

Effet des variations massique et dynamique d'un jet vertical à flux de gravité fixé sur la masse volumique mesurée au point d'impact sur une paroi horizontale

Ghislain Michaux & Olivier Vauquelin

Institut de Mécanique de Marseille, IM2/UNIMECA
Aix-Marseille Université
Technopôle de Château-Gombert, 60 rue Joliot Curie
13 453 Marseille cedex 13, France
ghislain.michaux@etumel.univmed.fr

Résumé :

Cet article présente des essais expérimentaux pour un jet vertical axisymétrique d'air et d'hélium impactant une paroi horizontale. Pour différents nombres de Richardson initiaux (2×10^{-3} – 908) et de Reynolds initiaux (47– 22780), des visualisations de l'écoulement ont été réalisées et la masse volumique au point d'impact a été mesurée. Il apparaît que, sous certaines conditions, cette masse volumique peut décroître alors que la masse volumique du mélange injecté est augmentée par ajout d'air. L'étude montre que ce résultat est lié au caractère instable de l'écoulement (bouffées), pouvant être caractérisé par une condition sur le nombre de Richardson initial.

Abstract :

This paper reports experiments on a vertical axisymmetric buoyant jet of air-helium mixture impinging on a horizontal wall. For different initial Reynolds numbers (47– 22,780) and Richardson numbers (2×10^{-3} – 908), flow visualizations were made and the density was measured at the impinging point. It is found that, under particular conditions, this density can decrease whereas the injected mixture density is increased by adding air. The study indicates that this result is linked to a puff-like flow occurrence and can be characterized by a condition on the Richardson number of the injected flow.

Mots-clefs :

jet impactant ; flux de gravité ; mesure de masse volumique

1 Introduction

Les écoulements à fortes variations de masse volumique sont omniprésents dans l'environnement et dans l'industrie, pouvant être décrits comme des jets, des panaches ou des bouffées. En milieu confiné (ou semi-confiné), la compréhension des phénomènes d'entraînement et de mélange générés par de tels écoulements peut s'avérer cruciale, notamment, lorsqu'il s'agit de panaches d'incendies en bâtiments ou en tunnels.

L'évolution avec l'altitude des caractéristiques d'un écoulement à fortes variations de masse volumique a été modélisée par de nombreux auteurs dont Morton *et al.* (1956), Morton (1959), Zukoski *et al.* (1980), Heskestad (1984) et Rooney *et al.* (1996). Ces auteurs définissent un coefficient d'entraînement de fluide ambiant qui est déterminé expérimentalement puis introduit dans un modèle intégral. Ce type de modélisation a été étendu au cas d'un écoulement impactant une paroi horizontale par Alpert (1975) et Heskestad *et al.* (1978), ou encore, confiné dans un canal par Delichatsios (1981).

Dans cet article, nous nous intéressons au cas du rejet continu d'un fluide de faible densité par un orifice circulaire dans une enceinte partiellement ouverte à l'atmosphère. Le fluide de

faible densité utilisé est un mélange gazeux constitué d'air et d'hélium. La dynamique d'un tel écoulement a été étudiée, entre autres, par Cetegen *et al.* (1996), Cetegen (1997), Yildirim *et al.* (2005) et Satti *et al.* (2006). Sous certaines conditions, des instabilités apparaissent à la base du jet conduisant à la formation puis l'éjection de tourbillons toroïdaux. Ces structures, qui sont aussi caractéristiques des panaches thermiques (Cetegen *et al.* (1993)), affectent de façon significative le mélange entre l'écoulement et le fluide ambiant.

