



**HAL**  
open science

## Etude des sources aéroacoustiques dans un jet supersonique chaud par Vélocimétrie Laser Doppler deux points une composante

G. Lalizel, Véronique Moriniere, Yves Gervais, Patrick Braud, L. Philippon,  
H. Foulon, C. Auclercq

► **To cite this version:**

G. Lalizel, Véronique Moriniere, Yves Gervais, Patrick Braud, L. Philippon, et al.. Etude des sources aéroacoustiques dans un jet supersonique chaud par Vélocimétrie Laser Doppler deux points une composante. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03360374

**HAL Id: hal-03360374**

**<https://hal.science/hal-03360374>**

Submitted on 30 Sep 2021

**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.

## Etude des sources aéroacoustiques dans un jet supersonique chaud par Vélocimétrie Laser Doppler deux points une composante

G. Lalizel\*, V. Morinière\*, Y. Gervais\*, P. Braud\*, L. Philippon\*, H. Foulon\*\*, C. Auclercq\*\*

\*Laboratoire d'Études Aérodynamiques Bâtiment K, 40 avenue du Recteur Pineau 86022 Poitiers Cedex

\*\*Centre Etudes Aérodynamiques et Thermiques, Banc MARTEL, 43 rue de l'aérodrome 86036 Poitiers  
veronique.moriniere@lea.univ-poitiers.fr

### Résumé :

*Pour un écoulement libre, une approche d'estimation de bruit consiste à relier la dynamique de la turbulence de l'écoulement au champ acoustique via des analogies aéroacoustiques. La prédiction de bruit par cette approche nécessite une connaissance rigoureuse des corrélations turbulentes afin d'identifier et représenter les sources aéroacoustiques par l'intermédiaire de grandeurs statistiques. Ce papier présente une étude expérimentale des sources aéroacoustiques dans un jet supersonique chaud ( $M = 2,8$  et  $T_i = 1900K$ ) à partir de la mesure des corrélations turbulentes par Vélocimétrie Laser Doppler à une composante en deux points. Les résultats montrent que le taux d'expansion de la couche de mélange augmente plus rapidement avec la distance à la sortie de la tuyère que dans un jet supersonique froid. Les structures turbulentes sont de plus grandes dimensions dans les couches de mélange. Les modèles analytiques des corrélations turbulentes d'ordre 2 sont enfin discutés.*

### Abstract :

*In free turbulent flow, an estimation of the noise is obtained relying the dynamic of the flow turbulence to the acoustic field via the acoustic analogies. The prediction of sound by this approach needs the knowledge of the turbulent correlations to identify and simulate the acoustic sources by statistic quantities. This paper presents an experimental study of aeroacoustic sources in a supersonic hot jet ( $M = 2,8$  and  $T_i = 1900K$ ) by the measurement of the turbulent correlations with Laser Doppler Velocimetry one component and two points. The results show that the expansion of the mixing layer increases more rapidly than in a supersonic cold jet. The turbulent structures have greater dimensions in the mixing layers. Then, the analytical models of the two order turbulent correlations are discussed.*

### Mots-clefs :

**Aéroacoustique ; Jet supersonique ; Vélocimétrie Laser Doppler**

### 1 Introduction

Pour un écoulement libre quelconque, une approche d'estimation de bruit consiste à relier la dynamique de la turbulence de l'écoulement au champ acoustique via des analogies aéroacoustiques. La prédiction du bruit par cette approche est basée sur une connaissance rigoureuse des corrélations temporelles en deux points des fluctuations de la vitesse. En raison des difficultés techniques et de la dynamique de l'écoulement, très peu de données expérimentales sont disponibles concernant les jets supersoniques chauds. De ce fait, la connaissance du champ turbulent reste insuffisante dans ces écoulements. Les travaux présentés proposent une étude expérimentale des sources aéroacoustiques dans un jet supersonique chaud à partir de la mesure des corrélations turbulentes. L'originalité de ces travaux réside en particulier dans l'utilisation de la Vélocimétrie Laser Doppler à une composante en deux points dans un jet supersonique chaud en condition d'adaptation.

