



**HAL**  
open science

# Mesure acoustique de vitesse Lagrangienne dans un jet d'air turbulent

Philippe Gervais, Yves Gagne, Christophe Baudet

► **To cite this version:**

Philippe Gervais, Yves Gagne, Christophe Baudet. Mesure acoustique de vitesse Lagrangienne dans un jet d'air turbulent. 17e Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-00200089

**HAL Id: hal-00200089**

**<https://hal.science/hal-00200089v1>**

Submitted on 29 Sep 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Mesure acoustique de vitesse lagrangienne dans un jet d'air turbulent

Philippe Gervais, Yves Gagne, Christophe Baudet

Laboratoire des Écoulements Géophysiques et industriels  
B.P. 53 38041 Grenoble Cedex 9  
pgervais@hmg.inpg.fr

## Résumé :

*La mesure des vitesses des particules fluides est d'une importance tout aussi pratique que théorique (dispersion, mélange, modélisation de la turbulence, etc.). Ce n'est que récemment que la technique a permis d'envisager des mesures lagrangiennes directes. Nous présentons un nouveau système acoustique permettant d'obtenir les trois composantes de vitesse de particules fluides dans un jet d'air turbulent. Nous confirmons des résultats déjà établis dans des écoulements fermés comme l'existence du phénomène d'intermittence lagrangien. De plus, l'existence d'une intercorrélation significative entre composantes longitudinales de la vitesse lagrangienne et de la vitesse eulérienne a été démontrée.*

## Abstract :

*Measurement of fluid particles trajectories is of crucial interest for practical as well as theoretical purposes (dispersion, mixing, turbulence modeling, etc.). Direct lagrangian measurement have been feasible only very recently, for technical reasons. We present a new acoustical setup giving access to the full tridimensionnal trajectory of fluid particles in a turbulent air jet. Some previously obtained results have been confirmed, such as the lagrangian intermittency phenomenon. Significant cross-correlation between longitudinal component of lagrangian and eulerian velocities have also been evidenced.*

## Mots-clefs :

**acoustique ; lagrangien ; turbulence**

## 1 Introduction

Les années passées ont vu un regain d'intérêt pour les descriptions lagrangiennes de la turbulence. L'étude des trajectoires des particules fluides est d'une importance essentielle pour la compréhension des phénomènes de dispersion et de mélange, ainsi que d'aspects plus fondamentaux de la turbulence. Bien que plusieurs expériences aient déjà été réalisées [1] [2], la mesure de trajectoires lagrangiennes dans un écoulement réel reste un défi expérimental. Jusqu'à présent, aucune expérience n'est parvenue à fournir de trajectoire avec une dynamique spatio-temporelle suffisante pour englober largement à la fois l'échelle intégrale et celle de Kolmogorov. Toutes ont été effectuées dans des écoulements fermés. Nous présentons une nouvelle méthode de mesure dans un jet d'air turbulent, s'appuyant sur l'effet Doppler acoustique. Elle nous permet de remonter à la trajectoire tridimensionnelle de particules isolées.

## 2 Mesures

Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 1. Un jet d'air est obtenu par un écoulement sortant d'une buse de 2,25 cm à 50 m/s. Au-delà de 30 diamètres de buse (70 cm) en aval, l'écoulement est pleinement turbulent, et les profils de vitesse à différentes distances de la buse

sont autosimilaires jusqu'à l'ordre deux. Ce comportement est bien établi expérimentalement [3] [4] [5], et servira de cas test pour la validation du système de mesure.

De petites (2 mm) bulles de savon gonflées à l'hélium dont la densité est très voisine de celle de l'air sont injectées dans l'écoulement. Grâce à leur petite taille et leur absence d'inertie, elles se comportent comme des traceurs lagrangiens, suivant précisément la trajectoire de la particule fluide dont elles occupent le volume. Le tube d'injection de bulles est situé en amont de la partie convergente de la buse de la soufflerie, afin d'ensemencer l'écoulement sans le perturber. La dispersion des tailles est très faible (moins de cinq pour cent).

