

# Calcul du bruit d'un jet subsonique à nombre de Reynolds élevé par Simulation des Grandes Echelles

Christophe Bogey & Christophe Bailly

LMFA, UMR CNRS 5509 & Ecole Centrale de Lyon  
36, av. Guy de Collongue - 69134 Ecully  
<http://www.lmfa.ec-lyon.fr/autres/CAA/caaweb.html>  
[christophe.bogey@ec-lyon.fr](mailto:christophe.bogey@ec-lyon.fr)

## Résumé :

Un jet isotherme circulaire avec un nombre de Mach  $M = 0.9$  et un nombre de Reynolds  $Re_D = 4 \times 10^5$  est calculé par une Simulation des Grandes Echelles (SGE) compressible. Le champ aérodynamique et le rayonnement sonore obtenu directement à partir de la SGE sont en bon accord avec les données expérimentales. En particulier, les spectres et les fonctions de corrélation azimutale des fluctuations de pression acoustique correspondent bien au nombre de Reynolds élevé du jet.

## Abstract :

An isothermal circular jet with a Mach number of  $M = 0.9$  and a Reynolds number of  $Re_D = 4 \times 10^5$  is computed by a compressible Large Eddy Simulation (LES). The flow and the sound field obtained directly from the LES are in good agreement with the corresponding measurements of the literature. The acoustic radiation displays also spectra and azimuthal correlation functions which behave as expected for a high Reynolds number jet.

## Mots-clefs :

jet ; aéroacoustique ; simulation des grandes échelles (SGE)

## 1 Introduction

Le calcul direct du bruit consiste à déterminer le champ acoustique produit par un écoulement turbulent directement à partir de la résolution des équations de Navier-Stokes compressibles instationnaires. Cette méthode doit pouvoir s'appliquer aux écoulements réalistes, à nombres de Reynolds élevés, grâce aux Simulations des Grandes Echelles (SGE) dans lesquelles seules les structures turbulentes plus grandes que la taille des mailles sont résolues. Les premiers calculs directs du bruit de jet par SGE ont été effectués sur des écoulements à nombres de Reynolds modérés et ont permis de montrer la faisabilité de la méthode, comme dans Bogey *et al.* (2000). Si l'on souhaite maintenant étudier les différents mécanismes physiques à l'origine du bruit de jet, il est nécessaire de considérer des jets à nombres de Reynolds élevés.

Un jet subsonique circulaire avec un nombre de Mach  $M = u_j/c_0$  de 0.9 et un nombre de Reynolds  $Re_D = u_j D/\nu$  de  $4 \times 10^5$  a ainsi été simulé sur un maillage suffisamment étendu afin d'obtenir directement son champ acoustique rayonné. L'objectif de ce travail est de déterminer par SGE des champs aérodynamiques et acoustiques en accord avec les données expérimentales obtenues pour des jets similaires en nombres de Mach et de Reynolds. Pour s'assurer de la précision de la résolution, la SGE est réalisée à l'aide d'un solveur utilisant des méthodes numériques possédant des propriétés proches de celles des méthodes spectrales. Un filtrage sélectif est en particulier appliqué pour représenter les effets dissipatifs des échelles turbulentes non résolues, ceci afin que la SGE préserve le nombre de Reynolds du jet.

Dans cet article sont présentées les principales caractéristiques de l'écoulement moyen et turbulent, ainsi que celles du champ sonore. Elles sont comparées aux mesures de la littérature pour valider la démarche SGE suivie. Les modifications en fonction de l'angle d'observation du champ acoustique en terme de contenu spectral ou de corrélation azimutale sont étudiées avec soin car elles sont caractéristiques du nombre de Reynolds effectif du jet. Pour une analyse plus complète des résultats de la SGE, nous invitons le lecteur à lire dans Bogey & Bailly (2002c).

## 2 Paramètres de la simulation

La SGE est effectuée à l'aide d'un solveur des équations de Navier-Stokes, ALESIA, développé pour le calcul direct du bruit. L'algorithme numérique utilise des schémas numériques peu dispersifs et peu dissipatifs, qui calculent avec précision les perturbations jusqu'à quatre points par longueur d'onde, cf. Bogey & Bailly (2002a). Les conditions aux limites sont non-réfléchissantes et combinent une formulation en champ lointain des ondes sonores et une zone éponge en sortie d'écoulement. Elles sont décrites dans Bogey & Bailly (2002b). Les effets des petites structures non résolues par le maillage sont pris en compte par un filtrage sélectif qui ne dissipe que les ondes discrétisées par moins de quatre points. Un tel modèle de sous-maille n'affecte pas les structures bien calculées par la SGE, à l'inverse des modèles basés sur une hypothèse de viscosité turbulente.

