodynamique du sillage en aval de l'obstacle carré, tels que la traînée et la portance, (Okajima et al. 1997). L'écoulement autour d'un cylindre met en évidence l'apparition des lâchés tourbillonnaires de von Karman à partir d'un $Re_{crit}=54$, cette valeur a été retrouvée par Klekar et Patarkar (1992) pour le cas d'un cylindre carré placé dans un milieu infini, une autre valeur un peu plus élevée a été retrouvée par Okajima (1997) $Re_{crit}=70$ pour le cas d'un cylindre confiné. Les travaux expérimentaux de Luo et al. (2003) sur les obstacles carrés, employant comme méthode de mesure un colorant fluorescent et la visualisation laser, ont permis de déterminer le nombre de Reynolds critique de transition à 160 pour le mode A et à 200 pour le mode B.

Dans le cadre de ce travail, on va s'intéresser aux structures tourbillonnaires qui se développent dans le sillage du cylindre. Une cylindre rectangulaire de dimension $10*20\text{mm}^2$ (ou $10*10\text{mm}^2$) (hauteur*largeur = $h*l$) a été placée symétriquement au milieu d'une section rectangulaire de dimension $La*H = 300*30\text{mm}^2$ d'une conduite horizontale assurant un écoulement laminaire à l'amont. La technique de mesure qui a été utilisée est la vélocimétrie par images de particules (PIV). Mon présent travail est composé essentiellement de deux parties. Dans la première on présentera le dispositif expérimental et technique de mesure. La deuxième partie, résultats et discussions. On étudiera l'effet du largeur du barreau sur les différents régimes d'écoulement et l'effet tridimensionnel de l'écoulement.

2. INSTALLATION ET TECHNIQUE DE MESURE

2.1 Dispositif Expérimental

Le dispositif expérimental est un canal hydraulique constitué principalement d'une veine d'essai démontable en plexiglas transparent. La longueur de la veine est $L=3\text{m}$, sa largeur est $La=0.3\text{m}$ et sa hauteur est $H=0.03\text{m}$. Dans la veine d'essais, le cylindre carré de dimension ($0.02*0.01\text{m}^2$ ou $0.01*0.01\text{m}^2$) a été placé horizontalement à une distance de 1.6m par rapport à l'entrer de celle-ci. Il a été également positionné au milieu de la section rectangulaire du canal à une distance $\Delta=0.01\text{m}$ par rapport à chacun des deux plans inférieur et supérieur. Cela permet d'avoir un taux de confinement $\beta=1/3$ et un paramètre de gap $\gamma=1$. A la sortie du canal, un débitmètre ($0.6\text{ m}^3/\text{h}$) est monté pour mesurer une gamme de Reynolds comprise entre $40 \leq Re = \rho h U_{moy} / \mu \leq 290$, avec U_{moy} est la vitesse moyenne dans une section du canal à l'amont de l'obstacle.

2.2 Technique de Mesure

La technique de mesure qui a été utilisée est la Vélocimétrie par Image de Particules (PIV). Le système PIV utilisé est composé essentiellement d'une caméra CCD de résolution $1008*1018$ pixels, d'un laser de type New Wave Solo et d'un processeur de fabrication DANTEC. L'ensemble est piloté grâce au logiciel « FlowManager ». L'ensemencement du milieu est effectué à l'aide de particules sphériques de polyamides de diamètres $20\mu\text{m}$. Les mesures ont été effectuées dans une gamme de nombre de Reynolds allant de 40 à 290, sur 4 zones de mesures différentes (Fig.1 (b)).

