



**HAL**  
open science

## Mesure de vitesse acoustique dans un écoulement de conduite turbulent par LDV et TR-PIV

Olivier Léon, Estelle Piot, Delphine Sebbane, Frank Simon

► **To cite this version:**

Olivier Léon, Estelle Piot, Delphine Sebbane, Frank Simon. Mesure de vitesse acoustique dans un écoulement de conduite turbulent par LDV et TR-PIV. CFTL 2016, Sep 2016, TOULOUSE, France. hal-01400232

**HAL Id: hal-01400232**

**<https://hal.science/hal-01400232>**

Submitted on 21 Nov 2016

**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 de vitesse acoustique dans un écoulement de conduite turbulent par LDV et TR-PIV

Olivier Léon

Estelle Piot

Delphine Sebbane

Frank Simon

ONERA

Département Modélisation pour l'Aéronautique et l'Énergétique

2 avenue Edouard Belin 31055 Toulouse

[Olivier.leon@onera.fr](mailto:Olivier.leon@onera.fr)

Ces travaux visent à montrer la faisabilité de la mesure de composantes de vitesse acoustique, i.e. amplitude et phase, dans un écoulement de conduite pleinement turbulent par TR-PIV et LDV, pour des conditions d'essais présentant des amplitudes sonores d'au moins 130dB, des nombres de Mach de l'ordre de 0.1 et des taux de turbulence supérieurs à 5%. L'objectif à long terme est de mettre en œuvre la technique TR-PIV dans des conditions d'essais rencontrées dans l'étude de liners acoustiques, avec notamment des nombres de Mach plus élevés. L'approche spectrale proposée par Minotti et al [2] et déjà auparavant appliquée à la mesure par LDV est reprise et comparée à des résultats issus de la théorie de l'information. Cette méthode est alors appliquée à des mesures obtenues par TR-PIV, présentant l'intérêt de couvrir un champ spatial important tout en permettant l'étude d'excitations multi-fréquentielles.

## 1 Introduction

La réduction des nuisances sonores issues de turboréacteurs est un enjeu important pour l'industrie aéronautique, requérant le développement de techniques de mesure et de localisation du bruit. Si l'utilisation de microphones pour de la métrologie acoustique dans un environnement au repos est une solution technique adéquate, plusieurs difficultés surviennent lorsqu'il s'agit de réaliser des mesures acoustiques en présence d'un écoulement. En effet, en premier lieu, la turbulence aérodynamique peut significativement bruyier le signal acoustique, requérant alors l'utilisation de méthodes de filtrage et de traitement spécifiques. De plus, l'utilisation de sondes microphoniques placées en écoulement est par nature intrusive, pouvant altérer les caractéristiques de ce dernier. Enfin, l'utilisation de sondes placées en paroi, sur une maquette ou dans une veine d'essai, permet généralement d'obtenir des informations sur le champ acoustique et les sources associées, mais n'est parfois pas réalisable expérimentalement et ne permet pas une mesure volumique directe.

Afin de répondre à ces problématiques, divers développements techniques ont été proposés au cours des dernières décennies, dont plusieurs reposant sur des méthodes optiques [1]. Particulièrement, Minotti et al [2] à l'ONERA ont développé une approche basée sur la vélocimétrie laser à frange (LDV) dans le but de mesurer simultanément de manière ponctuelle les vitesses acoustiques de particules (APV pour *Acoustic Particle Velocity*) et les caractéristiques turbulentes de l'écoulement pour des études de traitements acoustiques de nacelles, appelés *liners* acoustiques. Leur méthode de mesure de composantes de vitesse acoustique en présence d'écoulement repose sur l'estimation de l'intercorrélation dans le domaine spectral du signal de vitesse mesuré par LDV avec un signal de référence fortement corrélé au signal acoustique recherché (fluctuations de pression en paroi ou signal d'excitation acoustique). Par la suite, ces auteurs ont appliqué avec succès leur approche à la mesure de composantes de vitesse acoustique au-dessus de liners pour diverses conditions d'écoulements rasants et niveaux sonores [3,4]. Plus récemment, Haufe et al [5] ont quant à eux mis en œuvre une méthode de mesure par vélocimétrie Doppler globale avec modulation de fréquence (FM-DGV) pour des applications similaires. La méthode d'estimation mise en œuvre par ces auteurs repose quant à elle sur

l'estimation directe de paramètres d'amplitude et de phase d'une onde au moyen de théories de l'information. Ces auteurs ont ainsi mis en évidence l'applicabilité de leur technique pour des mesures d'APV engendrées par des excitations acoustiques à des niveaux sonores supérieurs à 120dB dans des écoulements de conduite jusqu'à  $M=0.3$ . Même si cette approche autorise une mesure simultanée en plusieurs points de manière a priori moins complexe qu'avec une technique LDV, la résolution spatiale de cette approche reste cependant relativement faible – les résultats présentés étant contenus dans une grille de  $23 \times 7$  points de mesures. Afin d'obtenir une résolution spatiale plus importante à moindre coût, il peut être intéressant d'utiliser une technique de mesure de type PIV (*Particle Image Velocimetry*). Entre autres, Fischer et al [6] ont ainsi explorés l'utilisation de la PIV afin d'étudier le champ de vitesse acoustique induit au-dessus de liners. Comparée aux approches précédentes, la technique mise en œuvre par ces auteurs ne permet pas une résolution temporelle suffisante permettant d'utiliser les méthodes d'estimations évoquées, imposant alors un travail en moyenne de phase. Si une telle approche s'avère efficace pour des excitations mono-fréquentielles, son extension à des excitations multi-fréquentielles semble non triviale de par la complexité potentielle du signal temporel de synchronisation.