L'objectif des travaux présentés dans cet article est d'étudier l'évolution de la masse volumique au point d'impact, au plafond de l'enceinte, en fonction de la masse volumique initiale du mélange d'air et d'hélium. Les essais ont été réalisés en faisant varier indépendamment le débit d'hélium injecté ainsi que le diamètre de l'orifice. Les mesures ainsi obtenues couvrent les gammes de nombres de Richardson initiaux 2×10^{-3} – 908 et de nombres de Reynolds initiaux 47– 22780. La première partie de l'article présente le dispositif expérimental utilisé ainsi que la procédure expérimentale adoptée. Les résultats expérimentaux sont ensuite présentés et discutés.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est présenté schématiquement par la Figure 1. L'air et l'hélium sont injectés dans un plénum de section $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$ et de 1 m de hauteur, pourvu d'un nid d'abeilles permettant de stabiliser l'écoulement et d'homogénéiser le mélange. Celui-ci débouche ensuite dans une enceinte horizontale de section $0.5 \times 0.25 \text{ m}^2$ et de 2.5 m de long par un orifice circulaire. Le jet résultant s'épanouit dans de l'air au repos, impacte le plafond de l'enceinte puis ses parois latérales pour, finalement, s'échapper à l'air libre à ses deux extrémités.

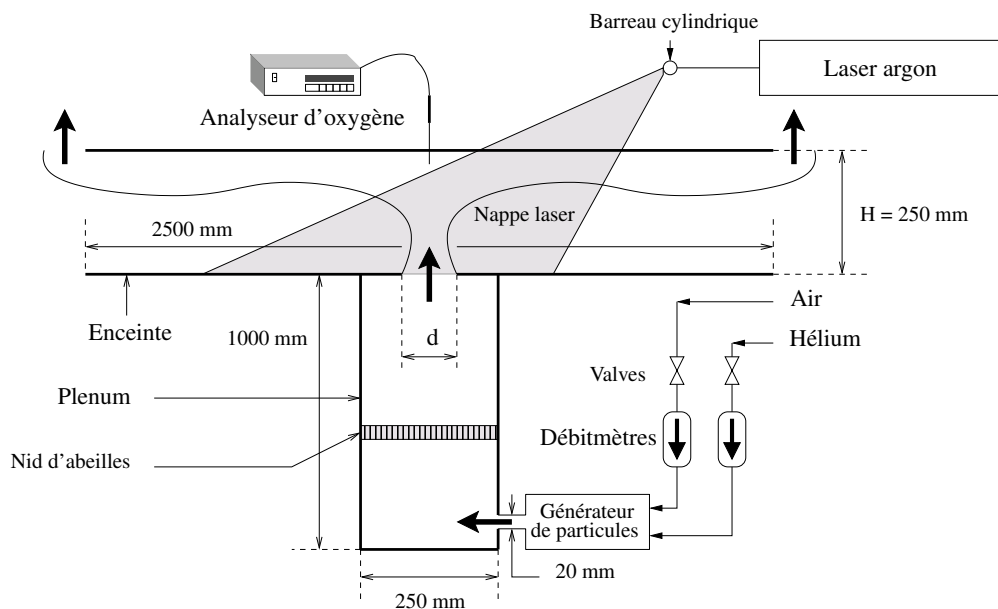


FIG. 1 – Schéma de principe du dispositif expérimental

Comme l'indique la Figure 1, les débits d'air et d'hélium sont contrôlés par des vannes et mesurés par deux débitmètres numériques (série E-7000, Bronkhorst High-Tech). Au point d'impact, la fraction volumique d'oxygène est mesurée par prélèvement continu à l'aide d'une sonde au zirconium (Analyseur de traces d'oxygène JC15V, Setnag). Les visualisations de l'écoulement sont réalisées par tomographie laser à l'aide d'un laser à argon (Beam Lok 2060

2W, Spectra-Physics). L'écoulement est ensemencé par des sels d'ammonium (générateur de particules) tandis qu'une nappe laser verticale est générée par un barreau cylindrique dans l'axe de l'enceinte.