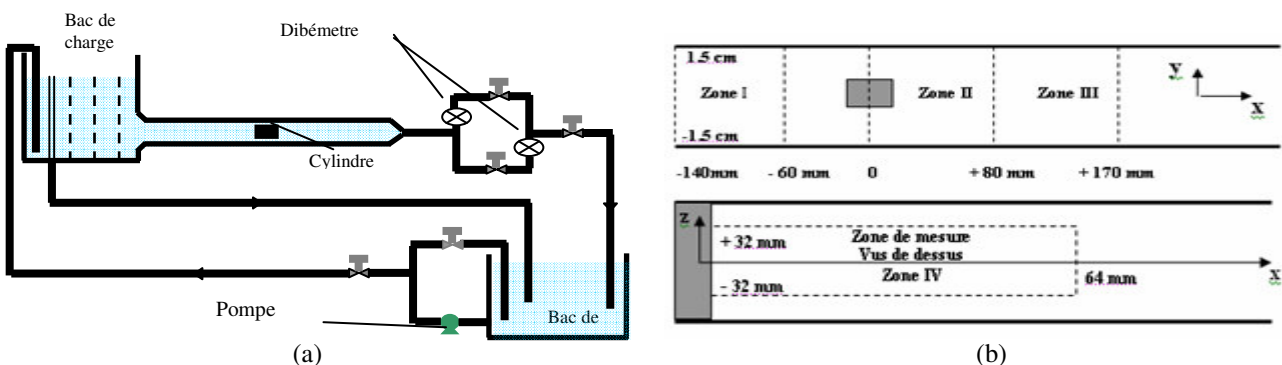


Figure 1. a) Vue tridimensionnelle d'un canal hydraulique en coup. b) Zones de mesures PIV ($z=0$ et $y=cte$).

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de notre étude expérimentale concernant le comportement de l'écoulement, dans un milieu confiné en présence d'un barreau rectangulaire centré. Dans une première partie, nous présenterons les différents régimes d'écoulement en aval du cylindre. La deuxième partie sera consacrée à l'effet tridimensionnel de l'écoulement.

Pour un gap $\gamma=1$ et un confinement $\beta=1/3$ seulement le nombre de Reynolds conditionne l'écoulement $Re = \rho h U_{moy} / \mu$. En faisant varier le nombre de Reynolds, il apparaît alors différents régimes d'écoulement en aval du cylindre comparable à ceux obtenus expérimentalement et numériquement par différents auteurs cités dans la littérature.

3.1 Description de l'écoulement derrière l'obstacle

La description des régimes d'écoulement sera effectuée grâce à la visualisation des lignes de courants à partir des mesures PIV et le critère Γ_2 d'identification de structure, pour la gamme de Reynolds moyenne comprise entre 40 et 290. Cette visualisation nous a permis d'identifier les différents régimes d'écoulement, ainsi que le nombre de Reynolds critique de transition.

3.1.1 Régime de recirculation ($Re < Re_c$)

Le régime de recirculation est obtenu pour un nombre de Reynolds moyenne expérimental inférieur au nombre de Reynolds critique égale à 84 pour le barreau $20*10$ et de 75 pour le barreau $10*10$. Pour cette gamme de nombre de Reynolds, les lignes de courants obtenus à partir de nos mesures par PIV (Fig.2a, b) montrent la présence de deux tourbillons fixes contrarotatifs qui restent symétrique dans le sillage derrière le barreau. Nous constatons que la longueur de la zone de recirculation augmente en fonction du nombre de Reynolds pour $Re < Re_c$. Okajima (1997) a trouvé une valeur expérimentale limite du $Re_c=70$, une autre valeur plus petite du $Re_c=54$ a été trouvée par Klekar et al. (1992) pour un cylindre placé dans un milieu infini.

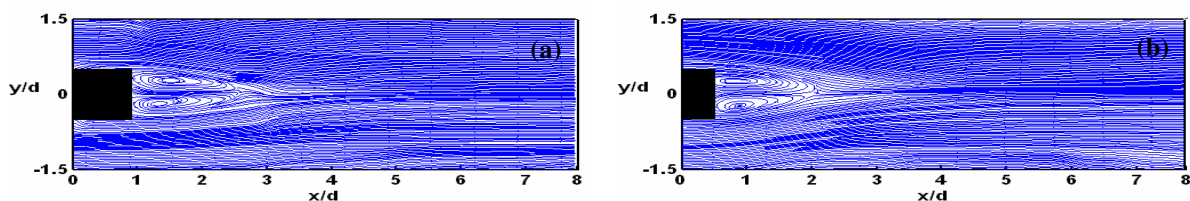


Figure 2. Lignes de courant pour $Re = 50$, a) barreau $20*10$, b) barreau $10*10$