Les travaux ici présentés visent à reprendre la méthode développée par Minotti et al [2] afin d'étudier son extension à la mesure par TR-PIV, qui permettrait alors de réaliser une estimation des composantes de vitesse acoustique directement dans un plan, avec une résolution spatiale élevée, contrairement à l'approche développée par Haufe et al [5]. L'intérêt de cette approche face à celle développée par Fischer et al [6] réside dans son applicabilité directe au cas communément étudié d'un écoulement turbulent portant une excitation acoustique multi-fréquentielle. En effet, la technique ici étudiée s'appuie sur l'estimation d'interspectres entre la mesure de vitesse résolue en temps et un signal de fluctuation de pression acoustique en paroi : cette approche permet d'isoler dans l'espace spectral les composantes de vitesse associées aux ondes acoustiques introduites dans la conduite tout en opérant une réjection de la turbulence stochastique. Typiquement, comme montré par la suite, une mesure de vitesse acoustique dans un écoulement présentant un taux de turbulence de l'ordre de 5 % et pour des niveaux sonores de 130dB, soit un rapport signal sur bruit d'environ -20dB, est réalisable en supposant l'acquisition d'un nombre d'échantillons suffisant.

Cet article est organisé de la manière suivante. La section 2 détaille la méthode d'estimation utilisée pour l'évaluation des composantes de vitesse acoustique et apporte une première estimation de l'incertitude de la mesure en fonction du rapport signal sur bruit et de du nombre d'échantillons considérés. La section 3 développe ensuite la mise en œuvre expérimentale de cette approche sur un cas simple d'écoulement de conduite pleinement turbulent portant une onde acoustique plane. Les statistiques de l'écoulement sont alors données dans la section 4. Enfin, la section 5 regroupe des résultats d'estimation de vitesse acoustique pour les mesures par LDV et TR-PIV.

## 2 Méthode d'estimation de la composante de vitesse acoustique

Nous cherchons ici à donner un estimateur robuste des amplitudes RMS et des différences de phase (par rapport à un signal de référence) de composantes de vitesse acoustique lorsqu'une excitation multi-tonale est introduite dans un écoulement de conduite pleinement turbulent.

### 2.1 Théorie

En notant le champ de vitesse  $\mathbf{u} = \{u_i\}_{i \in \llbracket 1,3 \rrbracket}^T$ , nous pouvons décomposer celui-ci de telle sorte que

$$\mathbf{u}(x, t) = \mathbf{u}_0(x) + \tilde{\mathbf{u}}(x, t) + \mathbf{u}'(x, t) + \mathbf{b}(x, t)$$

avec  $\mathbf{u}_0$  le champ moyen,  $\tilde{\mathbf{u}}$  le champ de vitesse acoustique engendré par l'excitation,  $\mathbf{u}'$  le champ de fluctuations turbulentes et  $\mathbf{b}$  le bruit inhérent à la mesure. Le champ de vitesse acoustique instantané associé à une excitation multi-tonale peut s'écrire de la façon suivante :

$$\tilde{u}_i(x, t) = \sum_{k=1}^K \sqrt{2} A_{\tilde{u}_i}(x, \omega_k) \cos[\omega_k t + \varphi_{\tilde{u}_i}(x, \omega_k) + \varphi_s(\omega_k)]$$

avec  $A_{\tilde{u}_i}(\mathbf{x}, \omega_k)$  l'amplitude RMS de vitesse acoustique à la pulsation  $\omega_k$ ,  $\varphi_{\tilde{u}_i s}(\mathbf{x}, \omega_k)$  la différence de phase par rapport à un signal de référence  $s(t)$  à la pulsation  $\omega_k$ ,  $\varphi_s$  la phase du signal de référence et  $K$  le nombre total d'ondes acoustiques planes considérées.

Dans le cadre de ce formalisme, nous supposons que les fluctuations turbulentes  $\mathbf{u}'$  sont totalement décorréliées des composantes de vitesse acoustique  $\tilde{\mathbf{u}}$ , ce qui est le cas lorsque les perturbations acoustiques n'altèrent pas la dynamique turbulente de l'écoulement et lorsque la turbulence elle-même n'engendre pas d'acoustique.