Malgré leur très faible diamètre, les bulles diffusent fortement les ondes sonores, ce qui permet d'employer des méthodes de vélocimétrie acoustique Doppler. Pour être capable de mesurer les trois composantes de vitesse, plusieurs mesures doivent être réalisées simultanément. Pour cela, quatre transducteurs dont les axes sont placés selon les arêtes d'une pyramide sont utilisés. Deux ondes planes monochromatiques, de fréquences différentes (voisines de 100 kHz) sont générées par deux émetteurs distincts. Les deux récepteurs reçoivent chacun les deux ondes sonores diffusées autour des deux fréquences incidentes. Pour peu que la séparation fréquentielle soit suffisante, un simple filtrage passe-bande suffit à séparer les deux ondes diffusées. Le décalage fréquentiel instantané est directement proportionnel à la projection de la vitesse de la bulle selon le vecteur d'onde de diffusion. Quatre projections de la vitesse instantanée sont donc obtenues. Les vecteurs unitaires correspondant  $(i, j, k, l)$  sont représentés sur la figure 1. L'exploitation de la redondance lors du passage au repère cartésien  $(x, y, z)$  permet de réduire le bruit.

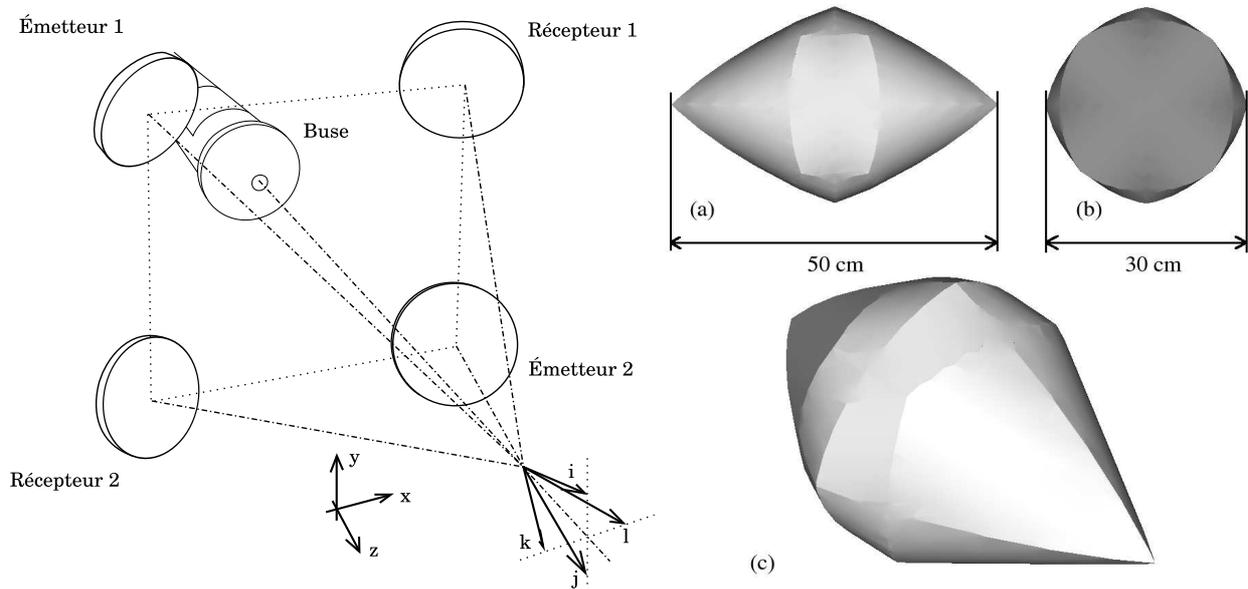


FIG. 1 – Dispositif expérimental (à gauche) et allure du volume de mesure (à droite). (a) vue de profil (b) vue de face (c) vue en perspective. L'axe du jet est selon la plus grande direction du volume.

Pour pouvoir extraire des informations pertinentes, le système doit disposer d'une dynamique spatiale suffisante (idéalement, depuis l'échelle de Kolmogorov jusqu'à l'échelle intégrale de l'écoulement). La distance maximum sur laquelle les bulles peuvent être suivies est principalement déterminée par la taille des transducteurs. Avec un diamètre de capteur de 28 cm, la plus grande trajectoire enregistrable est de l'ordre de 50 cm, ce qui est plus grand que l'échelle

intégrale de l'écoulement (environ 10 cm). Plus précisément, la zone dans laquelle la vitesse des bulles peut être mesurée est l'intersection des quatre faisceaux acoustiques. Vu les distances entre les transducteurs et le croisement de leur axes, les faisceaux peuvent être approximés par des cylindres [6]. La forme obtenue est présentée sur la droite de la figure 1.

