

Étude d'une ligne de jets impactant une paroi concave par PIV stéréoscopique

Virginie Gilard*, Laurent-Emmanuel Brizzi

Laboratoire d'études aérodynamiques (UMR 6609), boulevard Marie et Pierre Curie, téléport 2, BP 30179,
86960 Futuroscope Chasseneuil cedex, France

Reçu le 22 octobre 2004 ; accepté après révision le 25 octobre 2005

Disponible sur Internet le 13 décembre 2005

Présenté par René Moreau

Résumé

L'étude aérodynamique d'une ligne de jets axisymétriques impactant une paroi concave est réalisée à partir de mesures de vitesse obtenue par les méthodes de vélocimétrie par imagerie de particules classique et stéréoscopique. Le principe et les parties spécifiques à la mise en œuvre de la PIV stéréoscopique, technique de vélocimétrie tridimensionnelle récemment développée, sont d'abord rappelés. Après un traitement statistique des données, la structure tridimensionnelle et les caractéristiques de jets multiples impactant une paroi concave sont décrits dans plusieurs plans de l'écoulement à l'aide de champs moyens de vitesse et de grandeurs turbulentes. *Pour citer cet article : V. Gilard, L.-E. Brizzi, C. R. Mecanique 334 (2006).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Study of a row of jets impinging a concave wall by stereoscopic PIV. The aerodynamic study of a row of axisymmetric jets impinging a concave wall is carried out from velocity measurements obtained by the standard and stereoscopic Particle Image Velocimetry. The principle and the specific aspects of the stereoscopic PIV set up, a recent technique of three-dimensional velocimetry, are explained. After a statistical data processing, the three-dimensional structure and the characteristics of multiple jets impinging a concave wall are described with the mean velocity fields and the turbulent values in several planes of the flow. *To cite this article: V. Gilard, L.-E. Brizzi, C. R. Mecanique 334 (2006).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Mécanique des fluides ; Jet impactant ; Paroi concave ; PIV stéréoscopique ; PIV classique ; Jets axisymétriques

Keywords: Fluid mechanics; Impinging jet; Concave wall; Axisymmetric jets; Stereoscopic PIV; Traditional PIV

Abridged English version

The present Note extends a previous study of a two-dimensional jet impinging a concave wall [10]. It was concerned with a more complex case, found in practical applications, namely a line of five axisymmetric jets impinging

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : virginie.gilard@lea.univ-poitiers.fr (V. Gilard).

a concave wall. This flow is described from the average velocity fields and turbulent values obtained by Particle Image Velocimetry (PIV). To better understand the global structure and characteristics of this three-dimensional flow, stereoscopic PIV (SPIV) is also used. This recent technique allows simultaneous measurements of the three velocity components extracted from two different views of the same flow region.

The five jets originate from 10 mm in diameter (d) circular tubes. The distance between two jets p is fixed at 40 mm ($p/d = 4$). The impingement surface consists of a half cylinder (internal diameter D_c of 52 mm) and two plates used as upper and lower boundaries and is closed laterally by two other plates (Fig. 1). The main parameters of the study are the Reynolds number ($Re_d = U_j \cdot d/\nu$), the impinging height H/d (H is the distance between the jet exit and the wall) and the relative curvature D_c/d (Fig. 1). For this study, the configuration ($Re_d = 6400$; $H/d = 7$; $D_c/d = 5.2$) is retained in order to describe the flow structure.

Stereoscopic PIV measurements provide the orthogonal velocity component of the measurement plan [11]. The method used for the SPIV measurements relies on the angular displacement configuration (Fig. 2) and the reconstruction based on a three-dimensional calibration [12]. These methods require additional precautions in association with traditional PIV adjustments.

The calibration of two cameras is carried out with a two-dimensional target moving in the light sheet. The target is a plate with ordered points according to a known reference pattern. The calibration begins with the acquisition of images of the target by each camera in various planes according to the z direction.

The relation of calibration between the three-dimensional image plane and the measured physical space for the two cameras is calculated by comparing the point positions of the target in the various planes [13]. From this calibration, it is possible in a second step to transform the two-dimensional velocity fields obtained by traditional PIV into a three-dimensional velocity field of the flow.

Image acquisitions by the cameras are carried out with the FlowManager 3.0 software. The PIV is evaluated by an adaptive multi pass correlation with a window size of 32×32 pixels and $50 \times 50\%$ overlap.

To evaluate the measurement accuracy, the target was moved in the out-plane direction with regular step. The global errors can be estimated while defining the mean and RMS values of the difference between the real displacement and the reconstructed displacement of the target points (Table 1 and Fig. 3).