Avec ces hypothèses, l'amplitude RMS et la différence de phase des composantes de vitesse acoustique, respectivement  $A_{\tilde{u}_i}$  et  $\varphi_{\tilde{u}_i s}$ , peuvent être obtenue par évaluation de la fonction d'interspectre  $G_{u_i s}(\mathbf{x}, \omega_k)$  entre le signal de vitesse mesuré  $u_i(\mathbf{x}, t)$  et le signal de référence  $s(t)$ . En effet, par linéarité des opérateurs, la fonction d'interspectre s'écrit

$$G_{u_i s}(\mathbf{x}, \omega_k) = G_{\tilde{u}_i s}(\mathbf{x}, \omega_k) + G_{u'_i s}(\mathbf{x}, \omega_k) + G_{b_i s}(\mathbf{x}, \omega_k)$$

avec théoriquement  $G_{u'_i s} = 0$  et  $G_{b_i s} = 0$  en suivant les hypothèses précédentes. Les grandeurs recherchées s'expriment alors de la manière suivante,

$$A_{\tilde{u}_i}(\mathbf{x}, \omega_k) = \frac{|G_{u_i s}(\mathbf{x}, \omega_k)|}{\sqrt{|G_{ss}(\omega_k)|}}$$

$$\varphi_{\tilde{u}_i s}(\mathbf{x}, \omega_k) = \langle G_{u_i s}(\mathbf{x}, \omega_k) \rangle$$

avec  $|\cdot|$  désignant l'opérateur de norme et  $\langle \cdot \rangle$  de phase d'un nombre complexe.

Dans ces travaux, l'estimateur  $\hat{G}_{u_i s}$  de la fonction d'interspectre  $G_{u_i s}$  est obtenu par une méthode de type WOSA (*Welch's Overlapped Segmented Average*). Comme l'estimation de l'amplitude et de la phase de la composante acoustique est réalisée dans le domaine fréquentiel, la richesse du contenu spectral n'est pas un facteur limitant tant que le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon est respecté et que fréquences des composantes acoustiques sont bien séparées dans l'estimation des fonctions d'interspectre.

## 2.2 Estimation de l'incertitude en présence de bruit blanc Gaussien

En pratique, puisque le nombre d'échantillons de mesure  $N$  est limité, l'estimation de l'interspectre de  $u_i$  avec  $s$  sur un intervalle de temps donné, soit  $\hat{G}_{u_i s}$ , présentera une dépendance à la turbulence de l'écoulement et au bruit de mesure. Les relations théoriques précédentes ne seront ainsi pas exactement vérifiées. Par souci de simplicité, considérons que les deux variables aléatoires  $u'_i$  et  $b$  peuvent être modélisées par un bruit blanc Gaussien  $w = N(0, \sigma_w^2)$ , et considérons une seule onde acoustique plane, ces résultats étant indépendant du nombre d'ondes acoustiques  $K$ . Dans un tel cas [7], la déviation standard minimum que l'on peut espérer en présence d'un bruit blanc Gaussien pour l'estimation de  $A_{\tilde{u}_i}$  et  $\varphi_{\tilde{u}_i s}$  est donnée par la limite inférieure de Cramér-Rao (CRLB pour *Cramér-Rao lower bound*). Celle-ci s'exprime pour ces deux estimateurs

$$\sigma_{\hat{A}_{\tilde{u}_i}} \geq \frac{\sigma_w}{\sqrt{N}}$$

$$\sigma_{\hat{\varphi}_{\tilde{u}_i s}} \geq \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\sigma_w}{A_{\tilde{u}_i}}$$

où  $N$  est le nombre total d'échantillons. En écrivant le rapport signal sur bruit  $SNR = A_{\tilde{u}_i}^2 / \sigma_w^2$ , ces bornes s'écrivent alors

$$\frac{\sigma_{\hat{A}_{\tilde{u}_i}}}{A_{\tilde{u}_i}} \geq \frac{1}{\sqrt{N}} 10^{-SNR[dB]/20}$$

$$\sigma_{\hat{\varphi}_{\tilde{u}_i s}} \geq \frac{1}{\sqrt{N}} 10^{-SNR[dB]/20}$$

Afin d'illustrer ces résultats et d'estimer l'efficacité de la méthode d'extraction de la composante de vitesse acoustique présentée, nous considérons ici le cas synthétique d'un signal échantillonné à la fréquence  $f_s$  et défini par

$$u(t_n) = \sqrt{2}A_{rms} \cos(2\pi f t_n + \varphi) + w(t_n)$$

où  $f$  est la fréquence du signal synthétique,  $w$  est du bruit blanc gaussien et  $t_n = n/f_s$  avec  $n \leq N$ ,  $N$  étant le nombre total d'échantillons considérés. Pourvu que le théorème d'échantillonnage est vérifié, les valeurs de  $f_s$  et de  $f$  n'importent pas. Le signal de référence utilisé est défini par  $s(t_n) = \cos 2\pi f t_n$ . Les estimations de l'interspectre  $\hat{G}_{us}$  sont réalisées au moyen d'une méthode de type WOSA avec une fenêtre de Hanning de taille  $N_{FFT} = 1024$  avec 50% de recouvrement, permettant alors l'évaluation des estimateurs d'amplitude  $\hat{A}$  et de phase  $\hat{\varphi}$ . Ces estimations sont répétées 200 fois, permettant d'évaluer les dispersions associées à ces estimateurs pour plusieurs nombre d'échantillons  $N$  et rapports signal-sur-bruit. Ces résultats sont présentés dans la figure 1, avec les bornes de Cramér-Rao correspondantes. Pour un nombre d'échantillons suffisamment important, nous observons que la méthode proposée est asymptotiquement efficace, et est donc comparable à l'approche proposée par Haufe et al [5]. Ces tracés permettent par ailleurs d'évaluer le nombre d'échantillons nécessaire pour un niveau de bruit (supposé blanc et Gaussien) et une incertitude donnés.