Dans une première partie, le dispositif expérimental est présenté, suivi d'une discussion sur les composantes aérodynamiques des champs moyen et turbulent. Par la suite, les caractéristiques statistiques des sources aéroacoustiques sont présentées. Enfin, une discussion

est proposée sur l'efficacité des sources acoustiques dans un jet supersonique chaud et sur les modèles analytiques des corrélations de moment de vitesse d'ordre 2.

## 2 Dispositif expérimental

La campagne d'essais a été réalisée sur le banc MARTEL du CEAT de Poitiers. Le jet est issu d'une tuyère de diamètre de sortie  $D$  égal à 50 mm et permet d'obtenir un jet parfaitement détendu pour les conditions génératrices de pression ( $P_i=30$  bars) et de température ( $T_i=1900$ K). Ainsi, la vitesse du jet en sortie de la tuyère  $U_j$  est égale à 1700 m/s et la température  $T_j$  est égale à 860K. Ces hautes températures sont obtenues par une combustion à deux étages d'air et d'hydrogène. Les corrélations spatio-temporelles des vitesses longitudinales ont été mesurées par Vélocimétrie Doppler Laser en deux points de l'espace (Fig. 1).

Le dispositif de Vélocimétrie Doppler Laser est constitué de deux chaînes de mesures optiques de type DANTEC fonctionnant en diffusion avant. La source est un laser Argon ionisé de puissance 10 watts émettant à la fois dans le bleu (488 nm) et dans le vert (514,5 nm). Les deux volumes de mesures sont caractérisés par une lentille d'émission de longueur focale égale à 1 m et une focale de réception de 0,5 m. Les volumes sondes ont ainsi une dimension de 0,4 mm dans la direction de l'écoulement et de 22,9 mm dans la direction transversale. La position initiale en cohérence spatiale des deux volumes sondes est considérée optimale pour un coefficient de corrélation supérieur à 0,9.

L'ensemencement du jet et de son environnement extérieur est réalisé avec de la poudre de  $\text{SiO}_2$ . L'acquisition d'un point de mesure est réalisée avec 100000 points sur chacune des deux voies à une fréquence d'acquisition moyenne supérieure à 15 kHz. Pour déterminer la corrélation spatiale des fluctuations de vitesse en deux points distincts, les signaux sont échantillonnés en des temps irréguliers, simultanément sur les deux voies. Une fenêtre temporelle de coïncidence est alors préconisée mais au détriment de la résolution temporelle. Le taux de validation de la mesure est toujours supérieur à 70%. Les corrélations spatio-temporelles sont ensuite calculées par la méthode de classification par cases développée par Nobach *et al* (1998) et validée par Simon *et al* (2005).

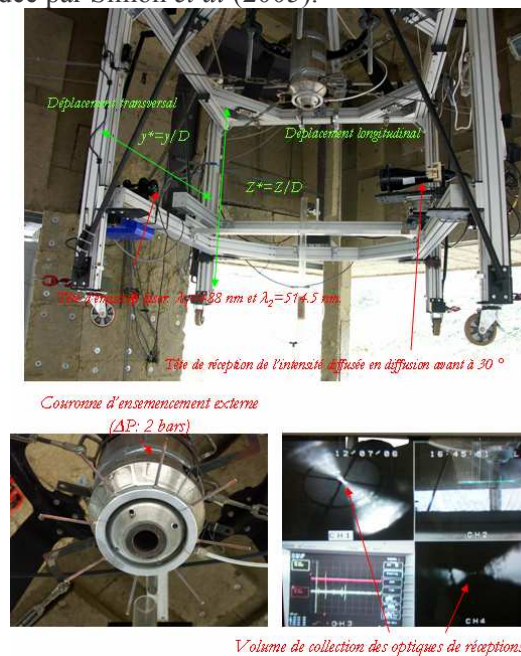


Fig. 1 : Dispositif expérimental de la mesure des corrélations de vitesse sur le banc MARTEL.