Le profil de vitesse en entrée du domaine de calcul est défini par une tangente hyperbolique. Il est excité en ajoutant des fluctuations de vitesse aléatoires de faible amplitude afin d'obtenir un développement aérodynamique naturel du jet. Le maillage est composé de 12 millions de points et le calcul se déroule sur une longue période  $T$  telle que  $Tu_j/D = 1/St = 1010$ , sur 45000 itérations, et nécessite 90 heures sur un ordinateur Nec SX-5.

## 3 Champs instantanés

Les champs de vorticités et de pression fluctuante fournis par la SGE sont présentés sur la figure 1 dans deux sections longitudinale et transversale. Le champ de vorticités illustre le développement aérodynamique du jet vers un état pleinement turbulent. Il présente des structures tourbillonnaires de tailles très disparates, dont une turbulence fine attendue pour un nombre de Reynolds élevé. La fin du cône potentiel, région où les couches cisailées fusionnent, est observée vers  $x = 10r_0$ .

Le champ de pression montre que le rayonnement acoustique produit par le jet est bien calculé directement par la SGE, et qu'il n'est pas contaminé par des réflexions aux limites du domaine de calcul. Le rayonnement sonore semble provenir principalement de la région située à la fin du cône potentiel, en accord avec les observations expérimentales. La structure du champ acoustique est également présentée, en particulier sur la coupe transverse.

## 4 Développement aérodynamique du jet

La figure 2 présente le développement du champ moyen de vitesse. Des lignes de courant sont représentées en pointillés. Elles illustrent l'entraînement de fluide dans le jet, comme il est décrit par Ricou & Spalding (1961). Elles montrent que les conditions aux limites permettent l'entrée de fluide dans le domaine de calcul, et sont adaptées à la simulation du jet.

Les propriétés des champs de vitesse moyenne et turbulente ont alors été étudiées en détail. La figure 3(a) présente le profil axial de la vitesse sur l'axe  $u_c$ . Ce profil est en très bon accord