La distance mesurable la plus petite est limitée par la taille des bulles. Avec un diamètre de 2 mm, ce qui est légèrement plus petit que l'échelle de Taylor, (de 3 mm à 9 mm, selon la distance à la buse), la dynamique couvre une bonne partie des échelles inertielles de la turbulence.

### 3 Traitement du signal

Le signal de pression diffusée enregistré par les récepteurs est composé de bouffées d'énergies, une par bulle (une seule bulle est présente dans la zone de mesure à un moment donné). Ces bouffées peuvent être modélisées par des sinusoïdes modulées en fréquence, dont la fréquence instantanée est proportionnelle à la vitesse de la bulle. En notant  $\nu$  la fréquence de l'onde incidente, le décalage fréquentiel  $\Delta\nu$  et l'angle de diffusion  $\theta$ , la vitesse de la bulle projetée sur le vecteur d'onde de diffusion est donné par :

$$V = -\frac{\Delta\nu}{\nu} \frac{c}{2 \cos(\theta/2)}, \quad (1)$$

où  $c$  est la vitesse du son. Une fois les quatre projections de vitesse calculées à partir des décalages fréquentiels, une simple opération matricielle permet de se replacer dans un repère cartésien.

Le processus de traitement du signal est donc divisé en trois étapes : détection des zones de forte énergie ; démodulation FM ; changement de repère.

Grâce au rapport signal sur bruit relativement élevé, la première étape se fait avec un simple seuillage sur l'amplitude. Pour obtenir des intervalles de temps corrects, il est néanmoins nécessaire d'éliminer les très courts intervalles et de fusionner ceux qui sont trop proches.

La démodulation FM est la partie la plus délicate du processus. À cause de la nature très aléatoire du vecteur vitesse sous-jacent, les signaux sont particulièrement non stationnaires. Il est donc nécessaire d'avoir recours à des méthodes temps-fréquence à haute résolution. L'algorithme de démodulation est fondé sur la transformation de Choi-Williams. À chaque pas de temps, la fréquence correspondant au maximum d'énergie est déterminée. Pour réduire les effets de quantification en fréquence, la fréquence instantanée est calculée comme une moyenne pondérée par l'énergie au cube, dans un petit voisinage.

Un certain nombre de tests purement numériques ont été effectués pour déterminer les performances de l'algorithme, nous en présentons deux. Un bruit blanc gaussien filtré passe-bas (représentant le signal de vitesse) a été utilisé pour synthétiser un signal modulé en fréquence (représentant le signal acoustique), qui a servi de signal de test. Un autre bruit blanc gaussien, indépendant du signal, a été ajouté pour vérifier la robustesse à la présence de bruit.

Une des quantités intéressantes en turbulence, que l'estimateur devra décrire correctement est la densité de probabilité. La gauche de la figure 2 présente en superposition la densité de probabilité du signal d'origine, et celle obtenue à l'issue du traitement. Les valeurs situées au-dessous de  $-3300$  Hz et au-delà de  $-400$  Hz sont filtrées avant toute autre opération (ceci est imposé pour les signaux réels par des contraintes expérimentales, le test numérique a été fait sur un processus de traitement le plus proche possible). À l'intérieur de cet intervalle de fréquence, la superposition des deux courbes est satisfaisante, à l'exception d'une oscillation, visible sur l'estimation. C'est un reste de l'échantillonnage en fréquence de la transformée de

Choi-Williams, qui n'a pas été complètement éliminé par l'interpolation. La variation du niveau de bruit ne change pas notablement les résultats.

La densité spectrale de puissance est représentée sur la droite de la figure 2. Pour les fréquences les plus basses, l'estimation est encore une fois bonne, et des écarts ne commencent à apparaître que pour des fréquences supérieures à 200 Hz. La réponse de la bulle est estimée à 100 Hz, l'estimation ne posera donc pas de problèmes.

