

# Mesure de vitesse acoustique particulière en champ libre par anémométrie laser Doppler

Alain LE DUFF<sup>1</sup>, Jean-Christophe VALIÈRE<sup>2</sup>, Guy PLANTIER<sup>1</sup>, Bruno GAZENGEL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>École Supérieure d'Électronique de l'Ouest  
4, rue Merlet de la Boulaye, BP30926, 49009 ANGERS cedex 01, France

<sup>2</sup>Laboratoire d'Études Aérodynamiques, CNRS UMR 6609  
Université de Poitiers, 86022 Poitiers, France

<sup>3</sup>Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, CNRS UMR 6613  
Av. O. Messiaen, 72085 Le Mans cedex 09, France

alain.le\_duff@eseo.fr, jean-christophe.valiere@lea.univ-poitiers.fr  
guy.plantier@eseo.fr, Bruno.Gazengel@univ-lemans.fr

**Résumé** – Cette étude présente une méthode d'estimation de la vitesse particulière acoustique et de la vitesse de convection par Anémométrie Laser à effet Doppler (ALD). Ces paramètres sont estimés grâce à l'utilisation conjointe d'une technique de démodulation synchrone en quadrature et d'un estimateur basé sur la dérivée de la phase du signal Doppler. Enfin, cette méthode est appliquée à la mesure des paramètres de la vitesse acoustique en champ libre pour une excitation sinusoïdale.

**Abstract** – This paper considers the problem of estimating acoustic particle velocity and convection velocity by means of Laser Doppler Anemometry (LDA). An estimation for these parameters is obtained thanks to a quadrature demodulation technique and a phase derivative-based estimator. At last, this method is applied in order to estimate velocity parameters in free field, for a sine wave excitation.

## 1 Introduction

L'anémométrie laser Doppler (ALD) est une technique non-invasive de mesure de champ de vitesse par interférométrie laser. Sa mise en œuvre dans le cadre de l'acoustique est aujourd'hui encore complexe. Pour que cette méthode puisse être utilisée de manière efficace il convient donc d'imaginer un système de mesure simple d'utilisation, mais précis, permettant d'accéder en temps réel aux paramètres de la vitesse acoustique particulière. Le travail présenté ici se propose de répondre à ces exigences. Il s'appuie sur des études préalables qui ont permis, d'une part, de valider une chaîne de mesure ALD pour l'estimation de vitesse acoustique et de proposer, d'autre part, des algorithmes de traitement du signal mais dans un contexte de traitement différé (post-traitement), pour des signaux d'amplitude constante [1, 2].

## 2 Principes de l'ALD

Le principe de l'ALD est donné par la figure 1. L'intersection de deux faisceaux laser définit un volume de mesure siège d'un réseau de franges d'interférence. Une particule d'ensemencement traversant cette zone va alors diffuser un signal lumineux recueilli par un photomultiplicateur. La fréquence de variation de l'intensité, ou fréquence Doppler, est donnée par

$$F_D = v \frac{2 \sin(\theta/2)}{\lambda} \quad (1)$$

où  $v$  représente la projection de la vitesse dans une direction perpendiculaire aux franges d'interférence,  $\lambda$  la longueur d'onde

et  $\theta$  l'angle d'incidence des deux faisceaux laser. La détermination du signe de la vitesse est obtenue en imposant le défilement du réseau de franges à l'aide d'une cellule de Bragg excitée à une fréquence  $F_B = 40$  MHz. L'estimation de la fréquence  $F_D$  permet alors d'accéder à la vitesse acoustique  $v$  [3].

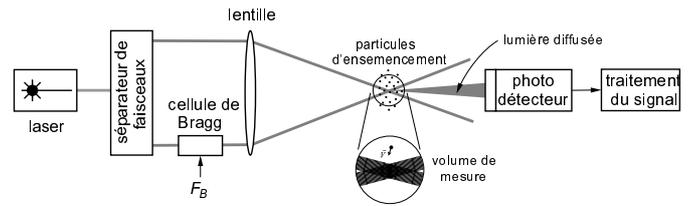


FIG. 1: Principe de l'anémométrie laser à effet Doppler.