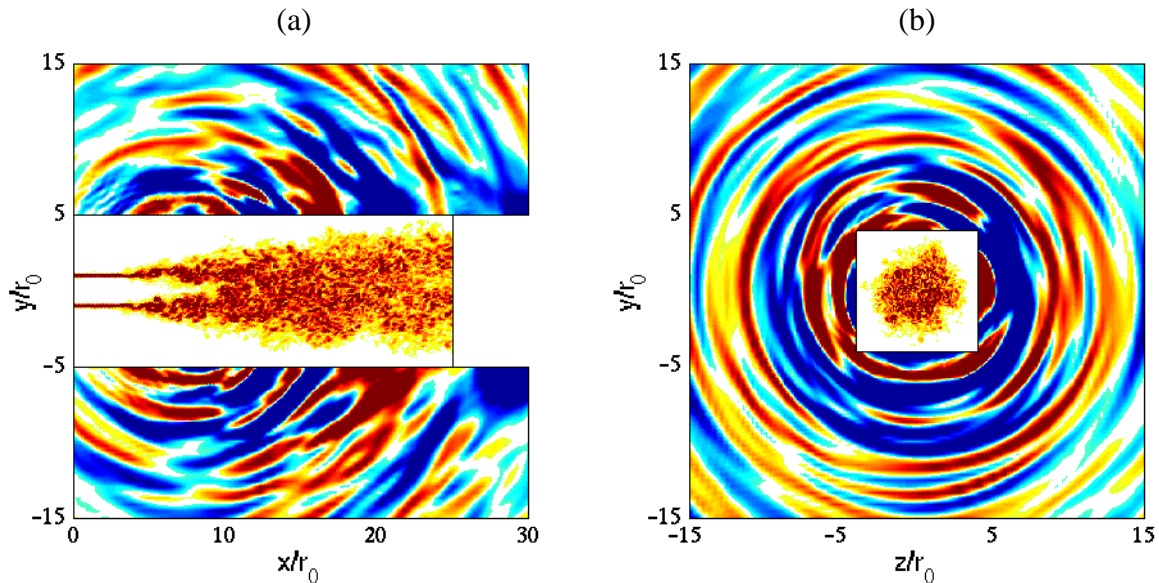


FIG. 1 – Vues instantanées de la vorticité  $|\omega|$  dans l'écoulement et de la pression fluctuante  $p'$  en dehors : (a) dans le plan  $z = 0$ , (b) dans le plan  $x = 11r_0$ . Les échelles de couleur vont de 0 à  $8 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  pour la vorticité et de  $-70$  à  $70 \text{ Pa}$  pour la pression.

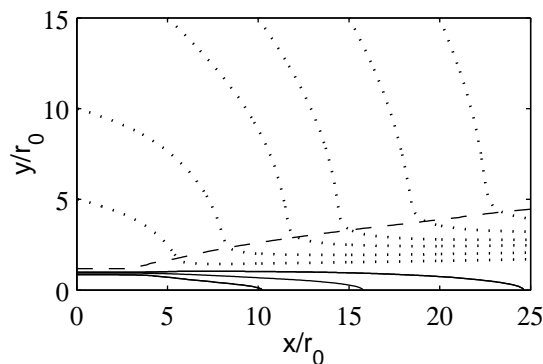


FIG. 2 – Représentation du champ de vitesse moyen : — iso-contours associés à des vitesses axiales de  $0.55u_j$ ,  $0.75u_j$  et  $0.95u_j$ , - - - iso-contour associé à  $0.03u_c$ , ( $u_c$  est la vitesse moyenne sur l'axe), ..... lignes de courants.

avec les mesures de Lau *et al.* (1979) pour un jet similaire.

Le profil sur l'axe de l'amplitude des fluctuations de vitesse axiale est présenté sur la figure 3(b). Ce profil atteint une valeur maximale vers  $x = 14r_0$ , dans la région de transition vers une turbulence pleinement développée située après le cône potentiel. Il se compare favorablement à deux profils expérimentaux obtenus récemment par PIV pour des jets à Mach 0.9 et à nombres de Reynolds élevés. D'autres validations de l'écoulement, notamment l'évolution des échelles intégrales de longueur, sont reportées dans Bogey & Bailly (2002c).

## 5 Rayonnement acoustique du jet

Les spectres de pression acoustique calculés aux points d'observation situés en  $(x = 29r_0, r = 12r_0)$ ,  $(x = 29r_0, r = 15r_0)$ ,  $(x = 20r_0, r = 15r_0)$  et  $(x = 11r_0, r = 15r_0)$  sont présentés sur la figure 4(a). Ces points sont repérés par des angles par rapport à la direction aval du jet, l'origine étant prise à la fin du cône potentiel, de  $\theta \simeq 30^\circ$ ,  $\theta \simeq 40^\circ$ ,  $\theta \simeq 60^\circ$  et