### 3 Composantes aérodynamiques : champs moyen et turbulent.

Les profils de vitesse moyenne des composantes longitudinale et radiale pour chaque section du jet présentent un développement auto-similaire le long de la région du cône potentiel. A partir de ces résultats, la longueur du cône potentiel est estimée à  $10 D$  et la couche de mélange présente un degré d'expansion  $\alpha$  voisin de  $6,4^\circ$ . La couche de mélange présente un taux de croissance 20% supérieur à celui mesuré par Kerhervé (2004) dans un jet supersonique chaud non parfaitement détendu.

L'amplitude très faible de la composante radiale de la vitesse ( $V < 0,03 U_j$ ), quelque soit la position radiale, indique que l'écoulement moyen est clairement dominé par la composante longitudinale. Les valeurs négatives de la vitesse radiale indiquent un écoulement orienté vers l'intérieur du jet avec une valeur minimale sur l'axe de la couche de mélange.

La superposition des profils radiaux des composantes longitudinale et radiale des fluctuations de vitesses montre aussi un caractère d'auto-similarité (Fig. 2). Dans la région du cône potentiel, le niveau des fluctuations RMS  $u'^2$  est relativement faible mais augmente fortement dans la partie interne de la couche de mélange pour atteindre un maximum sur l'axe de la couche de mélange de l'ordre de  $0,165 U_j$ . Le maximum RMS de la composante radiale des contraintes de Reynolds est localisé sur l'axe de la couche de mélange et varie entre  $0,06$  et  $0,08 U_j$ .

Ces résultats indiquent que la contribution à l'énergie cinétique turbulente totale, et par conséquent aux mécanismes de génération de bruit, de la composante longitudinale de la vitesse est plus importante que celle de la composante radiale. Les mécanismes de production d'énergie turbulente sont en effet plus importants dans la direction principale de l'écoulement, direction dans laquelle l'énergie est principalement transportée. Dans le cône potentiel et au-delà de la couche de mélange, les niveaux de turbulence de la composante radiale sont très faibles ( $0,02 - 0,03 U_j$ ) indiquant une turbulence résiduelle de faible énergie. On note un fort niveau de turbulence pour  $Z^* = 14$  dans la région intérieur du jet indiquant une forte production d'énergie dans la région de transition située au-delà du cône potentiel.

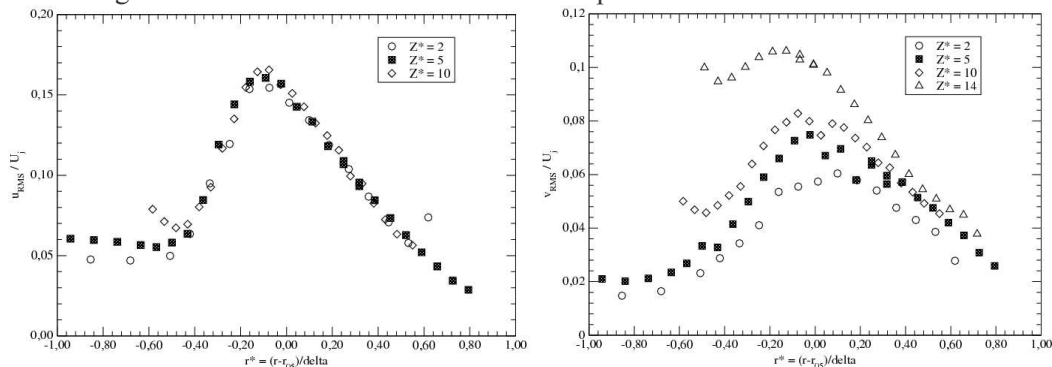


Fig. 2 – Profils radiaux des composantes longitudinale (gauche) et radiale (droite) des contraintes de Reynolds.

### 4 Caractéristiques statistiques des sources aéroacoustiques

La description du champ turbulent à partir d'échelles spatiales et temporelles, caractéristiques des différents mécanismes d'échange, de dissipation et de conversion de l'énergie cinétique turbulente, revient indirectement à décrire les mécanismes sources du rayonnement sonore. Nous nous intéressons ici seulement aux corrélations de vitesses d'ordre 2 caractéristiques du bruit de cisaillement.