The three-dimensional flow structure and the interaction between the jets is described by considering the X – Y vertical planes located at $z/d = 0$ (principal plane containing the jet axis) and at $z/d = p/2$ (median plane of two successive jets) and a Y – Z vertical plane located at $x/d = 5$ (Fig. 3).

The data indicate that the jet impinging the centre of the wall ($x/d = 7$; $y/d = 0$) (Fig. 5(a)) propagates in all directions. The presence of two vortices is observed (Fig. 5(b)) and their location is symmetrical with respect to the horizontal axis at $x/d = 5$ and $y/d = \pm 2$. In the jet mixing layers, some vortices are generated and convected downstream. After the jet impact on the wall, the vortices accumulate and form a swirl which seems to stabilize at approximately 70° from the stagnation point. It is found that a single structure surrounds the impingement area. This structure can be regarded as the ‘ground vortex’ observed in the case of jets impinging a plane wall with cross flow as mentioned by Barata [14]. In the transverse direction, this structure meets the corresponding vortex of the close jet on the median plane of the two jets ($z/d = p/2$), the fluid leaves the wall and moves in the normal direction to the wall (Fig. 5(c) and (d)). This yields a ‘fountain’ effect observed by Carcasci [15] and Saripalli [16] in the case of a circular jet impinging a plane wall.

In addition, one finds in the various planes that strong RMS values of the three velocity components are mainly located in the jet mixing layer where various instabilities are characterized by swirling structures (Figs. 6 and 7). Regions of strong fluctuations of the longitudinal component ($\sqrt{u'^2}$) meet in the centre of the jet begin at $x/d = 5$, which corresponds to the end of the potential core (Fig. 6(a)). We noticed, as in the free jet case, a standardization of the turbulence ($\sqrt{u'^2} \approx \sqrt{v'^2} \approx \sqrt{w'^2} \approx 0.12U_j$) (Figs. 6(a)–(d) and 7(b)). In the vicinity of the stagnation point, the longitudinal fluctuations increase to reach their maximum value ($\sqrt{u'^2} \approx 0.14U_j$) at $x/d = 6.4$ and decrease as the measurement point approaches the wall. Cooper et al. [17], in the case of an axisymmetric jet impinging a plane wall, explain this decrease by the decline of the turbulence diffusion starting from the mixing layer.

Results indicate that the flow structure of several axisymmetric jets impinging a concave wall has features in common with the multiple jets impacting a plane wall. However, when the jet meets a concave surface, one observes the formation of a swirl stabilizing around the stagnation zone. In spite of a delicate set up made by the concave form

of the impingement surface, results obtained by SPIV make it possible to confirm the three-dimensional structure and the interaction between the jets issuing from a line of jets impinging a concave wall.

1. Introduction

Les jets impactant des parois sont largement utilisés aujourd'hui dans l'industrie car ils génèrent d'importants transferts de chaleur et/ou de masse. On les retrouve dans les applications telles que le séchage du papier, des textiles, des céramiques mais aussi le refroidissement des composants électroniques ou des aubes de turbines. Suivant les applications, les conditions d'impact diffèrent faisant intervenir de nombreux paramètres d'origine géométrique ou dynamique. La connaissance des effets de ces paramètres sur le taux de transfert de chaleur est alors nécessaire à la bonne élaboration du système de refroidissement. Bien que de nombreuses recherches se soient concentrées sur les différents paramètres, certaines lacunes demeurent en ce qui concerne la forme de la paroi impactée. En effet la plupart des études concernent un (ou plusieurs) jet(s) impactant une paroi plane. Pour le refroidissement de la surface interne d'une aube de turbine, dans la région à mi-corde la courbure est si faible que l'on peut, en première approximation, considérer que les jets impactent une paroi plane. Cette hypothèse n'est plus vraie au bord d'attaque où les jets viennent impacter une plaque courbe concave. Malheureusement très peu d'études concernent des parois courbes (une quinzaine au plus en 30 ans). De plus, c'est surtout l'aspect thermique des jets impactants qui est plus largement étudié compte tenu de leurs nombreuses applications même si les aspects thermiques et aérodynamiques sont fortement liés. Ainsi jusque dans les années 80, l'essentiel des études porte sur l'aspect thermique du problème avec le calcul de corrélations thermiques $Nu = f(Re)$ [1–3]. Dans les années 80 apparaissent les premières mesures de pression [4,5], puis dans les années 90 l'intérêt se porte sur la visualisation des phénomènes physiques [6,7]. Ce n'est que très récemment que quelques études portent sur le champ aérodynamique de l'écoulement de jets impactant une paroi courbe [8–10].