### 2.1 Modèle du signal Doppler

Dans le cas d'une excitation sinusoïdale du champ acoustique la vitesse d'une particule traversant le volume de mesure est donnée par

$$v(t) = V_{ec} + V_{ac} \cos(2\pi F_{ac}t + \phi_{ac}). \quad (2)$$

Les paramètres du signal acoustique sont la fréquence acoustique  $F_{ac}$ , supposée connue, la phase acoustique initiale  $\phi_{ac}$  et l'amplitude de la vitesse acoustique  $V_{ac}$  que l'on cherche à estimer. La vitesse de convection,  $V_{ec}$ , supposée petite devant  $V_{ac}$ , doit elle aussi être estimée. La position de la particule est

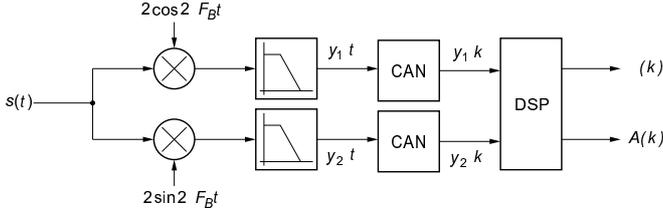


FIG. 2: Schéma de principe d'un système de démodulation en quadrature.

alors définie par l'expression

$$x(t) = V_{ec}(t - t_0) + \frac{V_{ac}}{2\pi F_{ac}} \sin(2\pi F_{ac}t + \phi_{ac}) \quad (3)$$

où  $t_0$  désigne l'instant où la particule passe au centre du volume de mesure. Dans l'hypothèse où une seule particule d'ensemencement traverse le volume de mesure, le signal observé à la sortie du photomultiplicateur prend la forme

$$s(t) = A(t) \{M + \cos[2\pi F_B t + 2\pi D x(t) + \phi_0]\}. \quad (4)$$

Dans cette relation  $A(t)$  représente l'amplitude variable du signal avec

$$A(t) = K \exp\left\{-[\beta x(t)]^2\right\} \quad (5)$$

où le terme  $1/\beta$  désigne la largeur du volume de mesure. La phase instantanée est donnée, quant à elle, par

$$2\pi D x(t) + \phi_0 = 2\pi F_D t + \phi_0 = \phi(t) \quad (6)$$

Par la suite la composante basse-fréquence  $MA(t)$ , appelée piedestal, est éliminée à l'aide d'un filtre passe-haut. L'équation (4) devient alors

$$s(t) = A(t) \cos[2\pi F_B t + \phi(t)]. \quad (7)$$

## 2.2 Translation du signal en bande de base

Un traitement en temps réel du signal Doppler nécessite que le débit de données numériques délivrées par les Convertisseurs Analogiques Numériques (CAN) ne soit pas trop important. La fréquence d'échantillonnage  $F_e$  doit être alors choisie la plus faible possible tout en restant compatible avec le théorème fondamental de l'échantillonnage. Pour atteindre cet objectif le spectre de puissance de  $s(t)$  est ramené en bande de base à l'aide d'un démodulateur en quadrature analogique synchrone de la fréquence  $F_B$ . Le schéma de la figure 2 illustre le principe de ce traitement et définit les signaux d'observation  $y_1(t)$  et  $y_2(t)$  présentant tous les deux un spectre de type passe-bas.

Comme les spectres de  $A(t)$  et de  $\cos \phi(t)$  présentent des supports fréquentiels disjoints une bonne approximation des signaux  $y_1(t)$  et  $y_2(t)$  est peut être donnée par

$$y_1(t) = A(t) \cos \phi(t), \quad (8)$$

$$y_2(t) = A(t) \sin \phi(t). \quad (9)$$

Après échantillonnage à la fréquence  $F_e$ , les CAN délivrent les échantillons des signaux à temps discret  $y_1(k)$  et  $y_2(k)$  donnés par

$$y_1(k) = A(k) \cos \phi(k) + b_1(k) \quad (10)$$

$$y_2(k) = A(k) \sin \phi(k) + b_2(k) \quad (11)$$

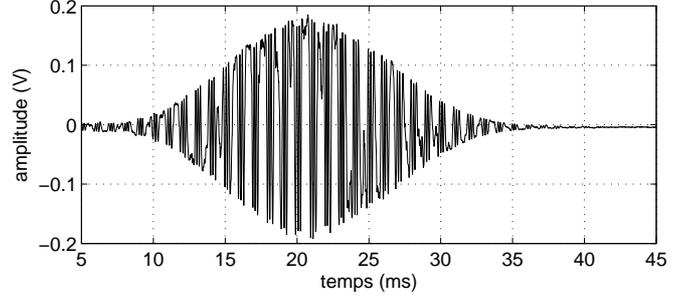


FIG. 3: Composante en phase,  $y_1(t)$ , du signal Doppler. Résultat expérimental obtenu pour  $F_{ac} = 1000$  Hz.