Les fonctions de corrélation s'écrivent pour les corrélations d'ordre 2 :

$$r_{ij}(y, \eta, \tau) = \frac{u'_i(y, \tau)u'_j(y + \eta, \tau)}{\sqrt{u'^2_i} \sqrt{u'^2_j}}$$

Un exemple typique de ces fonctions de corrélation est présenté sur la figure 3.

L'échelle intégrale de longueur de la composante de vitesse  $i$  dans la direction  $j$  s'écrit :

$$L_{ij} = \int_0^{+\infty} r_{ii}(y, \eta_j, 0) d\eta_j$$

Dans la pratique, l'intégration de la fonction de corrélation a été limitée à la valeur 0,1, celle-ci ne s'annulant pas.

Deux échelles intégrales de temps sont obtenues selon que l'on adopte la représentation dans le repère fixe ou dans le repère mobile. Pour prendre en compte l'aspect convectif du champ turbulent, c'est-à-dire obtenir le temps de renouvellement  $\tau_\xi$ , il est nécessaire de travailler dans le repère dit mobile. En revanche, le temps intégral  $\tau_\eta$  est estimé à partir de la fonction de corrélation temporelle obtenue dans le repère fixe, il représente le temps de renouvellement local perçu par un observateur fixe par rapport à l'écoulement. Ces deux échelles sont définies comme suit :

$$\tau_\eta = \int_0^{+\infty} r_{ii}(y, 0, \tau) d\tau \quad \tau_\xi = \int_0^{+\infty} r_{ii}(y, U_c \tau, \tau) d\tau$$

Les résultats montrent que l'échelle de longueur tend à augmenter linéairement avec la distance à la sortie de la tuyère mais plus rapidement que dans un jet supersonique froid (Kerhervé, (2004)). Cette évolution indique la formation de structures turbulentes de dimensions plus importantes dans un jet supersonique chaud. Du point de vue de l'organisation spatiale du champ turbulent, celui-ci est bien organisé sur des étendues spatiales d'autant plus importantes que l'on s'éloigne de la sortie de la tuyère. On retrouve le rapport  $L_{12} = L_{11} / 5$  entre les deux échelles longitudinale et transversale.

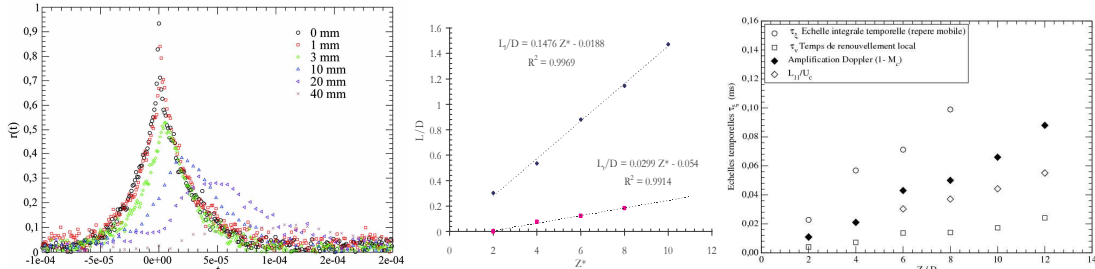


Fig. 3 : Exemple de fonction de corrélation en deux points (gauche), évolution des échelles intégrales de longueur (centre) et de temps sur l'axe de la couche de mélange (droite).

Les résultats montrent une évolution quasi-linéaire pour les deux échelles de temps  $\tau_\xi$  et  $\tau_\eta$ . Un taux de croissance plus important est observé pour l'échelle intégrale temporelle dans le repère mobile. La croissance linéaire des ces échelles est représentative de la durée de vie croissante des structures turbulentes qui s'étalent sur des distances d'autant plus grandes qu'elles sont convectées dans l'écoulement. Le rapport  $L_{11} / D$  donne une bonne estimation de l'échelle temporelle  $\tau_\eta$  et non de l'échelle intégrale temporelle  $\tau_\xi$ . Le long de l'axe de la couche de mélange, la vitesse de convection est relativement proche de la vitesse de l'écoulement moyen pour  $Z^* < 10$ . Ceci montre que l'hypothèse de Taylor est bien confirmée sur l'axe de la couche de mélange en régime supersonique dans la région autour du cône potentiel.