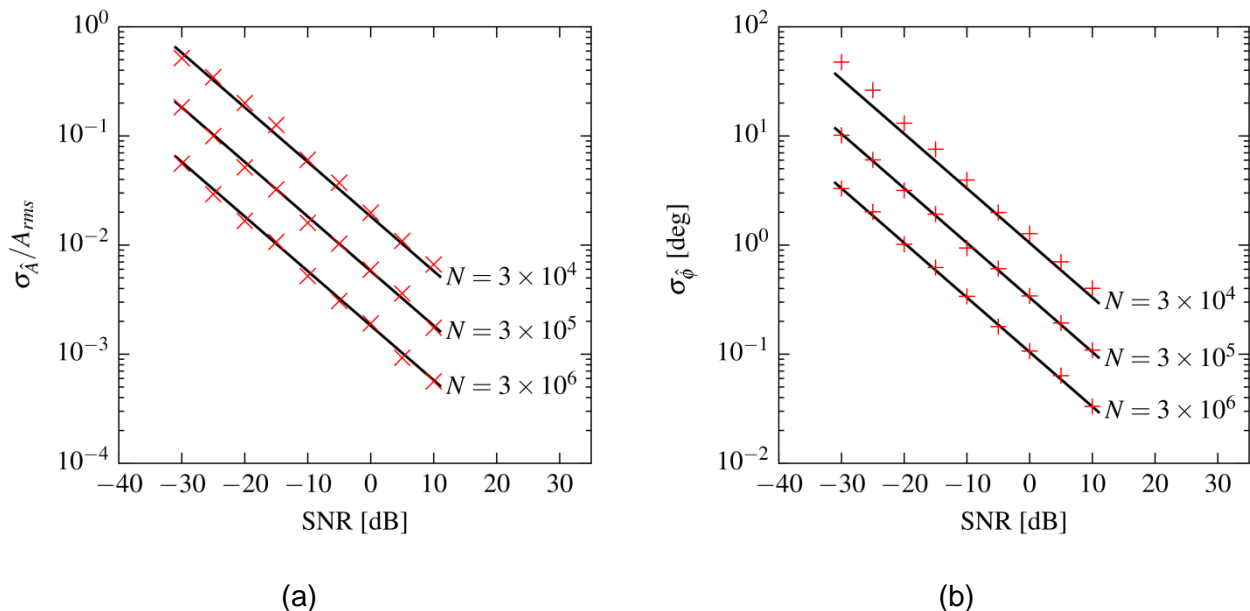


Figure 1 : Déviation standard des estimateurs d'amplitude RMS  $\hat{A}$  et de différence de phase  $\hat{\varphi}$  pour différents rapports signal-sur-bruit (en dB) ; les lignes noires continues représentent les limites de Cramér-Rao obtenues pour 3 nombres d'échantillons  $N$  ; 200 simulations indépendantes sont utilisées pour l'estimation des déviations standards représentées par des symboles (+).

### 3 Mise en œuvre expérimentale

Afin de mettre en œuvre les développements théoriques précédents et d'en valider les résultats pour les différents moyens métrologiques ici considérés (TR-PIV et LDV), nous présentons le cas simple de l'estimation des composantes d'une onde acoustique mono-fréquentielle dans un écoulement pleinement turbulent dans une conduite entièrement rigide. Des travaux démontrant l'extension directe de cette approche à l'estimation de composantes de vitesse acoustique pour des excitations multi-tonales et en présence de liners acoustique par métrologie LDV sont rapportés par Minotti et al [2] et Betgen et al [4].

#### 3.1 Conditions d'essai

Les mesures ici présentées ont été réalisées sur le banc aéro-thermo-acoustique de l'ONERA Toulouse. Une représentation schématique de ce dernier est donnée par la figure 2. La section de la veine d'essai est carrée, de dimensions 50mm x 50mm ( $2h \times 2h$ ). La cellule d'essai est

connectée à un pavillon exponentiel et une chambre assourdie assurant une sortie quasi-anéchoïque. Le repère orthonormé direct de mesure est défini tel que  $x$  soit aligné avec l'axe veine,  $y$  dans la direction transverse et  $O$  au centre de la cellule d'essai.

Les mesures sont réalisées sous atmosphère normale, avec une régulation en température de l'écoulement à la température ambiante  $T_0 = 20$  °C, donnant une vitesse du son  $c_0 = 343$  m/s. Le débit massique est régulé à  $Q = 100$  g/s, donnant une vitesse débitante de  $U_b = 33.2$  m/s et un nombre de Mach débitant  $M_b = 0.1$ . Le nombre de Reynolds basé sur la vitesse débitante et la demi-hauteur de la section d'essai est alors  $Re_b = 8.27 \times 10^5$ .