Après l'étude d'un jet bidimensionnel impactant une paroi concave [10], nous nous sommes intéressés au cas plus complexe, mais plus utilisé dans l'industrie, d'une ligne de jets axisymétriques impactant une paroi concave. Cet écoulement est décrit à partir des champs moyens de vitesse et des valeurs turbulentes obtenus par vélocimétrie par imagerie de particules (PIV). Afin de connaître plus en détails la structure globale et les caractéristiques de cet écoulement tridimensionnel, la PIV stéréoscopique a également été utilisée. Cette récente technique permet de mesurer les trois composantes de la vitesse simultanément à partir de deux prises de vue différentes d'un plan de l'écoulement.

2. Dispositif expérimental

Les cinq jets sont réalisés grâce à des tubes circulaires de 10 mm de diamètre interne (d) noyés dans un bloc d'altuglas de 30 mm d'épaisseur, 20 mm de longueur et de 310 mm de largeur (Fig. 1). La distance entre deux jets (p) est fixe et de 40 mm soit un pas $p/d = 4$. La même vitesse débitante U_j est appliquée à chaque jet au moyen d'un système d'alimentation comportant un ventilateur, un distributeur, des vannes et des venturis (non représentés sur la Fig. 1). La surface d'impact transparente est constituée d'un demi cylindre de diamètre interne D_c de 52 mm, formant la partie concave de la paroi, de deux plaques de garde fixées en prolongement des bords du demi cylindre

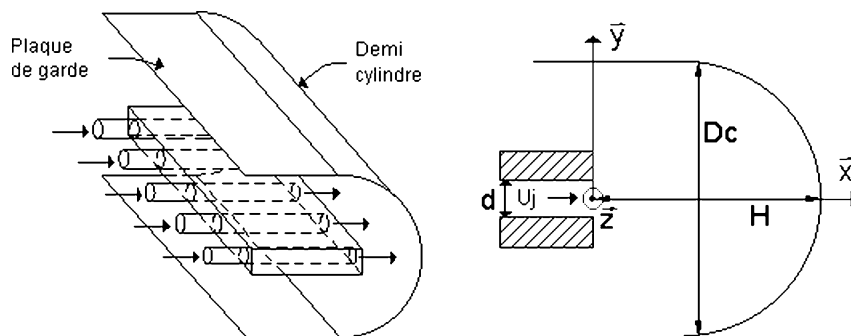


Fig. 1. Schéma d'une ligne de cinq jets axisymétriques et plan principal d'étude.

Fig. 1. Diagram a line of five axisymmetric jets and the main plane of the study.

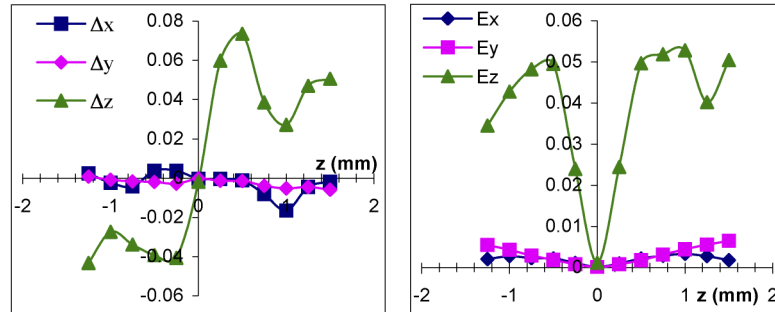
Tableau 1

Valeurs moyennes et écarts type de l'erreurs sur les trois composantes pour les plans $X-Y$ et $Y-Z$

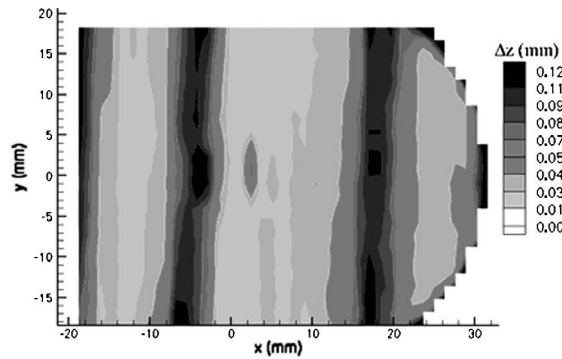
Tableau 1

Means and RMS values of the errors of the three components for the $X-Y$ and $Y-Z$ plane

