



Analyse spatio-temporelle de jets axisymétriques d'air et d'hélium

Sami Boujema^a, Muriel Amielh^b, Marie Pierre Chauve^{b,*}

^a *Faculté des sciences de Tunis, département de physique, campus universitaire Le Belvédère, 1060 Tunis, Tunisie*

^b *Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre, technopôle Château Gombert, 49, rue F. Joliot-Curie, BP 146, 13384 Marseille cedex 13, France*

Reçu le 19 décembre 2003 ; accepté après révision le 11 juin 2004

Disponible sur Internet le 22 septembre 2004

Présenté par Paul Clavin

Résumé

On étudie l'influence de fortes variations de masse volumique sur la dynamique des instabilités qui se développent dans des jets axisymétriques d'air pur ou d'hélium pur en proche sortie de buse. Associées à des mesures par VLD, les techniques de visualisations rapides sont utilisées pour construire des diagrammes spatio-temporels qui montrent l'évolution des structures le long des jets en fonction du nombre de Reynolds et de leur masse volumique. On met en particulier en évidence le caractère global de l'instabilité du jet d'hélium. *Pour citer cet article : S. Boujema et al., C. R. Mecanique 332 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Space–time analysis of axisymmetric jets of air and helium. The effects of strong density variations on the dynamics of instabilities which develop in axisymmetric jets of pure air or pure helium are studied in the near field. By using LDV measurements associated with fast visualization techniques, space–time diagrams are built in order to show the evolution of the structures along the jets according to their Reynolds number and their density. In particular, the global character of the helium jet instabilities is highlighted. *To cite this article: S. Boujema et al., C. R. Mecanique 332 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Mécanique des fluides ; Jet ; Instabilité ; Masse volumique variable

Keywords: Fluid mechanics; Jet; Instability; Variable density

Abridged English version

For helium and air jets ($S = \rho_{\text{jet}}/\rho_{\text{air}}$, $S = 0.14$ for helium), the influence of the strong density variation on the dynamics of axisymmetric jets is studied from the stable case to the turbulent case. These flows are investigated by

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : Marie-Pierre.Chauve@irphe.univ-mrs.fr (M.P. Chauve).

using a fast video camera with associated image processing, and measurements of instantaneous velocity signals obtained by Laser Doppler Velocimetry (LDV). The space–time dynamics of the vortical structures, which develop in the jet without forcing, is presented in the close field ($0–12D$).

The air or helium flow passes through a vertical tube of diameter $D_p = 88$ mm and length 360 mm. The flow crosses successively a honeycomb, a fine grid and exhausts from an axisymmetric convergent nozzle of exit diameter $D = 15$ mm (Fig. 1). The resulting vertical jet develops in a channel of square section (300×300 mm²). The jet is seeded by micrometric oil particles generated in the upstream circuit. A laser sheet, obtained from a 4 W power laser beam, is used for visualizations. The images of the jet are captured by a fast camera (maximum cadency of 4500 images/sec of 256×256 pixels with 256 gray levels) connected to a PC in order to store up to 8192 images per experiment. An example of top-hat velocity profiles measured by LDV at the jet exit is given on Fig. 2. Fig. 3 presents the aspects of the helium and air jets. For the air jet, Reynolds numbers vary from 500 to 7000 (Fig. 3(a)). For $Re < 500$, the flow is laminar even far from the exit (until $30D$). Beyond $Re = 500$, the helical mode of instabilities becomes visible [3]. The varicose mode starts to develop from $Re = 900$. For the helium jet Reynolds numbers vary from 200 to 1000 and the Froude numbers from 3 to 54 (Fig. 3(b)). The first organized structures appear in a varicose mode for $Re = 250$, after the existence of an helical mode ($Re = 230$). These structures have large wavelengths and present a space–time dynamics quite different from that observed in an air jet. A temporal signal is deduced from the gray levels of a pixel located on the edge of the jet (Fig. 4). The characteristic frequencies of the structures are calculated by the autocorrelation of the extracted signal (Fig. 5). For the air jet, the results concerning the evolution of the Strouhal number according to the Reynolds number presented in Fig. 6 are in good agreement with those of Becker and Massaro [7]. The various space–time diagrams presented on Figs. 7 and 8 are built using horizontal or vertical lines extracted from the images. Concerning the air jet diagrams, multiple pairings are observed (Fig. 7). This result is also observed on the space–time diagrams of horizontal lines (Fig. 8, air jet, $Re = 1734$). In the case of helium, the extreme regularity of the structure evolution is underlined (Figs. 7 and 8). Local convection velocities V_c of the vortical structures (Fig. 9) are estimated by the measurement of the slope of the paths left by the vortices in Fig. 7. For increasing exit velocity U_j in the air jets, the V_c/U_j ratio decreases and tends asymptotically towards 0.5 for $Re > 1600$. This value of 0.5 is in agreement with the Kelvin–Helmholtz linear theory [9] when $S = 1$ and without co-flow. In the helium jet, the asymptotic value of 0.35 is not in agreement with the expected theoretical value of 0.123 [9] probably due to the absolute character of these instabilities. The frequency of the vortical structures decreases along the air jet (Fig. 10(a)). On the contrary, the frequency remains constant in the case of the helium jets all along the Z axis for each Reynolds number considered in this study (Fig. 10(b)). This particular behavior of the helium jet is representative of the global mode of the instability. This result is related to the effects of density variation which drive the transition from the absolute to convective instability state when increasing S [1].