Un ensemencement par particules de silice amorphe est utilisé pour les deux techniques de mesure LDV et TR-PIV. Cet ensemencement est injecté en amont de la chambre de tranquillisation et d'un redresseur d'écoulement afin d'assurer son homogénéité.

Une excitation acoustique à une fréquence  $f_a = 800$  Hz est imposée par les deux haut-parleurs à plusieurs niveaux sonores  $L$  définis dans le tableau 1 et tels que

$$L = 20 \log \frac{|p'|_{rms}}{p_{ref}}$$

avec  $p_{ref} = 2 \times 10^{-5}$  Pa. Le tableau 1 donne également une estimation de l'amplitude RMS de vitesse acoustique correspondante en supposant un écoulement uniforme, ainsi que des estimations de dynamiques de vitesse en jeu (DVR pour *Dynamic Velocity Range*) par rapport à l'écoulement principal, soit  $DVR = U_b / |u'|_{rms}$ . Ces dernières sont bien dans le domaine de capacité de mesure des deux techniques de vélocimétrie laser pour les niveaux sonores considérés, la difficulté de la mesure réside ainsi principalement dans le rapport signal-sur-bruit (SNR).

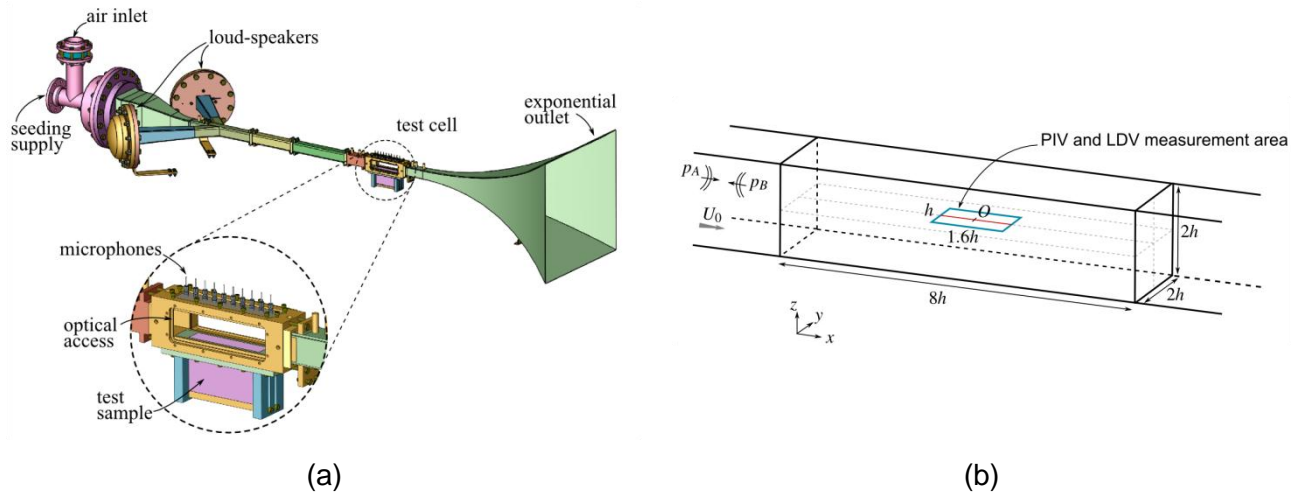


Figure 2 : Représentations schématiques (a) du banc aéro-thermo-acoustique à l'ONERA Toulouse et (b) du champ de mesure dans la cellule d'essai

Tableau 1 : Amplitudes sonores d'excitation acoustique explorées pour la mise en œuvre de l'estimation de composantes de vitesse acoustique par vélocimétrie laser (LDV et TR-PIV), et paramètres des conditions d'essais.

L [dB]	$ p' _{rms}$ [Pa]	$ u' _{rms}$ [m/s]	DVR	SNR [dB]
130.5	67.0	0.16	176	-19.2
138	158.9	0.38	74	-11.7
145	355.7	0.86	33	-4.6
150	632.5	1.53	18	0.4

### 3.2 Mesures de pression

La section de sortie de la veine n'étant pas parfaitement anéchoïque, des ondes acoustiques de retour sont engendrées par les ondes aller issues de l'excitation imposée. Ainsi, avant de réaliser

des mesures par vélocimétrie laser, des mesures d'amplitude des ondes acoustiques aller ont été réalisées au moyen de sondes microphoniques placées en parois. Ces amplitudes sonores sont celles données dans le tableau 1. Deux microphones B&K 4182 espacés de 28mm sont ainsi utilisés afin de réaliser ce tri d'onde [8]. Ces mesures microphoniques permettent également d'estimer l'évolution théorique de l'amplitude et de la phase du système d'ondes de pression acoustique aller-retour dans la veine d'essai. En supposant un écoulement uniforme, nous pouvons alors évaluer les composantes théoriques de vitesse acoustique associées et comparer ces résultats aux mesures par LDV et TR-PIV.