3.1.2 Régime périodique

La transition est obtenue à partir du nombre de Reynolds critique. Le sillage ainsi obtenu, reste toujours constitué de deux tourbillons contrarotatifs, mais qui commencent à se déformer au fur et à mesure que le nombre de Reynolds augmente. Une dissymétrie dans la structure axiale du sillage est observée (Fig.3a).

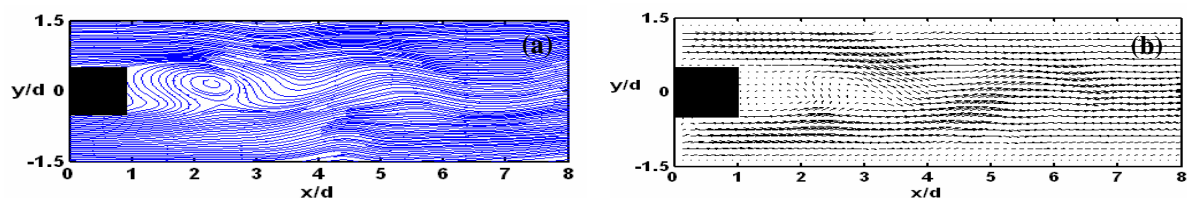


Figure 3. a) Lignes de courant, b) Champ de vitesse instantané; ($Re=100$, barreau $20*10$).

A partir du nombre de Reynolds supérieur au nombre de Reynolds critique, le sillage devient dissymétrique et commence à osciller. Cette dissymétrie est due à l'augmentation de l'amplitude des fluctuations de vitesse dans le sillage. Des instabilités se développent dans la zone de

recirculation et s'amplifient avec l'augmentation du nombre de Reynolds. On assiste alors à l'apparition de paire de tourbillons alternés de signes opposés qui se détache derrière le cylindre. A $Re=100$, on peut bien observer que le champ de vitesse présente une allure oscillatoire (Fig.3b). La représentation des lignes de courant dans la figure 3a ne met pas en évidence la présence des tourbillons de Von Karman, par contre le champ de vorticité fait apparaître deux familles de tourbillons bien distinctes. En augmentant le nombre de Reynolds, les instabilités croissent et conduisent à une augmentation du coefficient d'aspiration. L'oscillation dans le sillage est purement périodique dans ce régime.

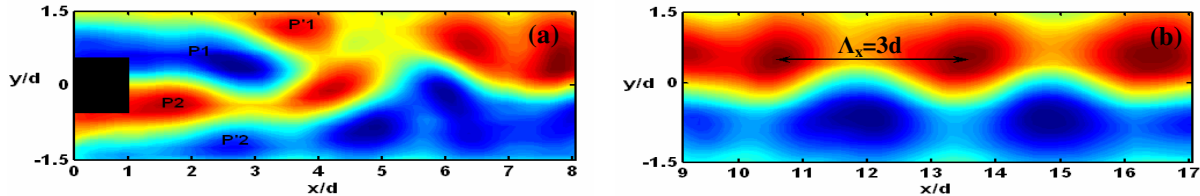


Figure 4. Critère Γ_2 appliqué à un champ de vitesse instantané, $Re=100$, ($20*10$), a) Zone II, b) Zone III.