Erreur globale (mm)	Δx	E_x	Δy	E_y	Δz	E_z
Plan $X-Y$	-0,002	0,002	-0,002	0,003	0,01	0,039
Plan $Y-Z$	0,147	0,054	-0,014	0,01	-0,02	0,01



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Valeurs moyennes et écarts types de l'erreur pour différents plans z et (b) répartition spatiale de l'erreur sur la composante z , pour le plan $X-Y$.Fig. 3. (a) Means and RMS values of the three components errors for several plans Z and (b) field of the z errors for the $X-Y$ plane.

stéréoscopique. Afin d'examiner la structure tridimensionnelle de l'écoulement et l'interaction entre les jets, des plans verticaux $X-Y$ situés à $z/d = 0$ (plan principal passant par l'axe du jet) et à $z/d = p/2$ (plan médian de deux jets successifs) et un plan vertical $Y-Z$ situé à $x/d = 5$ ont été retenus (Fig. 4). Pour les plans $X-Y$ ($z/d = 0$) et $Y-Z$ ($x/d = 5$), la PIV stéréoscopique a été utilisée afin d'obtenir les trois composantes de la vitesse (U, V, W).

4.1. Structure de l'écoulement d'un jet axisymétrique impactant une paroi concave

La Fig. 5 présente les champs moyens de vitesse pour les plans $X-Y$ à $z/d = 0$ et à $z/d = p/2$ ($Re_d = 6400$; $H/d = 7$; $D_c/d = 5,2$). On observe que le jet impacte le centre de la paroi ($x/d = 7$; $y/d = 0$) (Fig. 5(a)). Au point d'impact, le jet se propage dans toutes les directions. On note également la présence de deux tourbillons. Ces derniers sont situés symétriquement par rapport à l'axe horizontal \vec{x} à $x/d = 5$ et $y/d = \pm 2$. Dans la couche de mélange du jet axisymétrique, zone de fort cisaillement, des structures tourbillonnaires sont créées puis convectées en aval. Après l'impact du jet sur la paroi concave, ces structures, s'accumulent et forment un tourbillon qui semble se stabiliser à une distance s_r (abscisse curviligne) de $3,3d$ (soit $\approx 70^\circ$) du point d'impact du jet (Fig. 5(b)). Il s'agit en fait d'une seule et même structure qui entoure la zone d'impact. Le centre de ce tourbillon est situé à une distance normale à la paroi d'environ $0,8d$. Cette structure peut être, en quelque sorte, considérée comme le « ground vortex » observé dans le cas

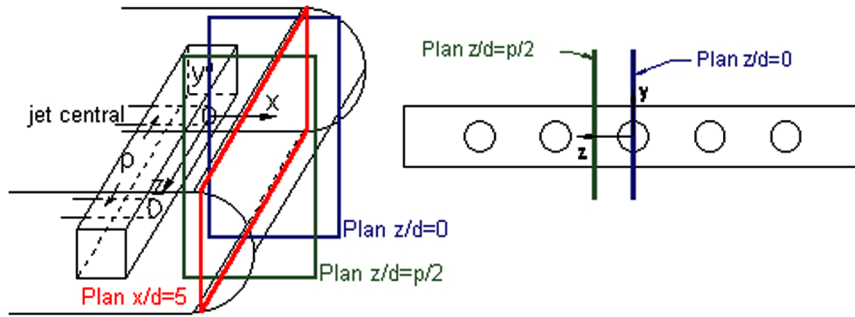


Fig. 4. Positions des plans retenus pour l'étude d'une ligne de jets axisymétriques.

Fig. 4. Plane positions for the study of a line of circular jets.