1. Introduction

Avec le développement de la vidéo ultra rapide, les techniques de visualisations ont considérablement progressé. Ce moyen d'investigation associé à des analyses par traitement d'images permet d'affiner les connaissances actuelles sur les instabilités de jets. Des interrogations subsistent quant au comportement spatio-temporel des structures qui se développent naturellement dans les mélanges à masse volumique variable, en particulier au delà du seuil de stabilité lorsque le rapport de densité S ($S = \rho_{\text{jet}}/\rho_{\text{air}}$) entre le jet et le milieu ambiant est tel que l'on passe d'un système d'instabilité convective à un système d'instabilité absolue [1]. Dans le but d'étudier ultérieurement les mélanges, on se propose de valider une nouvelle technique d'investigation expérimentale basée principalement sur des traitements d'images appliquée ici à l'analyse spatio-temporelle de la dynamique de jets axisymétriques d'air pur et d'hélium pur ($S = 1$ pour l'air et $S = 0,14$ pour l'hélium). Cette étude est menée principalement au moyen d'une caméra rapide et de traitements associés tels que des diagrammes spatio-temporels et des mesures de

signaux de vitesse instantanée obtenus par vélocimétrie laser Doppler (VLD). Les résultats qui sont présentés ici concernent le développement du jet dans le champ proche ($0-12D$) et plus particulièrement dans la zone $0-6D$.

2. Dispositif expérimental

L'air et l'hélium sont acheminés à travers deux circuits indépendants munis d'électrovannes. Ce système, associé à la VLD, permet d'ajuster le débit massique désiré en mesurant la composante longitudinale de vitesse sur l'axe, en sortie de buse. Un contrôle de la pression et de la température est effectué en amont du jet. L'écoulement traverse un tube vertical de diamètre $D_p = 88$ mm et de longueur $= 360$ mm, en passant, successivement, par un nid d'abeille, une grille à maille fine et finalement une buse profilée de diamètre de sortie $D = 15$ mm (Fig. 1). Le jet résultant s'épanouit dans une veine de section carrée (300×300 mm²). Une plaque en mousse, percée au centre, est placée à $30D$ de la sortie de la buse pour éviter les perturbations extérieures. Le jet estensemencé par des particules d'huile de l'ordre du micromètre, générées par un ou plusieurs diffuseurs de parfum placés dans le circuit d'entrée. En sortie de veine, l'écoulement est collecté dans une hotte dont la distance à la veine d'expérience a été ajustée pour ne pas créer de vitesse additionnelle dans la zone d'étude; un extracteur étant disposé à environ 3 m en aval de la hotte. Un plan laser, obtenu à partir d'un faisceau issu d'un laser continu de puissance 4 W est utilisé pour les visualisations. Les images du jet sont capturées par une caméra rapide (cadence maximale de 4500 images/sec en 256×256 pixels \times 256 niveaux de gris), raccordée, via une interface SCSI, à un PC afin de stocker jusqu'à 8192 images par expérience.