où

$$A(k) = K \exp\left\{-[\beta x(k)]^2\right\}, \quad (12)$$

$$\phi(k) = 2\pi D x(k) + \phi_0, \quad (13)$$

$$x(k) = V_{ec} k T_e + \frac{V_{ac}}{2\pi F_{ac}} \sin(2\pi f_{ac} k + \phi_{ac}) - V_{ec} t_0, \quad (14)$$

et  $f_{ac} = F_{ac}/F_e$  désigne la fréquence acoustique réduite. Dans les relations (10) et (11)  $b_1(k)$  et  $b_2(k)$  sont deux bruits blancs, indépendants, à moyennes nulles et de même variance. La figure 3 montre, à titre d'exemple, l'allure d'un signal d'observation  $y_1(k)$  obtenu expérimentalement.

## 3 Estimation des paramètres de la vitesse particulaire acoustique

### 3.1 Estimation de la vitesse particulaire acoustique

Une méthode envisageable consiste à se baser sur la définition de la fréquence instantanée donnée par

$$F_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}. \quad (15)$$

En effet, l'application de ce principe à la phase instantanée du signal Doppler conduit à l'estimation de la vitesse particulaire donnée par

$$\hat{v}(t) = \frac{1}{2\pi D} \frac{d\phi(t)}{dt}. \quad (16)$$

Cette méthode nécessite de connaître  $\phi(t)$ . L'opération de démodulation en quadrature pouvant être vue comme une transformée de Hilbert analogique, la phase instantanée s'obtient alors, après échantillonnage, par l'opération

$$\phi(k) = \arctan \left[ \frac{y_2(k)}{y_1(k)} \right] \quad (17)$$

où  $y_1(k)$  et  $y_2(k)$  représentent les parties réelle et imaginaire du signal analytique associé au signal Doppler [4].

Dans le domaine fréquentiel l'opération de dérivée par rapport au temps correspond au produit du spectre du signal par un filtre de réponse en fréquence

$$H(F) = j2\pi F. \quad (18)$$

La recherche du filtre à temps discret de Réponse Impulsionnelle Finie (RIF) réel dont la fonction de transfert s'approche

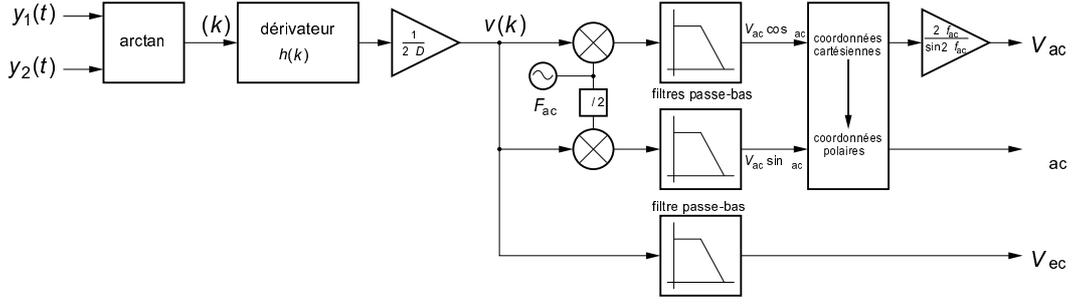


FIG. 4: Estimation des paramètres de la vitesse acoustique.

au mieux de  $j2\pi F$  oblige de synthétiser  $H(F)$ , qui ne satisfait pas le théorème de l'échantillonnage, en considérant la réponse en fréquence uniquement dans la bande de fréquence  $F \in [-F_e/2; +F_e/2]$ . Cela conduit au filtre approché

$$H_a(F) = \begin{cases} j2\pi F & \text{pour } F \in [-F_e/2; +F_e/2], \\ 0 & \text{partout ailleurs.} \end{cases} \quad (19)$$

Le calcul de  $h_a(t)$ , à l'aide de la transformée de Fourier inverse de  $H_a(F)$ , puis de  $h(k)$  par échantillonnage de la réponse impulsionnelle conduit à

$$h(k) = \frac{\pi k \cos(\pi k) - \sin(\pi k)}{\pi k^2 T_e} = \begin{cases} 0 & \text{pour } k = 0, \\ \frac{\cos(\pi k)}{k T_e} & \text{pour } k \neq 0. \end{cases} \quad (20)$$