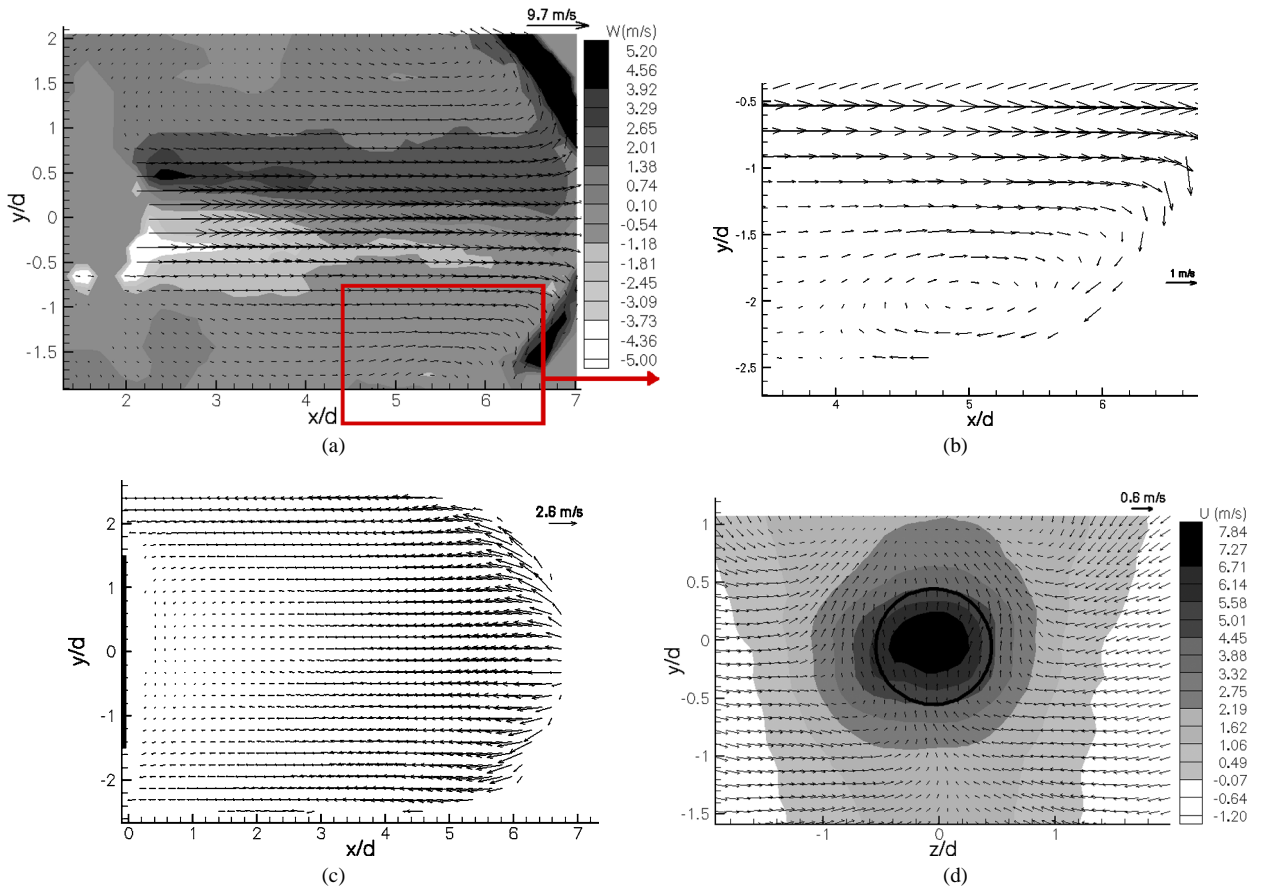


Fig. 5. Champs moyens de vitesse pour différents plans de mesure $X-Y$ situés à $z/d = 0$ (et iso contours de la composante transversale W) (a) et (b), à $z/d = p/2$ (c) et un plan $Y-Z$ situé à $x/d = 5$ (et iso contours de la composante longitudinale U) (d) ($Re_d = 6400$; $H/d = 7$; $D_c/d = 5,2$).

Fig. 5. Mean velocity field for different planes $X-Y$ at $z/d = 0$ (a) and (b), at $z/d = p/2$ (c) and plane $Y-Z$ at $x/d = 5$ (d) ($Re_d = 6400$; $H/d = 7$; $D_c/d = 5,2$).

de jets impactant une paroi plane avec écoulement transversal [14]. Dans la direction transversale \vec{z} , il rencontre le tourbillon du jet voisin au niveau du plan médian aux deux jets ($z/d = p/2$). Dans ce plan, le fluide est alors soulevé de la paroi et se dirige dans la direction normale à la paroi (Fig. 5(c)). On retrouve ainsi l'effet « fontaine » observé notamment par Carcasci [15] et Saripalli [16] dans le cas de jets circulaires impactant une paroi plane.

Pour le plan $X-Y$ à $z/d = 0$, la composante transversale (W) est présentée sous forme d'iso contour sur la Fig. 5(a). Cependant les valeurs de la composante W obtenues par PIV 3C semblent largement surévaluées (≈ 4 m/s) en raison des faibles valeurs de W (du même ordre de grandeur que la composante verticale $\approx 0,2$ m/s) et de l'incertitude de cette composante qui est 10 fois supérieure par rapport aux composantes du plan. De plus, compte tenu de la géométrie particulière du dispositif expérimental, nous ne pouvions pas nous placer dans les conditions les plus favorables ($\theta = 45^\circ$). Pour la PIV stéréoscopique, nous avons donc dû utiliser des angles beaucoup plus faibles ($\theta \approx 5^\circ$ et $\theta \approx 40^\circ$) introduisant une moins bonne précision.