3. Résultats

Un exemple de profils radiaux de vitesse en sortie de buse est donné sur la Fig. 2 dans une représentation où $R = D/2$ et $(R - r)$ est adimensionné par l'épaisseur de quantité de mouvement θ . Cette épaisseur de quantité

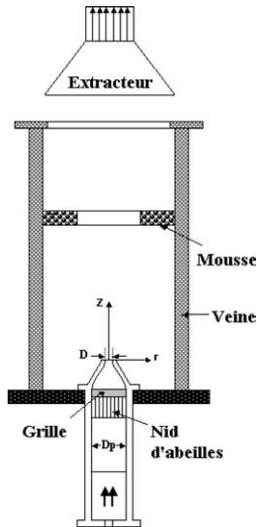


Fig. 1. Le jet vertical.
Fig. 1. The vertical jet.

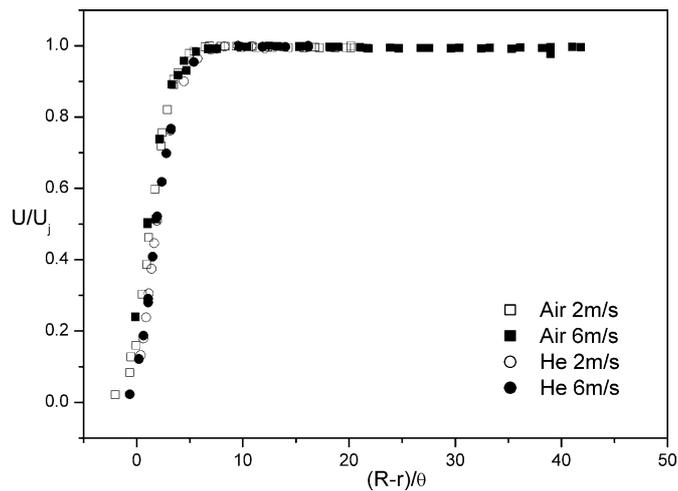


Fig. 2. Profils radiaux de vitesse longitudinale en sortie de buse dans les jets d'air et d'hélium purs.

Fig. 2. Radial profiles of longitudinal velocity at the pipe exit for air and helium jets.

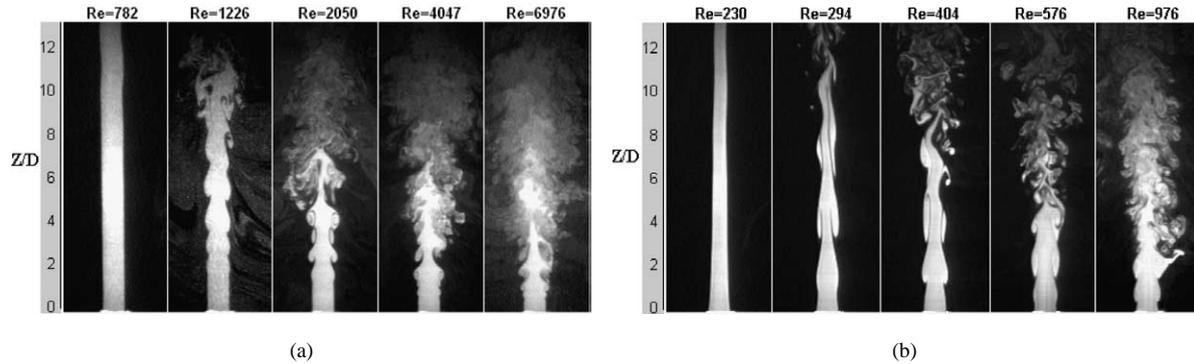


Fig. 3. Evolution des structures dans (a) le jet d'air et (b) le jet d'hélium.