Dans cette étude, les paramètres expérimentaux sont le diamètre de l'orifice, d , compris entre 30 et 111 mm, le débit d'hélium injecté, $(q_{he})_{inj}$, compris entre 28 et 443 l/min, et la masse volumique du mélange injecté, ρ_{inj} , comprise entre celle de l'hélium (ρ_{he}) et celle de l'air ambiant (ρ_{air}). Le débit d'hélium injecté est associé au flux de gravité de l'écoulement, B , qui peut s'exprimer comme suit, g étant l'accélération de la pesanteur ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$):

$$B = \frac{\rho_{air} - \rho_{he}}{\rho_{air}} g (q_{he})_{inj}$$

A partir de ces paramètres expérimentaux, on construit les paramètres adimensionnels suivants :

$$\phi = \frac{d}{H} \quad B^* = \frac{B}{g^{\frac{3}{2}} H^{\frac{5}{2}}} \quad \Delta_{inj} = \frac{\rho_{inj} - \rho_{he}}{\rho_{air} - \rho_{he}}$$

Les essais expérimentaux ont été conduits en faisant varier ces paramètres indépendamment les uns des autres, couvrant les gammes de nombres de Reynolds initiaux 47–22780, de nombres de Grashof initiaux 10^7 – 9×10^7 , et de nombres de Richardson initiaux 2×10^{-3} –908. Ces nombres adimensionnels sont définis comme suit :

$$Re_d = \frac{U_{inj} d}{\nu} \quad Gr_H = \frac{\rho_{air} - \rho_{inj} g H^3}{\rho_{air} \nu^2} \quad Ri = \frac{\rho_{air} - \rho}{\rho_{air}} \frac{g H}{U_{inj}^2} = \phi^2 \frac{Gr_H}{Re_d^2}$$

où ν et U_{inj} sont respectivement la viscosité cinématique et la vitesse débitante du mélange (définie comme étant le rapport entre le débit total injecté dans le plénum et la section de l'orifice).

3 Résultats et discussion

Pour chaque configuration d'écoulement combinant un flux de gravité et un diamètre d'orifice, nous avons fait varier la masse volumique initiale du mélange par ajout progressif d'air. L'ensemble des résultats expérimentaux ainsi obtenus est présenté par la Figure 2. L'écart adimensionnel de masse volumique Δ_{imp} est défini à partir de la masse volumique mesurée au point d'impact, ρ_{imp} , de la même façon que Δ_{inj} . La Figure 2 présente les évolutions de Δ_{imp} en fonction de Δ_{inj} pour chaque valeur du flux de gravité testé et pour un diamètre d'orifice donné. Il apparaît que, sous certaines conditions, la masse volumique mesurée au point d'impact peut décroître alors que celle du mélange injecté est augmentée. Des visualisations de l'écoulement obtenues pour un diamètre d'orifice et un flux de gravité donnés, $\phi = 0.256$ et $B^* = 4 \times 10^{-3}$, mettent en évidence que ce phénomène est lié à un changement de la morphologie de l'écoulement. En effet, en comparant les Figures 2 et 3, pour le cas $\phi = 0.256$ et $B^* = 4 \times 10^{-3}$, on remarque que lorsque le mélange contient peu d'air (Δ_{inj} faible), il s'échappe du plénum sous forme de bouffées (Figure 3) et la masse volumique mesurée au plafond décroît alors que celle du mélange injecté est augmentée (Figure 2). A l'inverse, lorsque le mélange contient davantage d'air (Δ_{inj} élevé), un écoulement de type jet est observé (Figure 3) et la masse volumique mesurée au plafond augmente avec celle du mélange injecté (Figure 2). Dans le premier cas, le mélange s'échappe du plénum à faible vitesse (Re_d faible), dominé par sa flottabilité (Ri élevé) tandis que dans le second cas, l'écoulement est davantage structuré, piloté à la fois par sa flottabilité et sa quantité de mouvement (Ri plus faible et Re_d plus élevé). On peut noter l'apparition des structures toroïdales en périphérie du jet pour $\Delta_{inj} = 0.4$ et 0.8 . Pour $\Delta_{inj} = 0.8$, l'écoulement devient pleinement turbulent ($Re_d = 2454$).