La vitesse estimée s'exprime alors par le produit de convolution

$$\hat{v}(k) = \frac{1}{2\pi D} \phi(k) * h(k). \quad (21)$$

La mise en œuvre pratique de cette opération nécessite de tronquer la réponse impulsionnelle de durée infinie,  $h(k)$ , pour ne conserver que les éléments les plus significatifs. Pour limiter au maximum la complexité de la convolution (21) seuls les coefficients de  $h(k)$  correspondant à  $k = -1; 0; +1$  sont conservés après multiplication avec une fenêtre de Hanning.

L'estimation de la vitesse particulière est alors donnée par

$$\hat{v}(k) = \frac{1}{2\pi D} \frac{[\phi(k+1) - \phi(k-1)]}{2T_e}. \quad (22)$$

Exprimée en fonction du déplacement particulier  $x(k)$  et en tenant compte de la relation (13),  $\hat{v}(k)$  peut encore s'écrire

$$\hat{v}(k) = \frac{1}{2T_e} [x(k+1) - x(k-1)] \quad (23)$$

La vitesse estimée devient alors

$$\hat{v}(k) = V_{ec} + \left( \frac{\sin 2\pi f_{ac}}{2\pi f_{ac}} \right) V_{ac} \cos(2\pi f_{ac} k + \phi_{ac}). \quad (24)$$

### 3.2 Estimation des paramètres de la vitesse acoustique

Un système de démodulation en quadrature, synchronisé sur la fréquence acoustique connue  $F_{ac}$ , permet d'extraire les paramètres  $V_{ac}$  et  $\phi_{ac}$  de la vitesse acoustique. La génération du signal en *sinus* est obtenue en filtrant le signal de référence, appelée encore *voie en cosinus* par un déphaseur pur, construit à l'aide d'une transformée de Hilbert. La sortie du démodulateur permet d'observer les deux composantes passe-bas

$$V_{cos} = V_{ac} \cos \phi_{ac} \quad (25)$$

et

$$V_{sin} = V_{ac} \sin \phi_{ac}. \quad (26)$$

Les paramètres  $V_{ac}$  et  $\phi_{ac}$  sont déterminés par les équations de passage de coordonnées cartésiennes en coordonnées polaires

$$V_{ac} = \sqrt{V_{cos}^2 + V_{sin}^2} \quad (27)$$

et

$$\phi_{ac} = \arctan \frac{V_{sin}}{V_{cos}}. \quad (28)$$

Enfin, la vitesse de convection,  $V_{ec}$ , est simplement déterminée par le filtrage passe-bas de  $\hat{v}(k)$ . La figure 4 résume l'ensemble des opérations qui viennent d'être exposées et qui permettent d'accéder aux estimées des trois paramètres de la vitesse particulière à partir des signaux de mesures  $y_1(k)$  et  $y_2(k)$ .

## 4 Validation expérimentale

Afin de valider expérimentalement la méthode de traitement du signal proposée, l'estimateur basé sur le calcul de la dérivée de la phase est appliqué à l'étude du champ de vitesse rayonné par un haut-parleur électrodynamique monté dans une enceinte. Cette étude en champ libre prolonge les travaux déjà menés dans ce sens [2, 5, 6]. Les valeurs des vitesses mesurées dans l'axe du haut-parleur sont alors comparées à des vitesses de référence obtenues à partir d'une méthode intensimétrique utilisant le relevé de deux pressions acoustiques.

Le dispositif expérimental permettant la mesure en champ libre se compose d'un haut-parleur PHL Audio de 166 mm de diamètre monté dans un écran semi-infini et d'axe de rayonnement horizontal. Afin de minimiser l'influence des réflexions de l'onde acoustique sur la table anti-vibratile, celle-ci est recouverte d'un panneau de mousse comme le montre la photographie de la figure 5. Le haut-parleur est excité par un signal sinusoïdal issu d'un générateur basse-fréquence (GBF); d'une sonde intensimétrique composée de deux microphones solidaires du système de déplacement tridimensionnel. Celle-ci est positionnée au plus près du volume de mesure, défini par l'intersection des deux faisceaux; d'un banc de mesure par ALD; d'un dispositif d'ensemencement de la salle en particules. L'ensemble des mesures est mené dans une salle semi-anechoïque.