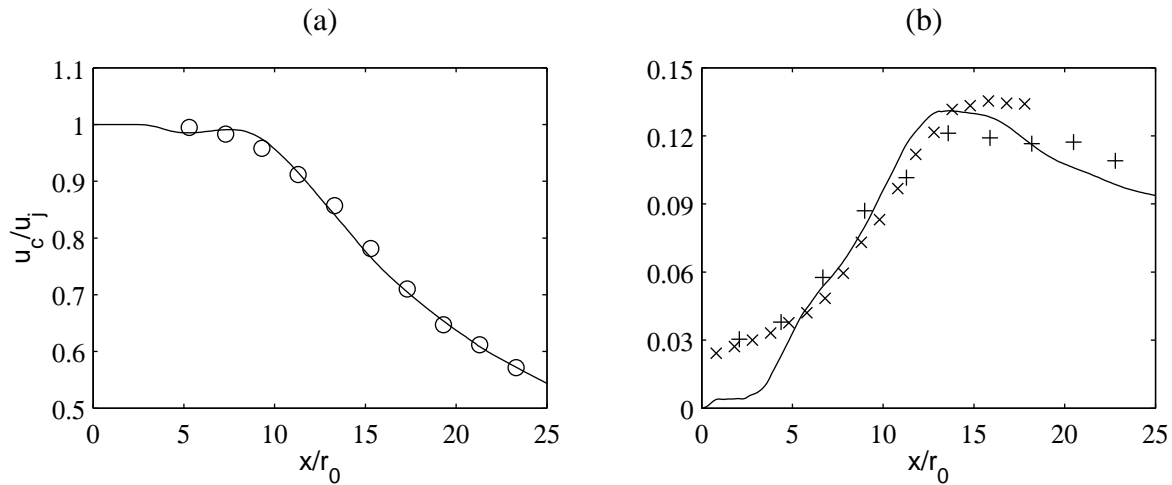


FIG. 3 – (a) Profil de la vitesse moyenne sur l'axe  $u_c/u_j$ .  $\circ$  mesures de Lau *et al.* (1979) ( $M = 0.9$ ,  $Re_D = 10^6$ ). (b) Profil de l'amplitude des fluctuations de vitesse  $\langle u'u' \rangle^{1/2}/u_j$  sur l'axe.  $\times$  mesures de Jordan *et al.* (2002) ( $M = 0.9$ ,  $Re_D = 10^6$ ),  $+$  de Arakeri *et al.* (2002) ( $M = 0.9$ ,  $Re_D = 5 \times 10^5$ ). Les mesures sont translatées dans la direction axiale pour prendre en compte les différentes longueurs de cônes potentiels.

$\theta \simeq 90^\circ$ , respectivement. L'évolution de leur forme en fonction de l'angle d'observation est conforme aux observations expérimentales de Lush (1971) sur des jets à nombre de Reynolds élevé. Le spectre pour  $\theta \simeq 30^\circ$  est dominé par un pic à Strouhal  $St \simeq 0.3$ . Il est comparé à un spectre expérimental obtenu en champ lointain sur la figure 4(b), et un bon accord entre les deux spectres est constaté. Le spectre pour  $\theta \simeq 90^\circ$  est nettement plus large bande et marqué vers les hautes fréquences. Il correspond bien aux spectres acoustiques de jets à nombre de Reynolds élevé pour des grands angles d'observation.