La Fig. 5(d) présente le champ moyen de vitesse et la composante longitudinale U dans le plan $Y-Z$ situé à $x/d = 5$. On distingue nettement le jet pratiquement axisymétrique (zone centrale où la composante longitudinale U est positive et maximale $\approx 7,84$ m/s) et sur les bords du domaine ($z/d = \pm 2$) des zones où la composante U est négative ($U \approx -1,2$ m/s) correspondant à l'effet fontaine. On remarque également, sur le champ moyen de vitesse (V, W), l'entraînement du fluide ambiant par le jet qui semble se faire de façon désordonnée. Cependant ces vitesses ne sont pas significatives ($V \approx W \ll 1,5$ m/s) et la moyenne n'a été obtenue qu'avec un faible nombre de champs ($n < 1000$).

4.2. Valeurs turbulentes

Les champs moyens de vitesse et les valeurs RMS des composantes longitudinale U et verticale V pour les plans de mesure $X-Y$ à $z/d = 0$ et le plan $Y-Z$ à $x/d = 5$ sont présentés sur la Fig. 6. On observe sur les différents plans, que les fortes valeurs RMS des trois composantes de la vitesse se situent principalement dans la zone de cisaillement du jet axisymétrique. Cette zone est le siège de différentes instabilités caractérisées par des structures tourbillonnaires.

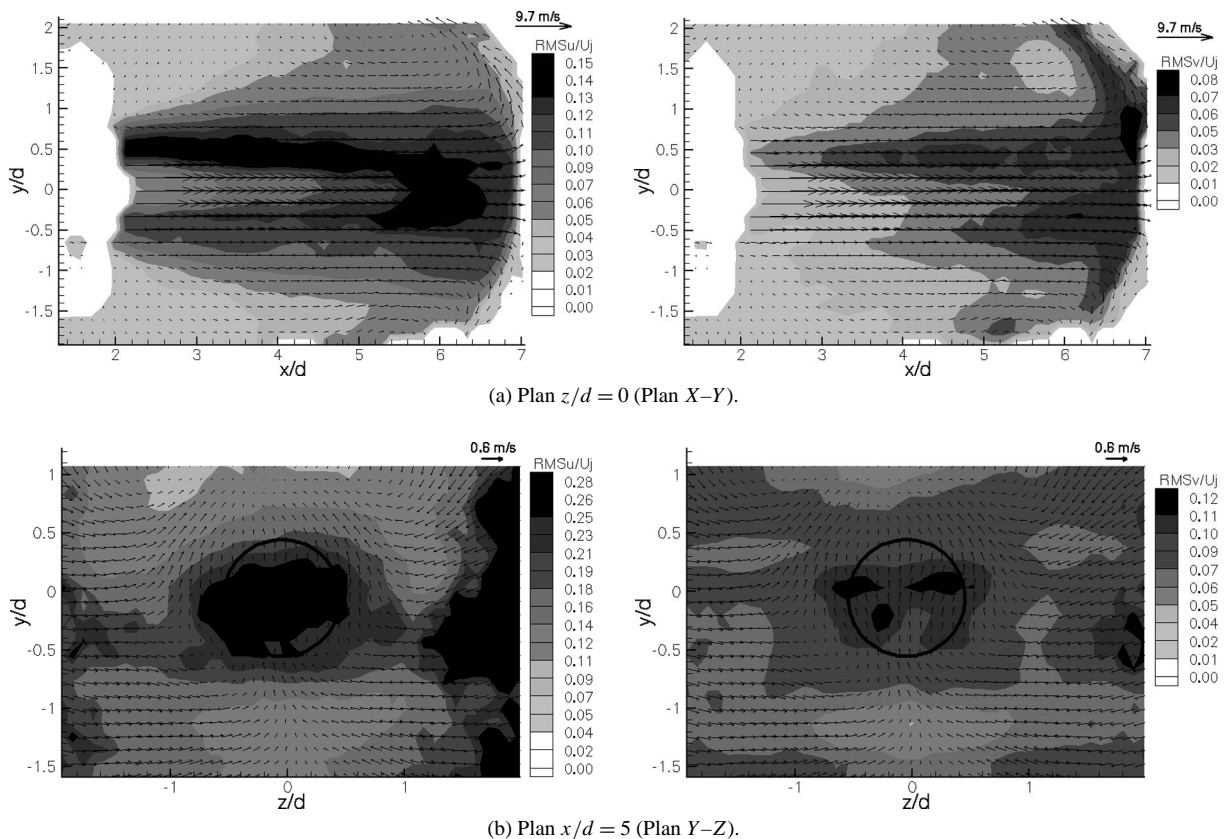


Fig. 6. Champs moyens de vitesse et iso-valeurs $\sqrt{u'^2}$ et $\sqrt{v'^2}$ dans les différents plans de mesure ($Re_d = 6400$; $H/d = 7$; $D_c/d = 5,2$).