### 3.3 Système LDV

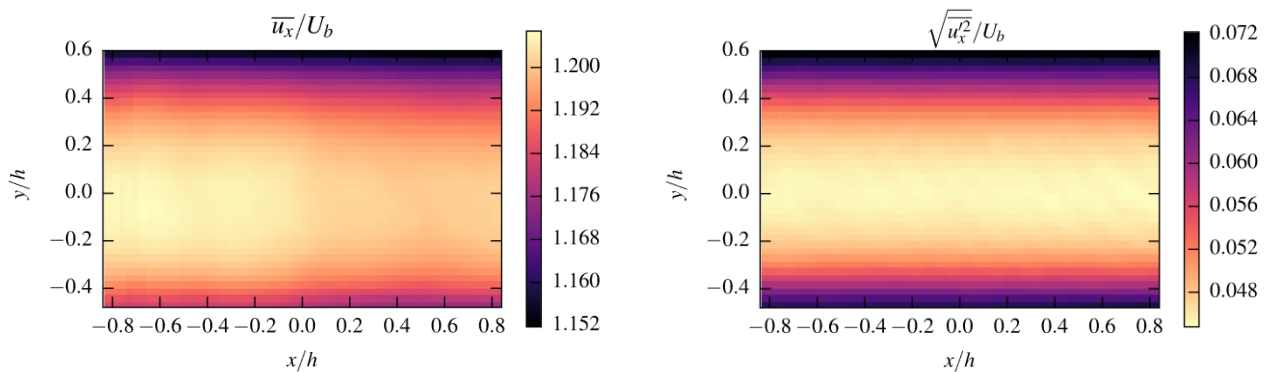
Un système LDV 2 composantes a été monté sur un banc de déplacement 3 axes dans une configuration de diffusion avant afin de maximiser le rapport signal-sur-bruit et d'assurer une cadence d'acquisition élevée, supérieure à 15kHz. Ce système LDV est composé d'un laser argon Spectra-Physics d'une puissance de 1W. Les signaux sont traités par un analyseur spectral IFA755 et les statistiques de vitesse sont obtenues au moyen du logiciel ASSA [9] développé à l'ONERA. Les dimensions du volume de mesure sont estimées à 0.05 mm x 0.7 mm. Un minimum de 200,000 échantillons est acquis pour chaque point de mesure.

### 3.4 Système TR-PIV

Les mesures TR-PIV ont été réalisées au moyen d'un système composé d'un laser Litron LDY-304, utilisé à une fréquence de répétition  $f_l = 3$  kHz et avec un temps inter-pulse  $\Delta t = 15 \mu s$ , et d'une caméra Phantom v711 utilisée en pleine résolution (1280 px x 800 px). Un objectif macro Sigma de 180mm de focale monté sur cette dernière permet d'obtenir un champ de mesure de dimensions 1.6h x 1.0 h. Ce système est arrangé en configuration 2D2C afin de mesurer les composantes de vitesse dans le plan  $(xy)$  à  $z = 0$ , comme représenté sur la figure 2b. Le post-traitement des acquisitions est réalisé au moyen du logiciel FOLKI-SPIV [10], développé à l'ONERA et permettant un traitement précis et rapide sur GPU. En effet, pour chaque cas considéré dans le tableau 1, un minimum de 22,000 paires d'images est enregistré afin d'obtenir des statistiques acceptables pour l'évaluation des composantes de vitesse acoustique, comme illustré dans la section 2.2.

## 4 Statistiques de l'écoulement

Les grandeurs statistiques de l'écoulement de conduite considéré ont été mesurées au moyen du système PIV, en l'absence d'excitations acoustiques et à fréquence d'acquisition réduite. Le champ moyen de vitesse axiale rendu sans dimension par la vitesse débitante est donné par la figure 3a, montrant une vitesse sur l'axe de l'ordre de  $1.2 U_b$ . Dans la zone de mesure considérée, nous pouvons observer qu'une approximation de l'écoulement par un champ de vitesse uniforme reste raisonnable. Les amplitudes RMS de fluctuation de vitesse axiale sont données par la figure 3b, montrant ainsi l'état pleinement turbulent de l'écoulement et des taux de turbulence en centre veine de l'ordre de 5%, s'accroissant vers les parois.