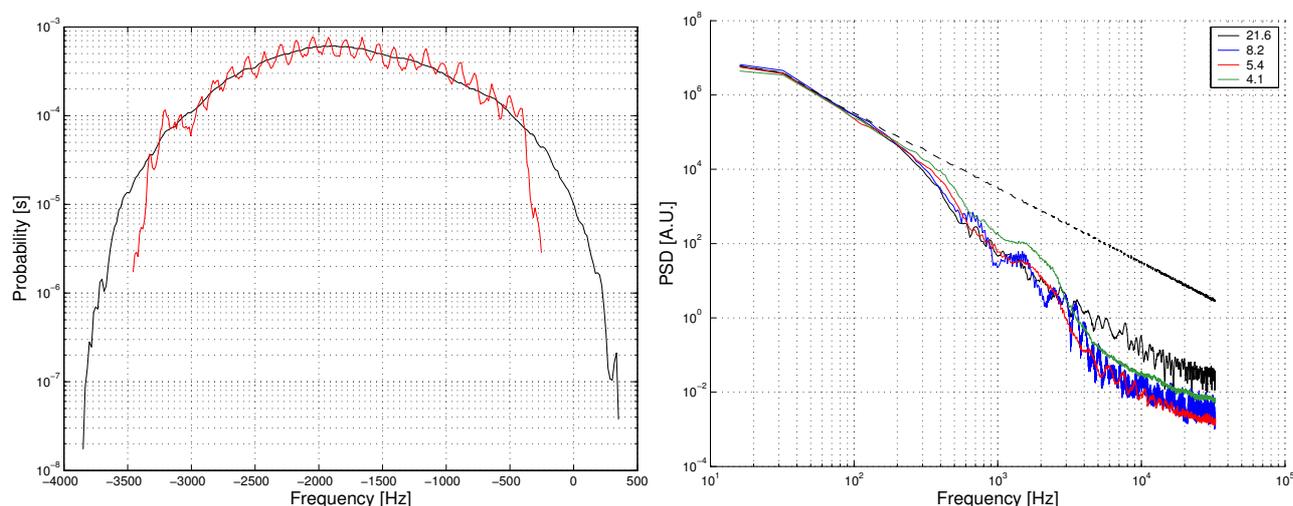


FIG. 2 – Gauche : densité de probabilité de vitesse, idéale et estimée. L'estimation présente des oscillations. Droite : Densité spectrale de puissance idéales (tiretés) et estimées, pour différents rapports signal sur bruit (encadré).

#### 4 Résultats expérimentaux

Les mesures ont été faites sur l'axe du jet à quatre distances différentes de la buse : 1,3 m, 1,8 m, 2,1 m et 2,5 m, qui correspondent à quatre échelles intégrales différentes pour un nombre de Reynolds fixé. Chaque jeu de données comporte quelques milliers de passages de bulles, d'une durée comprise entre 0,05 ms et 0,12 ms en moyenne, selon la position.

Les densités de probabilité pour la vitesse longitudinale sont présentées sur la gauche de la figure 3. Toutes les courbes (traits pleins) présentent une forme remarquablement gaussienne (traits tiretés), à l'exception des extrémités, où l'effet du filtrage se fait sentir. C'est également vrai pour les composantes transverses (non présentées ici). La normalisation de l'échelle horizontale par la distance à la buse permet de superposer les quatre courbes (figure 3, droite) et ainsi de retrouver le caractère autosimilaire du jet.

De façon évidente, nos mesures (figure 3) indiquent que les densités de probabilité lagrangiennes sont gaussiennes. L'expérience [1] réalisé en écoulement confiné l'avait également montré. En ce sens, la théorie qui prédit que les densités de probabilités eulérienne et lagrangienne sont identiques semble être valide même dans un écoulement inhomogène. Néanmoins, certains écarts persistent. Le taux de turbulence calculé à partir des mesures lagrangiennes (28 %) est indépendant de la distance à la buse, et légèrement supérieur à celui obtenu à partir des mesures eulériennes (25 %). Seule la forme de la densité est donc préservée.