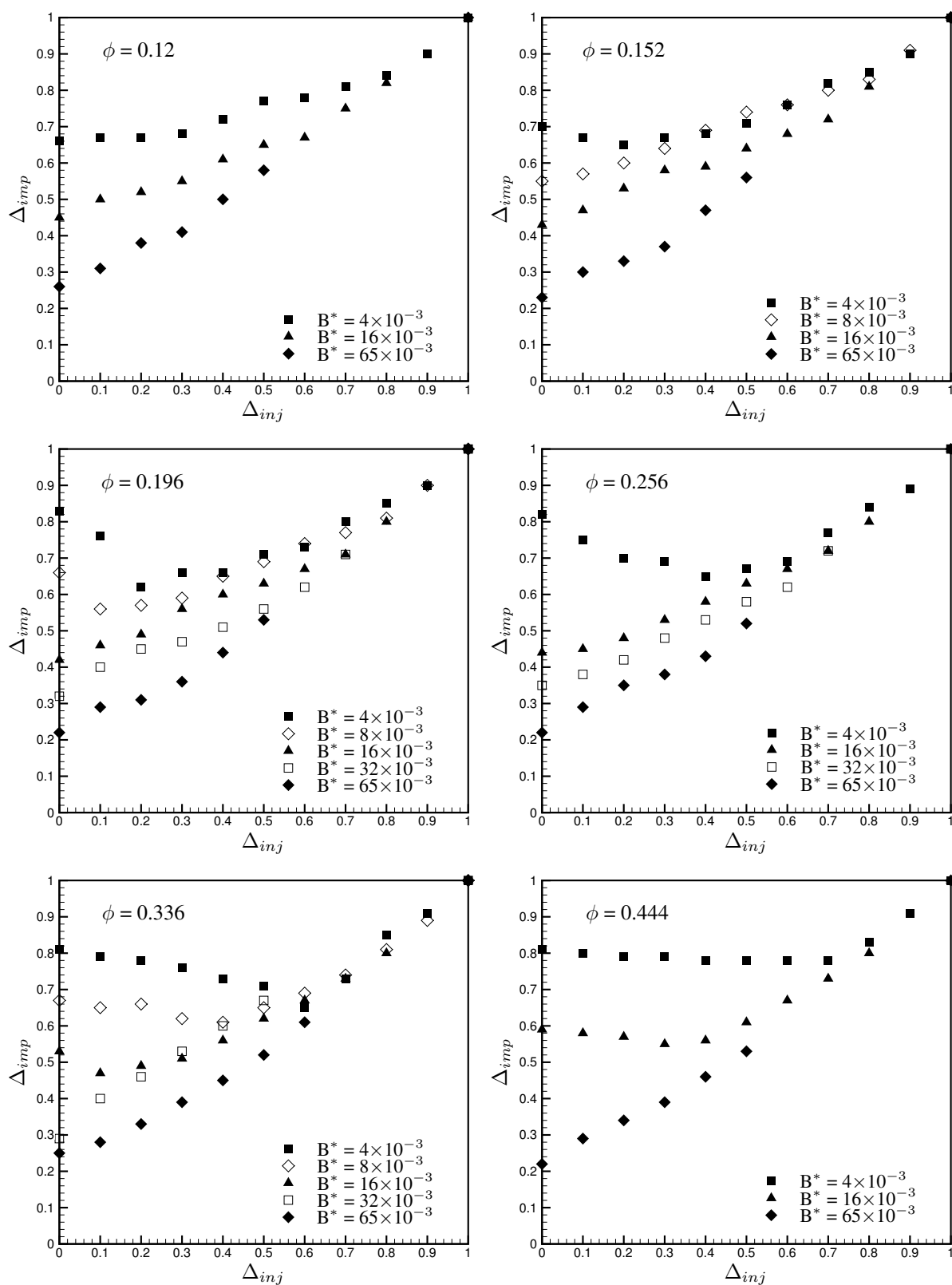


FIG. 2 – Evolutions de l'écart de masse volumique adimensionnel mesuré au plafond de l'enceinte en fonction de celui du mélange injecté pour différents diamètres d'orifice et flux de gravité