Fig. 3. (a) Air jets aspects and (b) helium jets aspects.

de mouvement qui vaut ici $\theta = 0,34$ mm et $0,18$ mm respectivement pour l'air à 2 et 6 m/s, et $\theta = 0,79$ mm et $0,46$ mm respectivement pour l'hélium à 2 et 6 m/s a été déterminée à partir des profils de vitesse mesurés par VLD. Les valeurs obtenues vérifient une loi du type $\theta/D = ARe^{-1/2}$ avec $A = 0,87$ dont la dépendance en nombre de Reynolds est en accord avec les résultats de Kyle et Sreenivasan [2]. Les profils de vitesse en sortie de buse sont de type « top-hat ». Quelques aspects des évolutions globales des jets d'air et d'hélium sont présentés sur les Figs. 3. Pour le jet d'air (Fig. 3(a)), les mesures couvrent une gamme de nombre de Reynolds ($Re = U_j D / \nu$) allant de 500 à 7000 (U_j étant la vitesse de sortie du jet et ν la viscosité cinématique du gaz considéré, ici l'air). On note que, pour les Reynolds inférieurs à 500, le régime de l'écoulement apparaît complètement laminaire même loin de la sortie de la buse (jusqu'à $30D$). Au-delà de $Re = 500$, le mode hélicoïdal des instabilités devient visible [3]. Comme on peut le voir sur la Fig. 3(a), à partir de $Re = 900$, le mode variqueux commence à se développer associé à l'apparition des premiers appariements des structures tourbillonnaires, dont le mécanisme est bien décrit par Meyer et al. [4]. On observe également, pour des nombres de Reynolds croissants, une diminution très nette de la longueur de la zone de transition à partir de laquelle on ne mesure plus de fréquence caractéristique (régime turbulent). Pour le jet d'hélium (Fig. 3(b)), les mesures présentées couvrent la gamme de nombres de Reynolds 200–1000 et de nombres de Froude 4–54, le nombre de Froude étant défini par $Fr = SU_j^2 [(1-S)gD]^{-1}$ où g est l'accélération de la pesanteur. Après l'apparition d'un mode hélicoïdal ($Re = 230$), les premières structures organisées apparaissent à $Re \approx 250$, sous l'aspect d'un mode variqueux. Ces structures sont très allongées et présentent une dynamique spatio-temporelle qui diffère de celle observée dans un jet d'air indépendamment du paramètre de similitude considéré. Au nombre de Reynolds élevé (976), on notera l'existence d'éjections latérales caractéristiques [5] et l'absence du phénomène d'appariement des tourbillons.

L'analyse du signal temporel déduit des niveaux de gris (256 niveaux) d'un pixel ($0,35 \times 0,35$ mm²) choisi à $Z/D = 1,5$ au milieu d'une structure (Fig. 4) permet d'en calculer la fréquence de passage F , même aux nombres de Reynolds les plus élevés ($Re = 7000$), par une autocorrélation du signal extrait (Fig. 5). A titre indicatif, on signale que Crow et Champagne [6] avaient procédé en 1971 à un simple comptage des structures qui défilent sur une séquence vidéo pour obtenir ces fréquences caractéristiques. Pour un jet d'air, Becker et Massaro [7] ont réalisé une analyse spectrale du signal de concentration d'un point de diamètre égal à $0,5$ mm situé au bord du jet. Leurs résultats ainsi obtenus dans la même gamme de nombres de Reynolds, en concordance avec les nôtres, sont présentés sur la Fig. 6 qui donne en fonction de Re l'évolution du nombre de Strouhal $Str = fD/U_j$ où f est la fréquence mesurée à $Z/D = 1,5$. Cette Fig. 6 montre également le bon accord de l'analyse d'images avec les résultats de l'analyse spectrale des signaux de vitesse obtenus par VLD dans les jets d'hélium. Par ailleurs, en suivant en fonction du temps soit une ligne horizontale, soit une ligne verticale, les acquisitions d'images par la vidéo rapide permettent de construire les différents diagrammes spatio-temporels présentés sur les Figs. 7 et 8. Ainsi, l'analyse d'une ligne verticale extraite sur le bord du jet d'air ou d'hélium met en évidence l'évolution

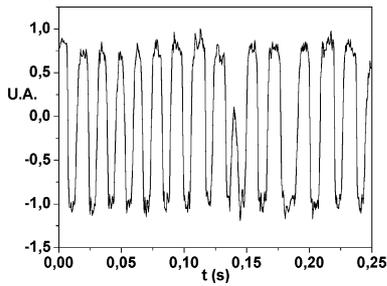


Fig. 4. Signal temporel du niveau de gris d'un pixel enregistré sur le bord du jet ($Z/D = 1,5$, cas de l'air, $Re = 1430$).