L'intermittence en turbulence est classiquement mise en évidence à l'aide de la densité de probabilité des incréments de vitesse  $\delta V_i(\tau) = V_i(t + \tau) - V_i(t)$ , où  $i$  est parmi  $x, y, z$ . Les

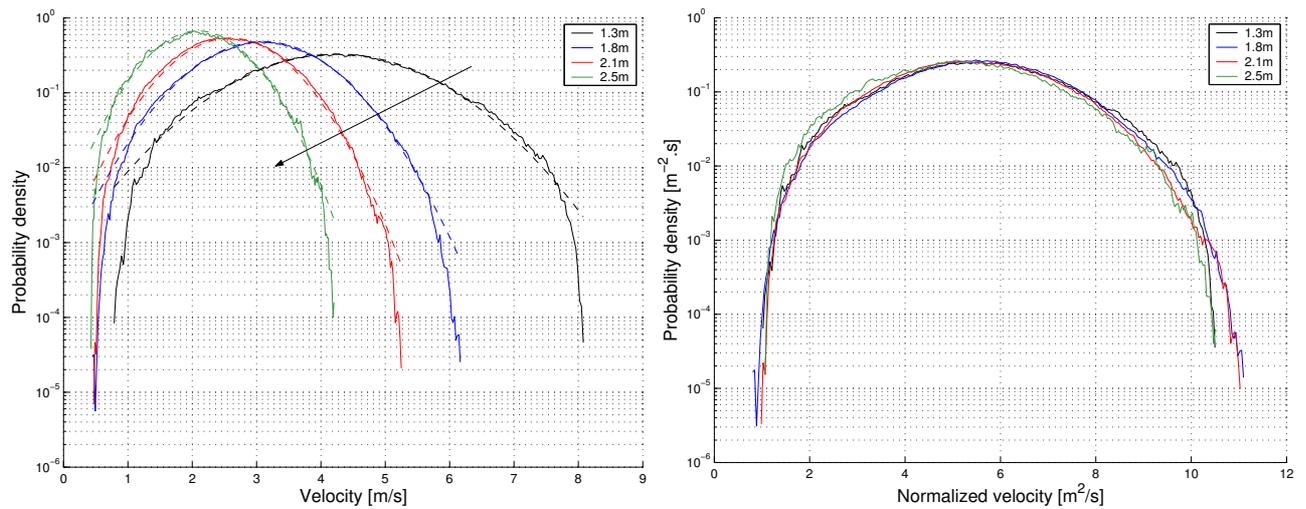


FIG. 3 – À gauche : densité de probabilité expérimentale de la vitesse lagrangienne longitudinale. Les gaussiennes de même moyenne et variance sont tracées en tireté. La distance à la buse augmente dans le sens de la flèche. À droite : les mêmes courbes, normalisées par la distance à la buse.