A partir des évolutions spatiales et temporelles des corrélations des vitesses longitudinales, les vitesses de convections (moyennées sur toutes les échelles) des structures turbulentes de la couche de mélange ont été déterminées. Les valeurs initiales en  $Z^* = 2$  approchent 0,65, augmentent ensuite en fonction de  $Z^*$  jusqu'à la fin du cœur potentiel pour atteindre une valeur proche de l'unité. On observe très peu de différences entre les évolutions dans la couche de mélange en  $r_{07}$  et  $r_{05}$ , contrairement aux valeurs mesurées en  $r_{03}$  qui sont inférieures. Les positions radiales  $r_{07}$ ,  $r_{05}$  et  $r_{03}$  sont telles que la vitesse moyenne longitudinale est égale à  $0,7U_j$ ,  $0,5U_j$  et  $0,3U_j$  respectivement. Ceci est indicatif des effets de cisaillement qui se traduisent par un étirement du champ turbulent du côté du cône potentiel alors qu'il semble être retenu du côté extérieur.

## 5. Discussions

Rares sont les informations concernant l'efficacité acoustique des sources, en particulier en régime supersonique. Or, lorsque le spectre d'intensité acoustique est formulé à partir des corrélations spatiales et temporelles du terme source de Lighthill, des hypothèses importantes sont posées quant à l'efficacité acoustique des sources et à l'organisation spatio-temporelle de l'écoulement.

### 5.1 Compacité des sources acoustiques

L'efficacité acoustique d'une source peut être quantifiée en terme de compacité lorsque sa dimension spatiale  $l$  et la pulsation caractéristique  $\omega$  du rayonnement qu'elle émet sont connues. A partir de la définition du degré de compacité  $Q_c$  donnée par Lighthill (1952), Kerhervé (2004) propose de l'écrire comme suit :  $Q_c = \frac{2\pi l_{11}}{c\tau_\xi}$ . Bien qu'une faible dispersion des résultats soit

observée, le degré de compacité semble suivre une tendance similaire quelque soit la distance à la sortie de la tuyère (Tab. 1). Il n'est pas étonnant de retrouver un maximum du facteur de compacité dans la région interne et sur l'axe de la couche de mélange où sont localisées les échelles turbulentes de plus grandes dimensions. Plus cette dimension de la source est grande devant la longueur d'onde rayonnée (proportionnelle au temps caractéristique  $\tau_\xi$ ) plus la source est acoustiquement efficace. Ces valeurs indiquent une efficacité acoustique plus grande dans les jets supersoniques chauds (Lighthill, (1963) et Kerhervé (2004)).

	$Z^* = 2$	$Z^* = 4$	$Z^* = 6$	$Z^* = 8$	$Z^* = 10$	$Z^* = 12$
$r_{05}$	6,78	5,55	6,71	6,49	6,76	6,69
$r_{03}$	5,72	4,68	5,39	6,23	5,74	6,06
$r_{07}$	6,65	7,37	8,24	6,36	8,96	7,47

Tab. 1 : Degré de compacité des sources acoustiques.

### 5.2 Modélisation des corrélations turbulentes

Des mesures expérimentales telles que celles réalisées ici ne permettent pas à elles seules de reconstruire directement le champ acoustique rayonné. En revanche, si un modèle semi-empirique peut être établi, alors l'estimation du champ sonore est possible.

Le modèle gaussien (Ribner, (1964)) de la décroissance spatiale et le modèle de Kerhervé (2004) est comparé aux fonctions de corrélation spatiales obtenues expérimentalement (Fig.4). La tendance générale est une surestimation de ces fonctions quelque soit la position dans la couche de mélange. Les écarts observés entre les données expérimentales et les modèles de

décroissance peuvent s'expliquer par la non prise en compte des effets de tridimensionnalité et d'anisotropie qui sont importants en écoulement supersonique chaud.