Fig. 6. Mean velocity fields and $\sqrt{u'^2}$ and $\sqrt{v'^2}$ at different planes ($Re_d = 6400$; $H/d = 7$; $D_c/d = 5.2$).

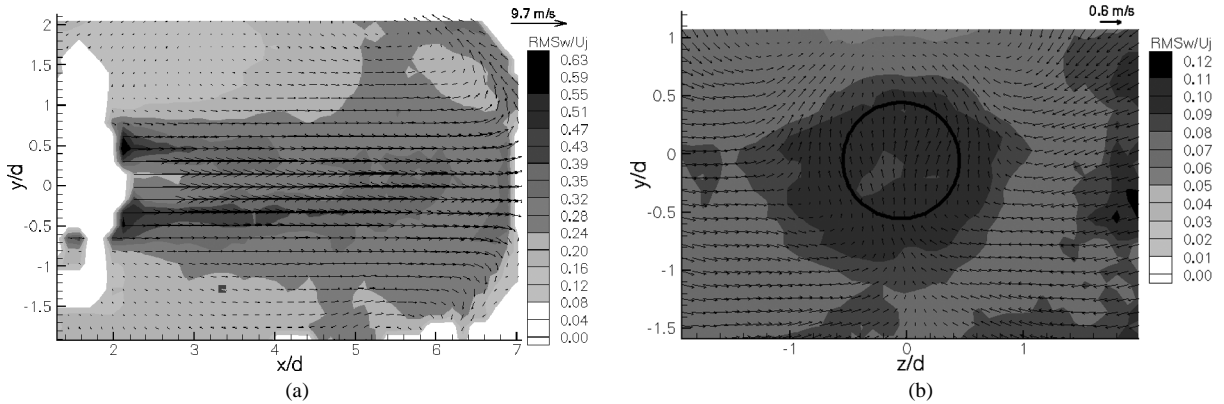


Fig. 7. Champs moyens de vitesse et iso-valeurs $\sqrt{w'^2}$ dans les différents plans de mesure ($Re_d = 6400$; $H/d = 7$; $D_c/d = 5,2$).

Fig. 7. Mean velocity fields and $\sqrt{w'^2}$ values at different planes ($Re_d = 6400$; $H/d = 7$; $D_c/d = 5.2$).

Dans le plan $X-Y$, on remarque également que les fluctuations longitudinales ($\sqrt{u'^2} \approx 0,15U_j$) sont deux fois plus importantes que les fluctuations verticales ($\sqrt{v'^2} \approx 0,08U_j$) (Fig. 6(a)). Les valeurs $\sqrt{w'^2}$ sont fortement surestimées ($\sqrt{w'^2} \approx 0,5U_j$) (Fig. 7) en raison d'une incertitude plus élevée sur la composante transversale au plan de mesure couplée à une faible valeur du rapport entre les composantes W et U . En effet, la composante W est déterminée à partir de U et la moindre erreur sur cette valeur se traduit automatiquement par une erreur beaucoup plus importante pour la composante transversale W .

Par ailleurs, on observe que les zones de fortes fluctuations de la composante longitudinale ($\sqrt{u'^2}$) se rejoignent au centre du jet à partir de $x/d = 5$ indiquant la fin de la zone potentielle du jet (Fig. 6(a)). On remarque alors, comme dans le cas du jet libre, une certaine uniformisation de la turbulence. En effet dans le plan $Y-Z$ à $x/b = 5$, les valeurs $\sqrt{v'^2}$ et $\sqrt{w'^2}$ sont de l'ordre de $0,12U_j$ (Figs. 6(b) et 7(b)). Les valeurs $\sqrt{u'^2}$ sont d'environ $0,28U_j$ mais sont surévaluées car dans ce plan la composante longitudinale correspond à la composante hors plan. Toutefois dans le plan $X-Y$ et à $x/b = 5$ la valeur des $\sqrt{u'^2}$ est d'environ $0,11U_j$. Au voisinage du point d'impact, on remarque que les fluctuations longitudinales augmentent pour atteindre leur valeur maximale ($\sqrt{u'^2} \approx 0,14U_j$) à $x/d \approx 6,4$ puis tendent vers zéro à l'approche de la paroi. Cooper et al. [17] ont également observé, pour un jet axisymétrique impactant une surface plane, une diminution des valeurs $\sqrt{u'^2}$ à l'approche de la paroi à environ $0,3d$ de la paroi. Ils expliquent cette décroissance par la chute de la diffusion de la turbulence à partir de la couche de mélange.