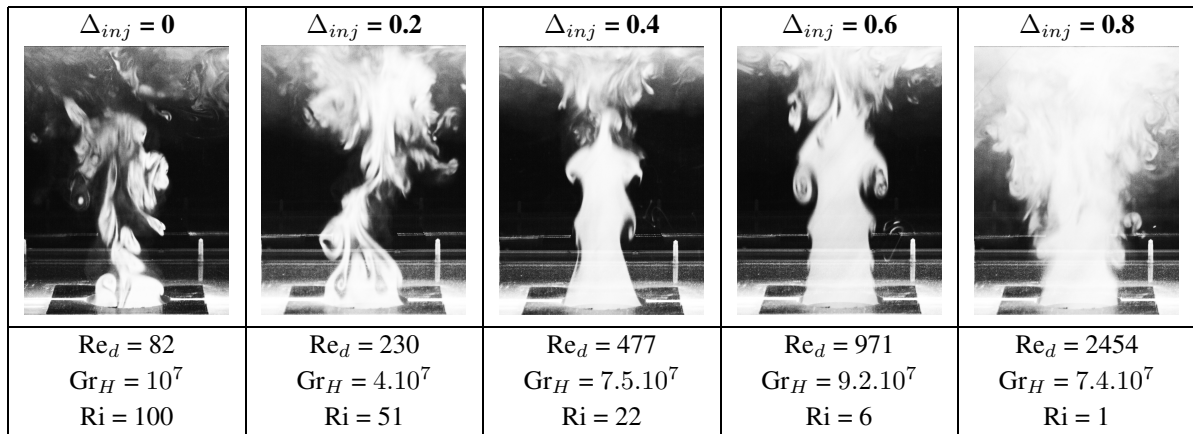


FIG. 3 – Images instantanées de l'écoulement obtenues en champ proche pour $\phi=0.256$ et $B^*=4 \times 10^{-3}$

L'analyse de l'ensemble des résultats expérimentaux a ensuite conduit à l'établissement d'un critère permettant de caractériser le domaine d'existence des deux types d'écoulement observés. Ces deux domaines apparaissent clairement sur la Figure 4 où les résultats expérimentaux sont représentés sous forme de nombres de Reynolds et de Grashof. Les symboles vides correspondent aux écoulements de type bouffées pour lesquels Δ_{imp} diminue lorsque Δ_{inj} augmente. A l'inverse, les symboles pleins correspondent aux écoulements de type jet pour lesquels Δ_{imp} augmente avec Δ_{inj} . La limite entre ces deux domaines est caractérisée de façon satisfaisante sur la Figure 4 par la relation entre ϕ , Gr_H et Re_d tracée en trait plein. Celle-ci peut se réduire à une relation entre le nombre de Richardson, Ri , et le diamètre d'orifice adimensionnel, ϕ :