La même comparaison est effectuée avec les modèles de décroissance temporelle (Fig. 4). Les modèles gaussien et en cosinus hyperbolique sous-estiment les données expérimentales. Ces modèles ne traduisent pas la forte décroissance pour de faibles temps de retards.

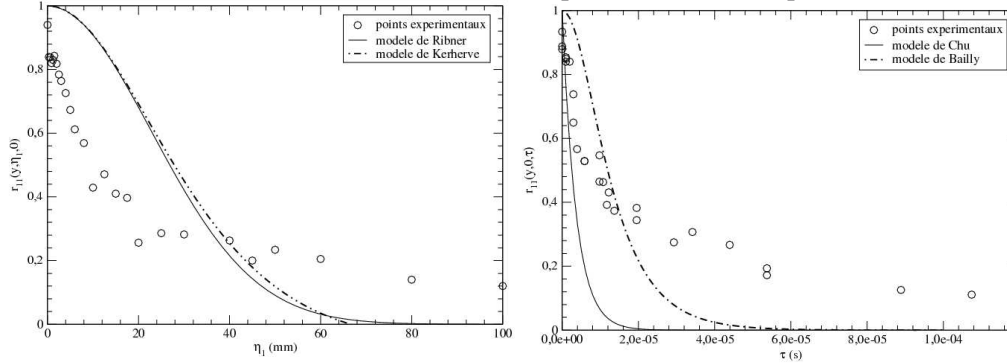


Fig. 4 : Comparaison des résultats expérimentaux et des modèles de décroissance spatiale (gauche) et temporelle (droite) sur l'axe de la couche de mélange à  $Z^* = 4$ .

## 6. Conclusions

Les travaux expérimentaux présentés montrent que l'organisation spatio-temporelle de l'écoulement d'un jet supersonique chaud est différente de celle d'un écoulement non chauffé. En effet, le taux d'expansion de la couche de mélange est supérieur ainsi que les dimensions des structures turbulentes dans la couche de mélange. Les fonctions de corrélations spatiales et temporelles ont une décroissance plus rapide aux faibles distances de séparation et temps de retard mais plus lente lorsque la distance ou le temps de retard augmente. Un autre concept de modélisation de l'organisation de l'écoulement est à mettre en place afin de mieux représenter l'écoulement en prenant en compte les effets d'anisotropie et aussi que l'écoulement ne présente pas un processus gaussien dans toutes ces régions.

Ces travaux expérimentaux ont été financés par le Centre National d'Etudes Spatiales.

## Références

- C. Bailly, P. Lafon and S. Candel, 1997 Subsonic and supersonic jet noise predictions from statistical source models. *AIAA Journal*, **35(11)**, 1688-1696.
- W.T. Chu, 1966 Turbulence measurement relevant to jet noise. *UTIAS Report*, **119**, Institute for Aerospace Studies, University of Toronto.
- M.J. Lighthill, 1952 On sound generated aerodynamically : I. General theory. *Proc. Roy. Soc.*, **A(211)**, 1-32.
- M.J. Lighthill, 1963 Jet noise. *AIAA Journal*, **1(7)**, 1507-1517.
- F. Kerhervé, 2004 Caractérisation statistique des sources aéroacoustiques en jets supersoniques par vélocimétrie laser à effet Doppler. Thèse de l'université de Poitiers.
- H. Nobach, E. Muller and C. Tropea, 1998 Efficient estimation of power spectral density from laser Doppler anemometry. *Exp. In Fluids*, **24**, 499-509.
- H.S. Ribner, 1964 The generation of sound by turbulent jets. *Advances in Applied Mechanics*, Academic Press, New York, **8**, 103-182.
- L. Simon, J.A. Fitzpatrick, F. Kerhervé, P. Jordan, 2004 A comparison of correlation slotting and sample-and-hold for determination of cross power spectra From LDV measurements. *12<sup>ème</sup> International Symposium on Applications of LASER Techniques to Fluid Mechanics*.