(a) Vitesse axiale moyenne

(b) Fluctuations de vitesse axiale

Figure 3 : Statistiques de l'écoulement au centre de la cellule d'essai



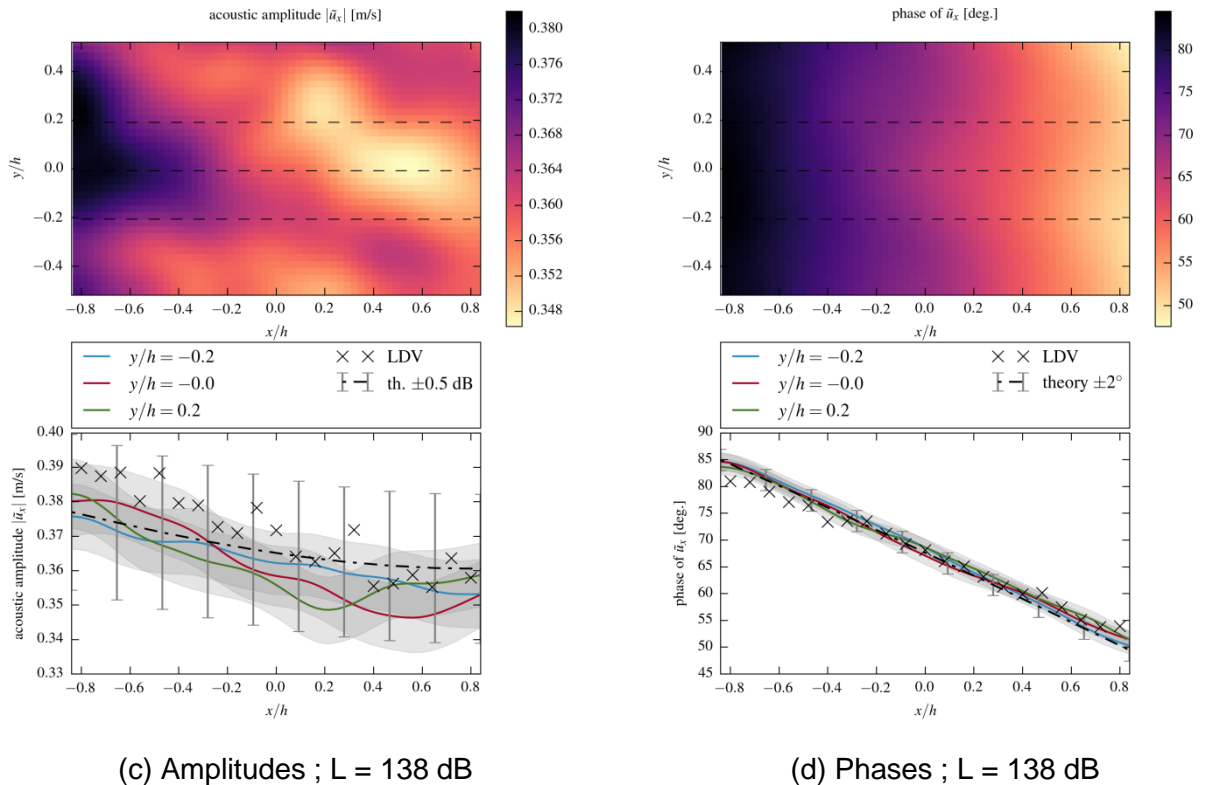
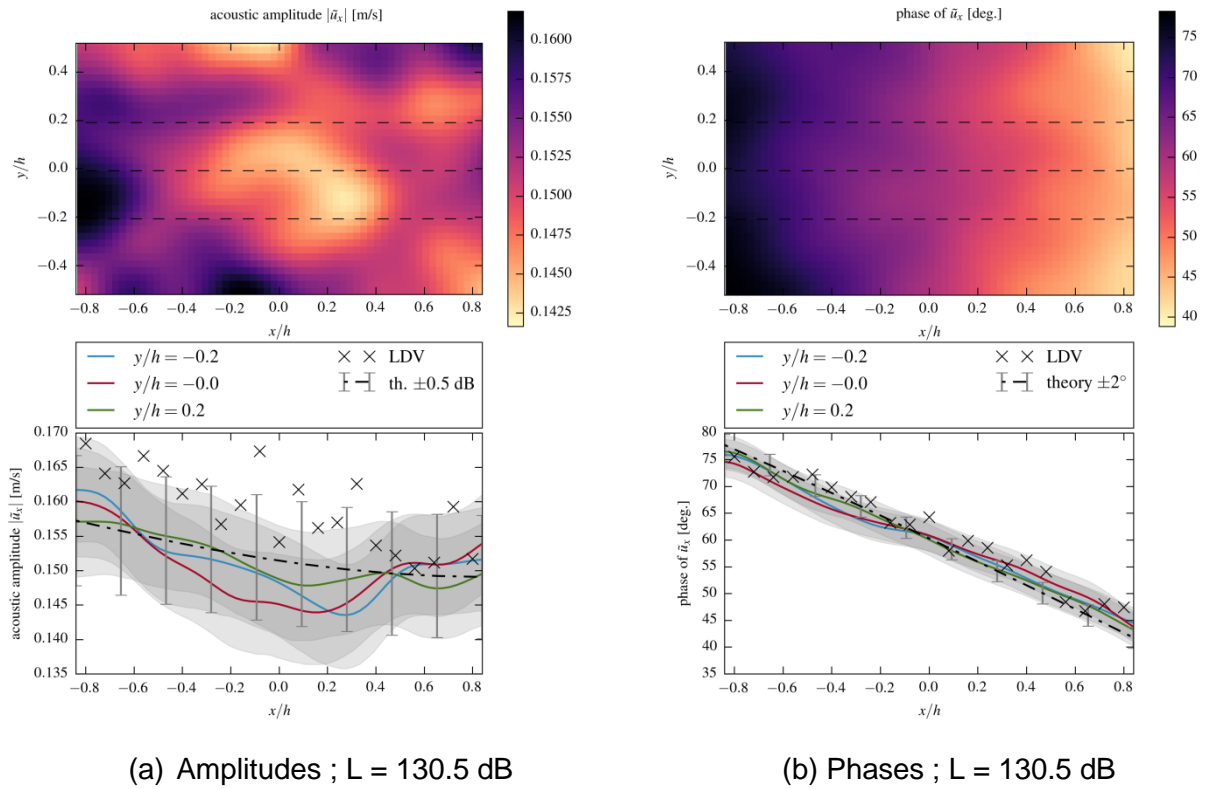


Figure 4 : Estimations des composantes de vitesse acoustique (amplitude et phase) pour deux niveaux d'excitation sonore ; Résultats issus des mesures TR-PIV (champs et lignes de couleur) comparés aux résultats obtenus par LDV (croix) et aux solutions théoriques (tiret-pointillé).