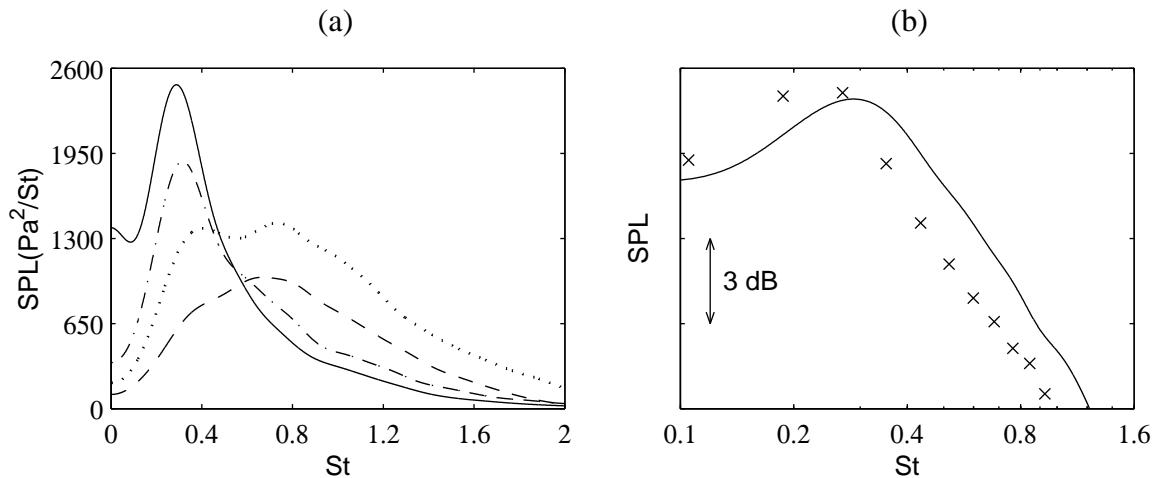


FIG. 4 – (a) Spectres de pression, en échelles linéaires, en fonction du nombre de Strouhal  $St = fD/u_j$  pour : —  $x = 29r_0$  et  $r = 12r_0$  ( $\theta \simeq 30^\circ$ ), - - -  $x = 29r_0$  et  $r = 15r_0$  ( $\theta \simeq 40^\circ$ ), .....  $x = 20r_0$  et  $r = 15r_0$  ( $\theta \simeq 60^\circ$ ), - · - ·  $x = 11r_0$  et  $r = 15r_0$  ( $\theta \simeq 90^\circ$ ). (b) Spectre de pression, en échelles logarithmiques, pour  $\theta \simeq 30^\circ$ .  $\times$  mesures de Jordan *et al.* (2002) ( $M = 0.9$ ,  $Re_D = 10^6$ , pour  $\theta = 30^\circ$  et à 60 rayons de la buse), ajustées en amplitude pour la comparaison.

Pour caractériser la structure du rayonnement sonore, les fonctions de corrélation azimutale des fluctuations de pression acoustique sont calculées aux points d'observation définis

précédemment Elles sont présentées sur la figure 5(a). De la même façon que pour les spectres, elles diffèrent en fonction de l'angle d'observation. La corrélation azimutale du rayonnement acoustique est élevée pour les petits angles mais faible pour des grands angles. Les fonctions de corrélation pour  $\theta \simeq 30^\circ$  et  $\theta \simeq 90^\circ$  se comparent également favorablement aux mesures correspondantes de Maestrello (1976) sur la figure 5(b). Ces résultats montrent que les deux sources de bruit fréquemment admises dans les jets subsoniques à nombre de Reynolds élevé, la première associée aux structures cohérentes de l'écoulement, dominant dans la direction aval, et la seconde associée à la turbulence fine, principalement observée en amont, sont bien calculées par la présente SGE.

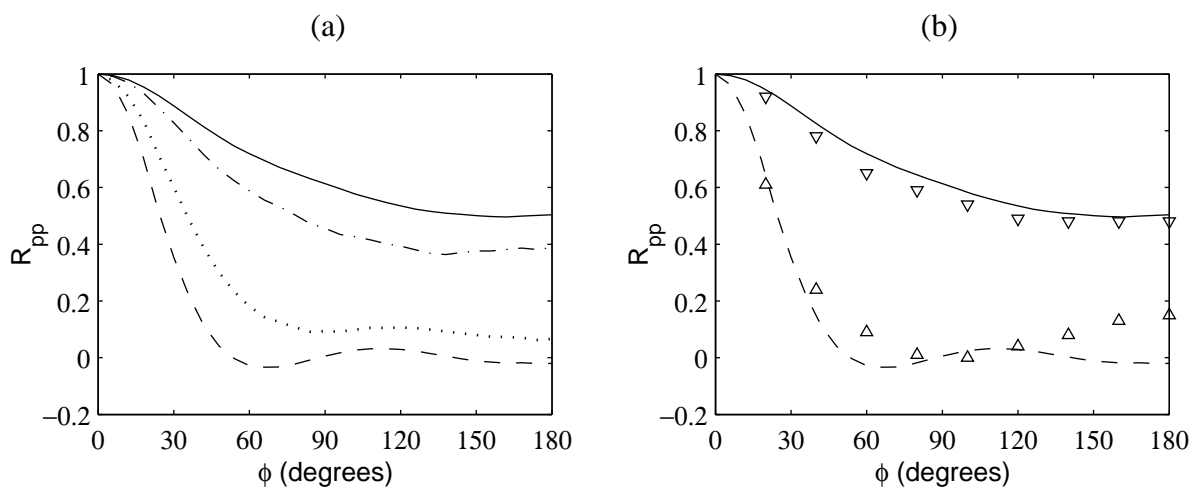


FIG. 5 – (a) Fonctions de corrélation azimutale des fluctuations de pression pour : —  $\theta \simeq 30^\circ$ , - ·  $\theta \simeq 40^\circ$ , ·····  $\theta \simeq 60^\circ$ , - - -  $\theta \simeq 90^\circ$ . (b) Comparaisons avec les mesures de Maestrello (1976) ( $M = 0.85$ ,  $Re_D = 5.1 \times 10^5$ ) pour :  $\nabla$   $\theta \simeq 30^\circ$ ,  $\triangle$   $\theta \simeq 90^\circ$

Les niveaux sonores en champ acoustique proche ont été également calculés, et sont reportés dans Bogey & Bailly (2002c). Une comparaison simple avec les mesures a été réalisée pour  $\theta \simeq 30^\circ$ . Les niveaux pour un tel angle sont en bon accord avec les données fournies par Mollo-Christensen *et al.* (1964), Lush (1971) ou encore Tanna (1977).