Fig. 4. Temporal signal of the pixel gray level recorded on the edge of the jet.

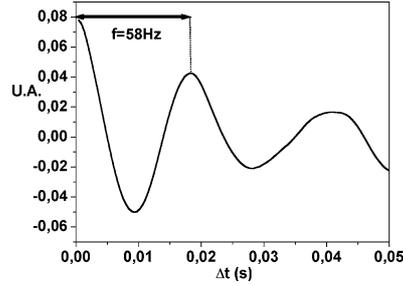


Fig. 5. Autocorrelation of a pixel signal.

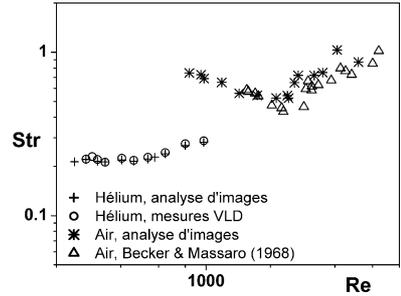


Fig. 6. Variation du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds dans les jets d'air et d'hélium purs.

Fig. 6. Strouhal number evolution versus Reynolds number in pure air and helium jets.

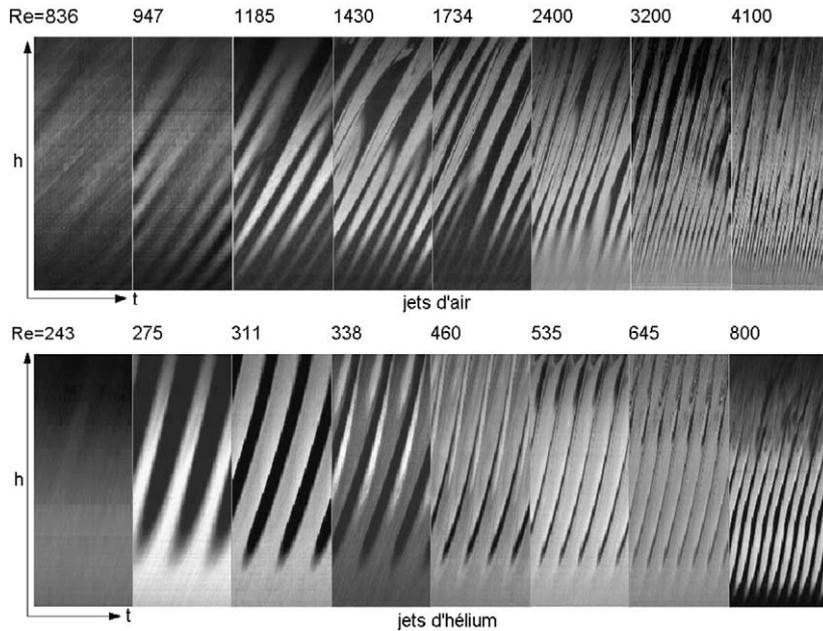


Fig. 7. Diagrammes spatio-temporels de lignes verticales (pour chaque image : $dt = 0,089$ s et $h = 6D$).

Fig. 7. Space–time diagrams of vertical lines.

longitudinale des structures. On observe dans le diagramme relatif au jet d'air (Fig. 7) l'existence de multiples convergences de traces, significatives d'appariements, se traduisant, en autre, par un doublement de période en fonction de Z , visibles également sur les diagrammes spatio-temporels de lignes horizontales (Fig. 8, jet d'air, $Re = 1734$). Dans le cas de l'hélium (Figs. 7 et 8), on notera l'extrême régularité de l'évolution des structures dont la dynamique se différencie ainsi très clairement de celle du jet d'air. Les performances des traitements d'images actuels permettent d'obtenir d'une manière systématique des diagrammes spatio-temporels d'une résolution bien supérieure à ceux obtenus par Liepmann et Gharib [8] ou Kyle et Sreenivasan [2] qui, au début des années 1990, avaient tenté d'établir ce type de diagrammes à partir de films en suivant, d'une image à l'autre, l'emplacement de quelques structures successives et en traçant, point par point, leurs trajectoires.