$$\phi Gr_H = 50 Re_d^2 \quad \Rightarrow \quad Ri = 50\phi$$

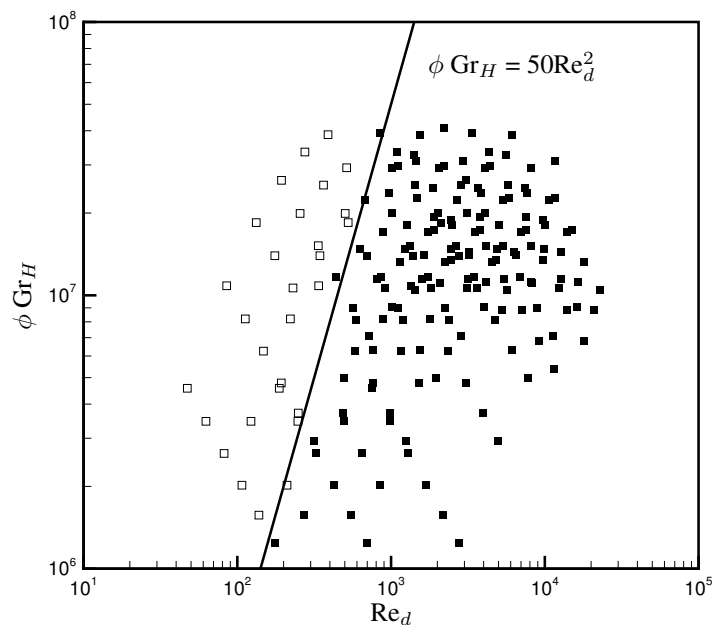


FIG. 4 – Limite des domaines d'existence des types d'écoulement observés. Symboles vides : bouffées ; symboles pleins : jet

4 Conclusions

Dans cet article, nous nous sommes intéressés au comportement d'un mélange d'air et d'hélium rejeté de façon continue par un orifice circulaire dans une enceinte partiellement ouverte à l'atmosphère. Nous avons étudié l'évolution de la masse volumique au point d'impact, au plafond de cette enceinte, en fonction de la masse volumique initiale du mélange. Les essais ont été réalisés en faisant varier indépendamment le débit d'hélium injecté ainsi que le diamètre de l'orifice. Les mesures ainsi obtenues, couvrant les gammes de nombres de Richardson initiaux 2×10^{-3} – 908 et de nombres de Reynolds initiaux 47– 22780, mettent en évidence que, sous certaines conditions, la masse volumique mesurée au plafond diminue alors que celle du mélange injecté est augmentée. Des visualisations de l'écoulement indiquent que ce phénomène est lié au caractère fortement instable de l'écoulement apparaissant sous forme de bouffées. L'analyse des résultats a ensuite conduit à la détermination d'un critère permettant de caractériser le domaine d'existence de ce type d'écoulement. Celui-ci relie le rapport $\phi = d/H$ (diamètre de l'orifice sur la hauteur de l'enceinte) au nombre de Richardson initial du mélange et s'écrit : $Ri > 50\phi$.

Références

- Alpert, R.L. 1975 Turbulent ceiling-jet induced by large-scale fires. *Combustion Science and Technology* **11** 197-213.
- Cetegen, B.M., Ahmed, T.A. 1993 Experiments on the periodic instability of buoyant plumes and pool fires. *Combustion and Flame* **93** 157-184.
- Cetegen, B.M., Kasper, K.D. 1996 Experiments on the oscillatory behavior of buoyant plumes of helium and helium-air mixtures. *Physics of Fluids* **8** 2974-2984.
- Cetegen, B.M. 1997 Behaviour of naturally unstable and periodically forced axisymmetric buoyant plumes of helium and helium-air mixtures. *Physics of Fluids* **9** 3742-3752.
- Delichatsios, M.A. 1981 The flow of fire gases under a beamed ceiling. *Combustion and Flame* **43** 1-10.
- Heskestad, G. 1984 Engineering relations for fire plumes. *Fire Safety Journal* **7** 25-32.
- Heskestad, G., Delichatsios, M.A. 1978 The initial convective flow in fire 17th *International Symposium on Combustion* 1113-1123, Combustion Institute, Pittsburg.
- Morton, B.R., Taylor G.I., Turner J.S. 1956 Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources *Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* **234**, **1196** 1-32, London.
- Morton B.R. 1959 Forced plumes. *Journal of Fluid Mechanics* **5** 151-163.
- Rooney G.G., Linden P.F. 1996 Similarity considerations for non-Boussinesq plumes in an unstratified environment. *Journal of Fluid Mechanics* **318** 237-250.
- Satti R.P., Agrawal A.K. 2006 Flow structure in the near-field of buoyant low-density gas jets. *Heat and Fluid Flow* **27** 336-347.
- Yildirim B.S., Agrawal A.K. 2005 Full-field measurements of self-excited oscillations in momentum-dominated helium jets. *Experiments in Fluids* **38** 161-173.
- Zukoski E.E., Kubota T., Cetegen B.M. 1980 Entrainment in fire plumes. *Fire Safety Journal* **3** 107-121.