L'utilisation de la vorticité comme critère d'identification des structures n'est pas adaptée en présence de cisaillement, pour cela on va avoir recourt au critère d'identification de structure Γ_2 . La figure 4.a met en évidence la présence de deux familles de tourbillons. Une première famille (P_1 , P_2) qui se compose essentiellement de deux tourbillons contrarotatifs comparables à ceux de von Karman et qui se détache alternativement derrière le cylindre. Le confinement conduit à une modification importante de la trajectoire de ces tourbillons et à la modification du sillage. En effet, un tourbillon P_1 (resp, P_2) qui se détache du coté supérieur (resp, inférieur) modifie les propriétés de l'espace au voisinage du mur supérieur (resp, inférieur). Ce dernier s'oppose en créant une vorticité de signe opposé, caractérisée par un tourbillon de signe opposé que P_1 (resp, P_2) noté P'_1 (resp, P'_2) qui est éjecté en forçant P_1 (resp, P_2)   travers le canal suivant l'axe des y pour se trouver en contact avec la paroi inférieure (resp, supérieure) du canal. Il s'avère à l'issu de ces études, qu'un tourbillon   plutôt tendance à rouler et non pas glisser sur une paroi. C'est pour cela que lorsque le tourbillon P_1 est éjecté de la paroi supérieure ne subit pas le même sort que quand il se retrouve en contact avec la paroi inférieure. Il est à noter que la répartition des tourbillons est différente du cas non confiné. En effet, après changement de position, le tourbillon P_1 ne se trouve pas directement sur la paroi basse du canal mais il rencontre d'abord un tourbillon P'_2 et on assiste alors à un phénomène de coalescence entre ces tourbillons au voisinage de $x=5d$ pour le barreau $20*10$ et $x=4d$ pour le barreau $10*10$. L'augmentation de la largeur du barreau retarde la fusion des tourbillons qui se détache de la paroi et celui qui se détache derrière le barreau.

Le critère Γ_2 appliqué au champ de vitesse pour $Re=100$ (fig.4.b) montre que dans la zone III de mesure, les tourbillons se réorganisent de façon définitive en deux rangées alternées. Ces derniers sont par la suite advect s en aval tout en roulant sur les deux parois du canal. L'espacement entre deux tourbillons consécutifs de même signe est de l'ordre de $\Lambda_x=3d_c$, il est à noter que le confinement réduit l'expansion des tourbillons dans la direction transversale de l'écoulement. Pour le barreau $20*10$ les tourbillons ont une forme triangulaire dans la zone III de mesure, par contre pour le barreau $10*10$ la forme est plutôt circulaire.

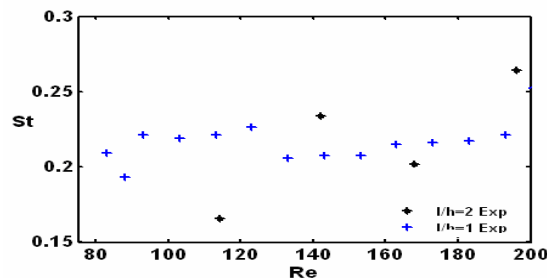


Figure 5. Evolution du nombre de Strouhal en fonction de Reynolds moyen.

Parmi les paramètres caractéristique de ce type d'écoulement, le nombre de Strouhal qu'est une écriture adimensionnelle de la fréquence de détachement des tourbillons, et qu'est défini par $St = f_s h / U_{moy}$, avec f_s est la fréquence de détachement des tourbillons primaires de Von Karman et U_{moy} est la vitesse moyenne de l'écoulement. Si le largueur du cylindre l augmente le nombre de Strouhal augmente aussi (Fig. 5). Pour $l=2$ le nombre de Strouhal suit une monotonie croissante en fonction du nombre de Reynolds. Par contre pour $l=1$, le Strouhal croit en fonction de Reynolds est atteint un max au voisinage de $Re=123$, ensuite il décroît jusqu'à $Re=145$, avant de croître de nouveau et se stabiliser autour d'une valeur constante.