## 5 Résultats d'extraction de vitesse acoustique

La méthode développée dans la section 2 est appliquée aux mesures réalisées par TR-PIV et LDV pour l'ensemble des cas donnés par le tableau 1. Par souci de concision, seuls les résultats d'estimation d'amplitude et de phase des vitesses acoustiques pour les plus faibles excitations



(130.5 dB et 138 dB) sont donnés par la figure 4. A plus fort niveau sonore, la qualité des résultats est bien entendu encore meilleure.

Les estimations de composantes de vitesse acoustique issues des mesures TR-PIV sont présentées sous forme de champs et des coupes à trois positions transverses  $y$  sont tracées. Les intervalles de confiance à 90% associés à ces dernières estimations sont obtenus par une méthode de type bootstrap et sont représentés par des courbes pleines semi-transparentes grises. Les résultats issus des mesures LDV sont globalement en très bon accord avec les résultats de mesure TR-PIV, les écarts observés pouvant être attribués à de légères différences de niveaux sonores d'excitation, les mesures ayant été réalisées à plusieurs semaines d'écart. Les résultats théoriques basés sur des mesures microphoniques en amont de la zone mesure sont également en bon accord et montrent que les disparités de vitesse observées sont globalement inférieures à des amplitudes sonores équivalente de  $\pm 0.5$ dB, classiquement observées lors de mesures microphoniques. Des résultats équivalents sont observés sur l'ensemble des cas listés dans le tableau 1.

## 6 Conclusions

Ces travaux montrent d'une part l'applicabilité à la mesure par TR-PIV de la méthode d'estimation de composantes de vitesse acoustique dans un écoulement de conduite pleinement turbulent, telle que développée par Minotti et al [2]. D'autre part, il est montré que cette approche est asymptotiquement efficace. Par comparaison à des résultats issus de mesure LDV et microphoniques, nous concluons sur la faisabilité de l'approche pour des niveaux sonores jusqu'à 130dB et un taux de turbulence d'environ 5%, soit un rapport signal sur bruit d'environ -20dB. La suite de ces travaux cherchera à appliquer cette méthode en proche paroi pour l'étude de liners acoustiques avec écoulement rasant en présence d'excitations multi-fréquentielles.

## Références

- [1] Jean-Christophe Valière, "Acoustic Particle Velocity Measurements Using Laser: Principles, Signal Processing and Applications", ISBN: 978-1-84821-562-7, March 2014, Wiley-ISTE
- [2] Minotti A, Simon F, Ganti F (2008) "Characterization of an acoustic liner by means of Laser Doppler Velocimetry in a subsonic flow". *Aerospace Science and Technology* 12(5):398–407, DOI 10.1016/j.ast.2007.09.007
- [3] Lavieille, M. and Simon, F. and Micheli, F, "Measurement of acoustic quantity fields in duct flow by Laser Doppler Velocimetry". 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, May 8-10, 2006
- [4] Betgen B, Galland MA, Piot E, Simon F (2012) "Implementation and non-intrusive characterization of a hybrid activepassive liner with grazing flow". *Applied Acoustics* 73(6-7):624–638, DOI 10.1016/j.apacoust.2012.01.008
- [5] Haufe D, Fischer A, Czarske J, Schulz A, Bake F, Enghardt L (2013) "Multi-scale measurement of acoustic particle velocity and flow velocity for liner investigations". *Experiments in Fluids* 54(7), DOI 10.1007/s00348-013-1569-4
- [6] Fischer A, Sauvage E, Roehle I (2008) "Acoustic PIV: Measurement of the acoustic particle velocity using synchronized PIV-technique". *The Journal of the Acoustical Society of America* 123(5):3130, DOI 10.1121/1.2933079
- [7] Kay S (1984) "Fundamentals of statistical signal processing, Volume 1: Estimation theory", Pearson Education
- [8] Bodén H, Abom M (1986) "Influence of errors on the twomicrophone method for measuring acoustic properties in ducts". *The Journal of Acoustical Society of America* 79(2):541-549
- [9] Micheli F, Lavieille M, Millan P (2006) « Assa, un outil de référence pour le traitement du signal en vélocimétrie laser ». In: 10e Congrès Francophone de Techniques Laser (CFTL), Toulouse (France)
- [10] Champagnat F, Plyer A, Le Besnerais G, Leclaire B, Davoust S, Le Sant Y (2011) « Fast and accurate piv computation using highly parallel iterative correlation maximization ». *Experiments in Fluids* 50(4):1169–1182, DOI 10.1007/s00348-011-1054-x