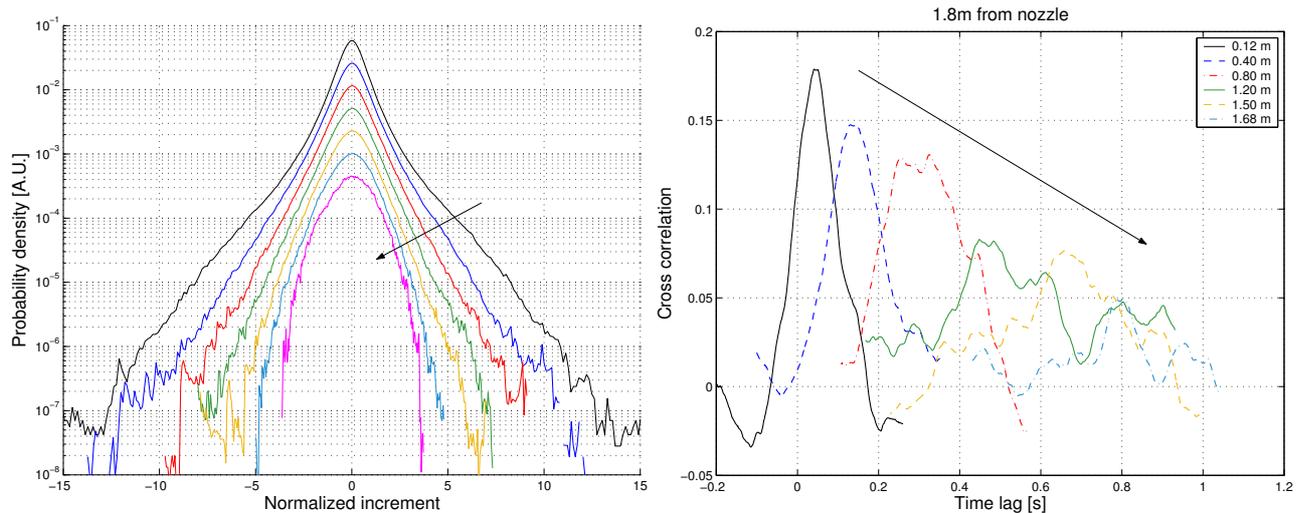


FIG. 4 – Gauche : Densité de probabilité des incréments de vitesse pour différentes séparations temporelles. Chaque courbe est de variance unité, et a été décalée verticalement pour la lisibilité. La séparation temporelle augmente dans le sens de la flèche. Droite : intercorrélations des composantes longitudinales lagrangienne et eulérienne pour différentes distances entre le fil chaud et le centre du volume de mesure.

densités de probabilité correspondantes sont présentées sur la gauche de la figure 4, où chaque courbe a été normalisée à la variance unité. Un changement de forme est clairement visible lorsque la séparation temporelle  $\tau$  change. Pour les grandes valeurs de  $\tau$ , la densité de probabilité a une forme raisonnablement gaussienne (les petits écarts étant dus à des problèmes de convergence), alors que pour des  $\tau$  petits, des queues exponentielles apparaissent. Le même calcul appliqué aux composantes transverses donne le même résultat.

La présence d'un écoulement moyen dans le jet rend possible la mesure simultanée de vi-

tesses eulériennes et lagrangiennes. En plaçant un fil chaud en aval de la zone de mesure acoustique, aucune perturbation due au sillage du fil n'est à craindre. Il a également été vérifié que les transducteurs étaient placés suffisamment loin de l'axe du jet, et qu'ils ne créaient pas de sillage décelable par le fil. L'intercorrélation normalisée entre la composante longitudinale lagrangienne et la vitesse eulérienne a été calculée, pour différentes positions du fil chaud. Les résultats sont montrés sur la droite de la figure 4. Pour des distances de séparation très faibles, la courbe présente un maximum marqué avec une valeur de 0,18. Lorsque la distance augmente, le maximum se déplace et sa valeur diminue, jusqu'à zéro pour des séparation de l'ordre d'un mètre cinquante, ce qui correspond à un temps de vol d'une seconde. Parallèlement, la courbe s'élargit. Le décalage temporel correspondant à la position du maximum multiplié par la vitesse moyenne donne précisément la distance de séparation entre le centre de la zone de mesure et la sonde à fil chaud. À l'exception des distances de séparation très faibles, les courbes ont une allure très voisine de celles obtenues en corrélant deux vitesses *eulériennes*. Il faut cependant noter qu'aucune corrélation n'existe entre les composantes lagrangiennes *transverses* et la vitesse eulérienne *longitudinale*.

## 5 Conclusion

L'étude lagrangienne d'un écoulement de jet turbulent a permis de mettre en évidence des distributions de vitesse gaussiennes, sur toutes les composantes. Des inter-corrélations significatives entre composantes de vitesse longitudinales lagrangienne et eulérienne semblent indiquer l'existence d'un processus commun, autocorrélé à très long temps. Cette étude est en cours de réalisation. Elle permettra également de comprendre pourquoi les composantes transverses lagrangiennes ne sont pas intercorrélées avec la composante longitudinale eulérienne.

## Références

- [1] Nicolas Mordant. *Mesure lagrangienne en turbulence : mise en œuvre et analyse*. PhD thesis, E.N.S. de Lyon, 2001.
- [2] Greg Voth, Arthur la Porta, Alice Crawford, Jim Alexander, and Eberhard Bodenschatz. Measurement of particle accelerations in fully developed turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 469 :121–160, 2002.
- [3] Stephen B. Pope. *Turbulent flows*. Cambridge University Press, 2000.
- [4] I. Wygnanski and H. Fiedler. Some measurements in the self-preserving jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 38(3) :577–612, 1969.
- [5] Hussein J. Hussein, Steven P. Capp, and William K. George. Velocity measurements in a high-reynolds-number momentum-conserving, axisymmetric, turbulent jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 258 :31–75, 1994.
- [6] Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, and James V. Sanders. *Fundamentals of acoustics*. John Wiley and Sons, 2000.