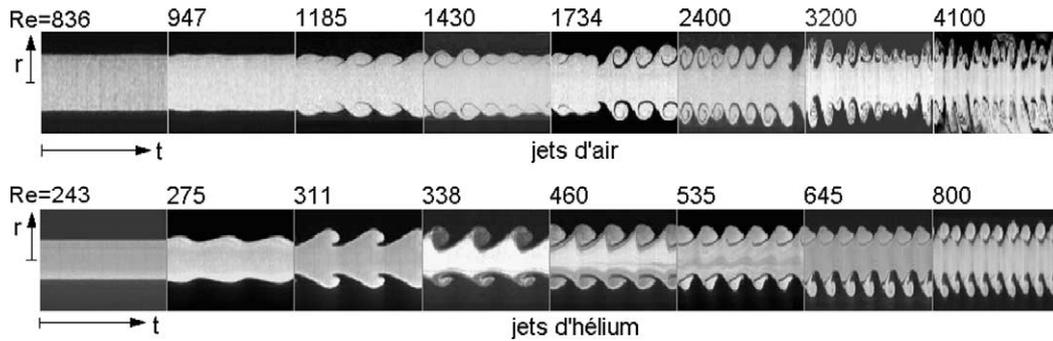


Fig. 8. Diagrammes spatio-temporels de lignes horizontales (Pour chaque image : $dt = 0,089$ s et $Z = 1.5D$).

Fig. 8. Space-time diagrams of horizontal lines.

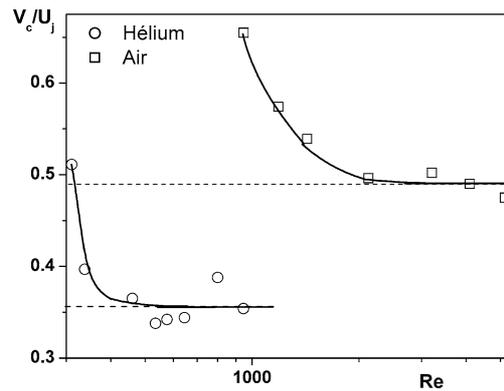


Fig. 9. Vitesses de convection en fonction du nombre de Reynolds dans les jets d'air et d'hélium purs.

Fig. 9. Convective velocity versus the Reynolds number in pure air and helium jets.

Les diagrammes spatio-temporels présentés permettent d'estimer en fonction de Re , en considérant la pente des traces laissées par les tourbillons (Fig. 7), les vitesses de convection locales V_c des tourbillons présentées sur la Fig. 9 pour $Z/D = 1,5$. Dans l'air, lorsque la vitesse de sortie du jet U_j augmente, le rapport V_c/U_j décroît et tend asymptotiquement vers une valeur voisine de 0,5 pour $Re > 1600$. Cette valeur, dans le cas où $\rho_{jet} = \rho_{air}$ et en l'absence de co-courant, est en accord avec les résultats de la théorie linéaire des instabilités de Kelvin–Helmholtz [9]. Dans le cas de l'hélium, la valeur asymptotique obtenue expérimentalement se situe plutôt à 0,35. Cette différence pourrait être significative de la variation de densité entre l'hélium et le milieu extérieur (air).

Tout au long du jet d'air, la fréquence des structures tourbillonnaires décroît comme on peut le constater sur la Fig. 10(a) où sont représentées les variations de F en fonction de la distance à la buse pour différents nombres de Reynolds. Par contre, en fonction de Z , et pour un même nombre de Reynolds, cette fréquence reste constante dans le cas des jets d'hélium (Fig. 10(b)) comme nous l'avons observé sur les diagrammes spatio-temporels. Ce comportement particulier du jet d'hélium traduit le mode global de l'instabilité étudiée. Ce résultat est lié aux effets de variation de masse volumique qui conduisent, pour un certain rapport de densité entre le jet et le milieu ambiant, à une transition de type absolu-convectif lorsque S augmente [1].