3.2 Effet tridimensionnel de l'écoulement

Les régimes de transition, dans le cas d'un écoulement derrière un obstacle carré ont été ces derniers temps, souvent étudiés numériquement et expérimentalement. Ces études ont permis d'identifier dans le cas d'un régime tridimensionnel deux modes transitoires : le mode A et le mode B. ces régimes de transition sont associés à deux changements discontinus dans la structure du sillage lorsque Reynolds augmente. Selon Luo et al. (2003), les principales différenciations faites entre ces deux modes A et B sont :

- Le mode A apparaît à partir d'un nombre de Reynolds plus faible ($Re_A \approx 160$) en comparaison avec le mode B ($Re_B \approx 200$).
- La variation du nombre de Strouhal « St » en fonction du nombre de Reynolds, dans le cas du mode A est caractérisée par une baisse discontinue, alors que dans le mode B, le nombre de Strouhal St augmente.
- Visuellement, les structures tourbillonnaires du mode A sont caractérisées par la formation des grands et onduleux vortex dans le sens de l'envergure de l'écoulement. Le mode A a une longueur d'onde dans le cas d'un obstacle carré de cinq fois son diamètre hydraulique, alors que le modes B est caractérisé par la plus courtes et fines boucles de vortex dont la longueur d'onde équivalente est de l'ordre de 1.2 fois le diamètre hydraulique (Luo et al. 2003).

Suite à notre étude expérimental derrière le barreau 20×10 et 10×10 , le critère Γ_2 est appliqué à un champ de vitesse PIV prise dans la position IV de mesure au dessus du barreau. A $Re=100$, le détachement des tourbillons est parallèle au barreau (Fig.6a). À partir de $Re=150$, on assiste à l'apparition de basses fréquences dans l'écoulement. Ces effets s'accroissent considérablement avec l'augmentation du nombre de Reynolds. Les tourbillons subissent un phénomène d'étirement qui produit des instabilités tridimensionnelles caractérisées par des longueurs d'ondes dans la direction z de l'ordre de $4d$ (Fig.6b). En augmentant le nombre de Reynolds, ces tourbillons dits mode A commencent à s'allonger pour prendre un état intermédiaire entre le mode A et le mode B de détachement. On remarque que les détachements des tourbillons primaires ne sont plus parallèles, mais en chevrons symétriques par rapport à l'axe x (Fig.6c). Le nombre de Reynolds pour le mode A est aux environs de 155 à 185 pour $l/h=2$ et entre 150 et 180 pour $l/h=1$. Les travaux expérimentaux de Luo et al, (2003) ont permis de déterminer le nombre de Reynolds critique de transition à 160 pour le mode A, par contre pour les travaux numériques de Saha et al. (2003) ont quant eux, placé le nombre de Reynolds pour le mode A aux environs de 150 à 175 pour des configurations un peut différente.

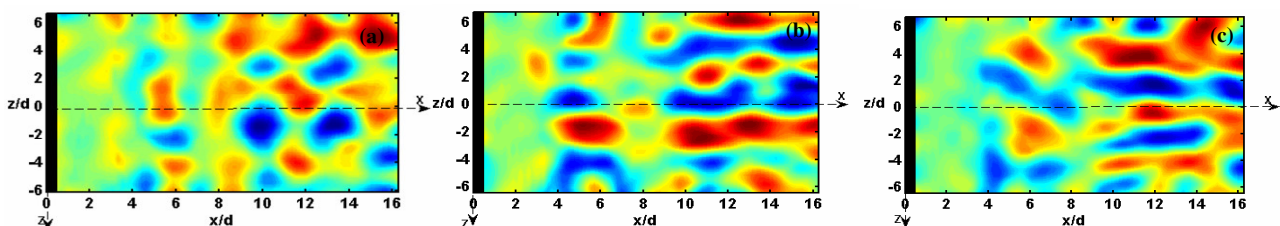


Figure 6. Critère Γ_2 appliqué à un champ de vitesse PIV de la zone IV, barreau 10×10 . a) $Re=100$, b) $Re=150$, c) $Re=180$.