## 6 Conclusion et perspectives

La présente SGE constitue une première étape dans l'étude des mécanismes de génération de bruit dans un jet subsonique circulaire à nombre de Reynolds élevé. Les champs aérodynamiques et acoustiques ont été comparés avec succès aux mesures, et montrent que le nombre de Reynolds effectif du jet calculé correspond bien au nombre de Reynolds  $Re_D = u_j D / \nu$  de l'écoulement. L'utilisation d'un filtrage sélectif pour prendre en compte les effets des structures non résolues par le maillage permet ainsi de réaliser des SGE à nombre de Reynolds élevé. Cette simulation préliminaire s'est poursuivie par l'étude de l'influence des conditions initiales du jet, et des effets des différents modèles de sous-maille sur le développement aérodynamique de l'écoulement et son rayonnement sonore. Ces travaux sont présentés dans Bogey & Bailly (2003a) et Bogey & Bailly (2003b), respectivement.

## Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien du projet de recherche européen JEAN (Jet Exhaust Aerodynamics and Noise) (Contract No. G4RD-CT-2000-00313). Les calculs ont été effectués sur un Nec SX-5 de l'Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique (IDRIS-CNRS).

## Références

- Arakeri, V.H., Krothapalli, A., Siddavaram, V., Alkislar, M.B. & Lourenco, L. 2002 Turbulence suppression in the noise producing region of a Mach=0.9 jet. In Proceedings of the *8th AIAA/CEAS AeroAcoustics Conference*, AIAA Paper 2002-2523.
- Bogey, C., Bailly, C. & Juvé, D. 2000 Noise investigation of a high subsonic, moderate Reynolds number jet using a compressible LES. To appear in *Theoret. Comput. Fluid Dynamics*. See also in Proceedings of the *6th AIAA/CEAS AeroAcoustics Conference*, AIAA Paper 2000-2009.
- Bogey, C. & Bailly, C. 2002a A family of low dispersive and low dissipative explicit schemes for computing the aerodynamic noise. In Proceedings of the *8th AIAA/CEAS AeroAcoustics Conference*, AIAA Paper 2002-2509.
- Bogey, C. & Bailly, C. 2002b Three-dimensional non reflective boundary conditions for acoustic simulations : far-field formulation and validation test cases. *Acta Acustica* **88**(4), 463–471.
- Bogey, C. & Bailly, C. 2002c Direct computation of the sound radiated by a high Reynolds number, subsonic round jet. In Proceedings of the *CEAS Workshop From CFD to CAA*, 7-8 Nov., Athens, Greece.
- Bogey, C. & Bailly, C. 2003a LES of a high Reynolds, high subsonic jet : effects of the inflow conditions on flow and noise. In Proceedings of the *9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*.
- Bogey, C. & Bailly, C. 2003b LES of a high Reynolds, high subsonic jet : effects of the subgrid modelings on flow and noise. In Proceedings of the *16th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference*.
- Jordan, P., Gervais, Y., Valière, J.-C. & Foulon, H. 2002 PIV measurements of a Mach 0.9 jet *Personnal communication*.
- Lau, J.C., Morris, P.J. & Fisher, M.J. 1979 Measurements in subsonic and supersonic free jets using a laser velocimeter. *J. Fluid Mech.* **93**(1), 1–27.
- Lush, P.A. 1971 Measurements of subsonic jet noise and comparison with theory. *J. Fluid Mech.* **46**(3), 477–500.
- Maestrello, L. 1976 Two points correlations of sound pressure in the far field of a jet : Experiment, Nasa Report NASA-TMX-72835.
- Mollo-Christensen, E., Kolpin, M.A. & Martucelli, J.R. 1964 Experiments on jet flows and jet noise far-field spectra and directivity patterns. *J. Fluid Mech.* **18**, 285–301.
- Ricou, F.P. & Spalding, D.B. 1961 Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets. *J. Fluid Mech.* **11**, 21–32.
- Tanna, H.K. 1977 An experimental study of jet noise. Part I : Turbulent mixing noise. *J. Sound Vib.* **50**(3), 405–428.