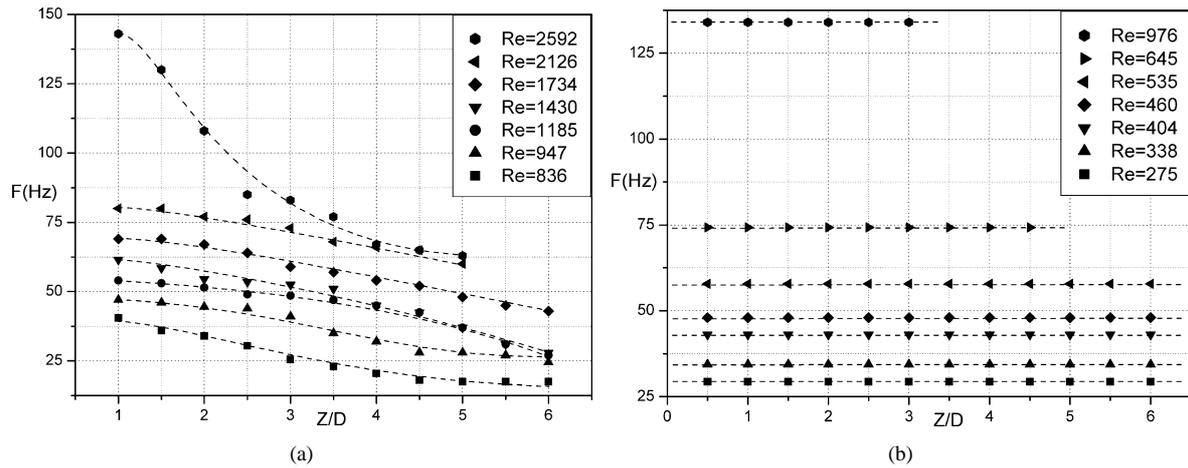


Fig. 10. (a) Variation de la fréquence en fonction de Z/D à différents nombres de Reynolds (jet d'air). (b) Variation de la fréquence en fonction de Z/D à différents nombres de Reynolds (jet d'hélium).

Fig. 10. (a) Variation of the frequency versus Z/D for selected Reynolds numbers (air jet). (b) Variation of the frequency versus Z/D for selected Reynolds numbers (helium jet).

4. Conclusion

L'analyse d'images par diagrammes spatio-temporels est un outil particulièrement bien adapté aux études expérimentales d'instabilités de jets. La dynamique locale des structures est bien décrite et quantifiée en fonction du nombre de Reynolds et de la distance à la buse. L'évolution des vitesses de convection peut également être déduite des diagrammes spatio-temporels. Les variations des fréquences caractéristiques mettent en évidence le comportement global spécifique du jet d'hélium. La méthodologie mise en œuvre ici sera utilisée dans le cas de jets composés d'un mélange variable d'air et d'hélium.

Remerciement

Les auteurs remercient P. Le Gal pour ses remarques judicieuses dans la rédaction finale.

Références

- [1] P. Huerre, P.A. Monkewitz, Absolute and convective instabilities in free shear layers, *J. Fluid Mech.* 159 (1985) 151–168.
- [2] D.M. Kyle, K.R. Sreenivasan, The instability and breakdown of a round variable-density jet, *J. Fluid Mech.* 249 (1993) 619–664.
- [3] P. Monkewitz, K.D. Sohn, Absolute instability in hot jets, *AIAA J.* 26 (8) (1988) 911–916.
- [4] T.R. Meyer, J.C. Dutton, R.P. Lucht, Vortex interaction and mixing in a driven gaseous axisymmetric jet, *Phys. Fluids* 11 (1999) 3401–3415.
- [5] P.A. Monkewitz, B. Lehmann, B. Barsikov, D.W. Bechert, The spreading of self-excited hot jets by side jets, *Phys. Fluids A* 1 (3) (1989) 446–448.
- [6] S.C. Crow, F.H. Champagne, Orderly structure in jet turbulence, *J. Fluid Mech.* 48 (3) (1971) 547–591.
- [7] H.A. Becker, T.A. Massaro, Vortex evolution in a round jet, *J. Fluid Mech.* 31 (3) (1968) 435–448.
- [8] D. Liepmann, M. Gharib, The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets, *J. Fluid Mech.* 245 (1992) 643–668.
- [9] P.G. Drazin, W.H. Reid, *Hydrodynamic Stability*, Cambridge University Press, 1985, p. 527.