Pour des Reynolds supérieurs à 185, les tourbillons commencent à se détacher d'une façon oblique par rapport au cylindre. C'est la transition vers l'instabilité tridimensionnelle dite Mode B. le Reynolds de transition vers le mode B pour $l/h=2$ peut être compris entre 200 et 216 et entre 190 et 210 pour $l/h=1$. Suivant l'étude de Luo et al. (2003) le Reynolds de transition vers le mode B est au voisinage de 200 et pour Saha et al. (2003) le Reynolds du mode B est supérieurs ou égale à 240.

4. CONCLUSION

Lors des mesures PIV, nous avons obtenues un $Re_c=84$ pour $l/h=2$ et 75 pour $l/h=1$ qui permet l'apparition des tourbillons de von Karman dans le cas d'un écoulement derrière un cylindre dans un milieu confiné. Par comparaison avec la littérature, Okajima (1997) a trouvé une valeur expérimentale limite du $Re_c=70$ et une plus petit valeur de $Re_c=54$ a été trouvé par Klekar et Patarkar (1992) pour un cylindre placé dans un milieu infinie. Pour des $Re \geq 180$ les instabilités tridimensionnelles deviennent très importantes. Les visualisations PIV au dessus du canal et en aval du cylindre montrent bien la présence du « Mode A » dans l'écoulement jusqu'à un nombre spécifique, celui-ci constitue la valeur limite de toute étude bidimensionnelle de l'écoulement. Expérimentalement, le nombre de Re du mode A apparaît aux environs de 155 à 185 pour $l/h=2$ et 150 et 180 pour $l/h=1$. Les travaux expérimentaux de Luo et al, (2003) ont permis de déterminer le nombre de Reynolds critique de transition à 160 pour le mode A, par contre pour les travaux numériques de Saha et al. (2003) ont quant eux, placé le nombre de Reynolds pour le mode A aux environs de 150 à 175. Par contre pour le mode B le Reynolds de transition est comprise entre 200 et 216 pour $l/h=2$ et entre 190 et 210 pour $l/h=1$. Saha et al. (2003) place le nombre de Reynolds critique de transition mode B pour des Reynolds supérieurs ou égal à 240 et pour Luo et al. (2003) le Reynolds de transition est au voisinage de 200. Ces comparaisons nous informe sur l'ordre de la grandeur du Reynolds critique de transition.

REFEENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Breuer, M., Bernsdorf, J., Zeiser, T. and Durst, F. (2000). "Accurate computations of the laminar flow past a square cylinder based on two different methods: lattice-Bolzmann and finite-volume", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 21, pp. 186-196.
2. Saha, A. K., Biswas, G. and Muralidhar, K. (2003). "Three-dimensional study of flow past a square cylinder at low Reynolds numbers", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 24, pp. 54-66.
3. P. W. Bearman, M. Zdravkovich (1978), "Flow around a circular cylinder near a plane boundary". J. Fluid Mech., Vol. 89, p33-44.
4. Davis R. W., More E. F. and Purtell L. P. (1984). "A Numerical and experimental study of confined flow around rectangular cylinders". Phys. Fluids, Vol 27, pp. 46-56.
5. Suzuki H., Inoue Y. Nishimura T., Fukutani F. (1993). "Unsteady flow in a channel obstructed by a square rod (crisscross motion of vortex)". Int. J. for Num. Methods in Fluids, pp 14-29.
6. Camarri, S. and Giannetti, F. (2007). "On the inversion of the von Karman street in the wake of a confined square cylinder", J. Fluid Mech, Vol. 574, pp. 169-178.
7. Okajima, A., Donglai, Y., Atsushi, S. and Tomohito, N. (1997). "Numerical study of blockage effects on aerodynamic characteristics of an oscillating rectangular cylinder", J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 67&68, pp. 91-102.
8. Klebar, K. M. and Patankar, S. V., (1992). "numerical prediction of vortex shedding behind a square cylinder", Int. J. Num. Meth. Fluids, Vol. 14, pp. 327-335.
9. Luo, S. C., Chew, Y. T. and Ng, Y. T. (2003). "Characteristics of square cylinder wake transition flows", Phys. Fluids, Vol. 8, pp. 2549-2559.