5. Conclusion

Les résultats montrent que la structure de l'écoulement d'une ligne de jets axisymétriques impactant une paroi concave possède plusieurs points communs avec les jets multiples impactant une paroi plane. On retrouve de fortes valeurs RMS des trois composantes de la vitesse dans la zone de mélange du jet, mais également l'effet fontaine dans le plan médian de deux jets successifs. Cependant lorsque le jet rencontre une surface d'impact concave, on observe la formation d'un tourbillon stabilisé autour de la zone d'impact.

Cette étude nous a également permis d'utiliser et d'appréhender la technique de PIV stéréoscopique. Malgré une mise en œuvre rendue délicate par la forme concave de la surface d'impact, les résultats obtenus sont encourageants et ils nous ont permis de confirmer la structure tridimensionnelle et l'interaction entre les jets d'une ligne de jets impactant une paroi concave.

Références

- [1] W. Tabakoff, W. Clevenger, Gas turbine blade heat transfer augmentation by impingement of air jets having various configurations, ASME J. Engrg. Power (1972) 51–60.

- [2] D.E. Metzger, T. Yamashita, C.W. Jenkins, Impingement cooling of concave surfaces with lines circular air jets, *ASME J. Engrg. Power* (1969) 149–158.
- [3] R.E. Chupp, H.E. Helms, P.W. McFadden, T.R. Brown, Evaluation of internal heat transfer coefficients for impingement-cooled turbine airfoils, *J. Aircraft* 6 (1969) 203–208.
- [4] D.H. Lee, Y.S. Chung, S.Y. Won, The effect of concave surface curvature on heat transfer from a fully developed round impinging jet, *J. Heat Mass Transfer* 42 (1999) 2489–2497.
- [5] P. Hrycak, Heat transfer from a row of impinging jets to concave cylindrical surfaces, *J. Heat Mass Transfer* 24 (1981) 407–419.
- [6] C. Cornaro, A.S. Fleischer, J.R. Goldstein, Flow visualisation of a round jet impinging on cylindrical surfaces, *Experimental Thermal Fluid Sci.* 20 (1999) 66–78.
- [7] C. Gau, C.M. Chung, Surface curvature effect on slot-air-jet impingement cooling flow and heat transfer process, *J. Heat Transfer Trans. ASME* 113 (1991) 858–864.
- [8] M. Choi, H.S. Yoo, G. Yang, J.S. Lee, D.K. Sohn, Measurement of impinging jet flow and heat transfer on a semi-circular concave surface, *J. Heat Mass Transfer* 43 (2000) 1811–1822.
- [9] G. Yang, M. Choi, J.S. Lee, An experimental study of slot jet impingement cooling on concave surface: effects of nozzle configuration and curvature, *Internat. J. Heat Mass Transfer* 42 (1999) 2199–2209.
- [10] V. Gilard, L.-E. Brizzi, Slot jet impinging a curved wall, in: *Proceedings of ASME Montreal (2002) n° FEDSM2002-31270*.
- [11] D. Calluad, Développement d'une méthode de mesure tridimensionnelle par PIV stéréoscopique. Application à l'étude de l'écoulement naissant et établi autour d'un parallélogramme (2003), Thèse de l'université de Poitiers.
- [12] A.K. Prasad, Stereoscopic particle image velocimetry, *Experiments in Fluids* 29 (2000) 103–116.
- [13] S.M. Soloff, R.J. Adrian, Z.-C. Liu, Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry, *Meas. Sci. Technol.* 8 (1997) 1441–1454.
- [14] J.M. Barata, Fountain flows produced by multiple impinging jets in a cross flow, *AIAA J.* 34 (1996) 2523–2530.
- [15] C. Carcasci, An experimental investigation on air impinging jets using visualisation methods, *Internat. J. Thermal. Sci.* 38 (1999) 808–818.
- [16] K.R. Saripalli, Visualisation of multi-jet impingement flow, *AIAA Paper* (1981) 81-1364.
- [17] D. Cooper, D.C. Jackson, B.E. Launder, G.X. Liao, Impinging jet studies for turbulence model assessment I. Flow field experiments, *Internat. J. Heat Mass Transfer* 36 (1993) 2675–2684.