Une série de mesures est effectuée en différents points situés sur l'axe du haut-parleur. Chacune de ces positions, espacées d'une distance de 5 cm sont référencées par rapport au premier point de mesure choisi arbitrairement comme origine des positions et situé à environ à 35 cm en aval du haut-parleur. Celui-ci est excité à la fréquence acoustique  $F_{ac}$  fixée à 1000 Hz.

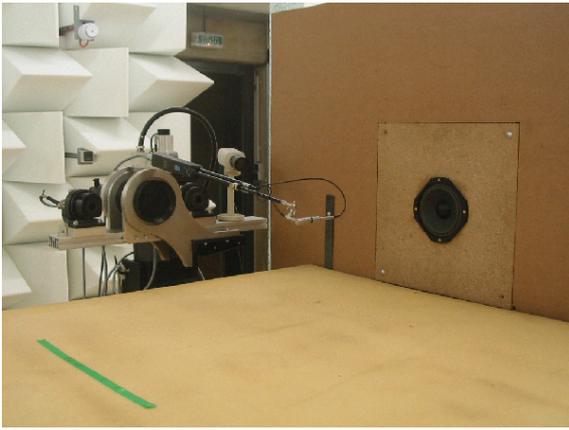


FIG. 5: Vue d'ensemble du dispositif expérimental.

## 5 Résultats et conclusions

Les résultats, présentés par la figure 6, montrent que les amplitudes des vitesses acoustiques mesurées sont comprises entre 3,4 mm/s et 6,2 mm/s valeurs qui correspondent à des niveaux de 97 dB SPL et de 102 dB SPL respectivement. Cette figure indique par ailleurs les écarts-types des estimations de la vitesse  $V_{ac}$ , matérialisés par des barres verticales, et met en évidence la décroissance en  $1/r$  de l'allure du profil de la vitesse.

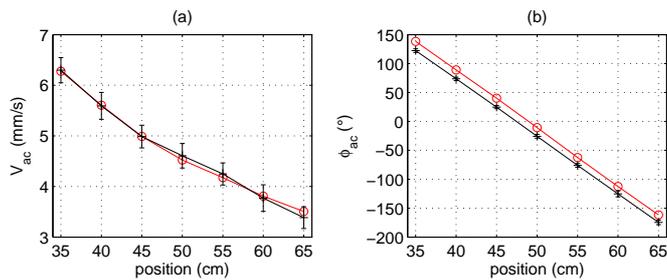


FIG. 6: Profils des amplitudes (a) et de la phase (b) de la vitesse acoustique mesurées par ALD (-+-) et à partir de deux pressions (-o-).  $F_{ac} = 1000$  Hz.

Les écarts observés sont inférieurs à 4% pour l'estimation de l'amplitude et compris entre  $13^\circ$  et  $17^\circ$  environ pour la phase. Ces résultats montrent une bonne concordance entre les valeurs de la vitesse mesurée par ALD et les valeurs obtenues par la méthode de référence.

La figure 7 donne, par ailleurs, un aperçu de l'évolution de la vitesse d'écoulement sur une durée nécessaire à l'acquisition de 100 bouffées Doppler qui, dans cet exemple, est de l'ordre de 100 secondes. Cette séquence représente les valeurs des estimations de  $V_{ec}$  relevées aux instants correspondant au maximum du signal Doppler et donne donc l'allure de l'évolution temporelle de la vitesse d'écoulement échantillonnée aléatoirement. En valeur absolue  $V_{ec}$  atteint dans ce cas des amplitudes de l'ordre de 16 mm/s. Cette valeur engendre un signal Doppler dont la largeur avoisine 2 ms, ce qui correspond à deux périodes de l'excitation acoustique lorsque  $F_{ac} = 1000$  Hz par exemple. Ce point est très important car il montre qu'il est envisageable d'estimer les paramètres de la vitesse acoustique à partir d'un nombre réduit de périodes acoustiques [7]. Ces résultats sont

encourageants et montrent, notamment, que la méthode d'estimation basée sur le calcul de la dérivée de la phase est adaptée à l'estimation en ligne des paramètres de la vitesse acoustique.

Les travaux à venir vont s'attacher à valider la méthode par des mesures systématiques recouvrant une gamme plus importante des valeurs de fréquences et des paramètres de la vitesse acoustique. Ce travail devra être mené à partir de valeurs connues de la vitesse d'écoulement obtenues grâce à un système de convection forcée et contrôlée.

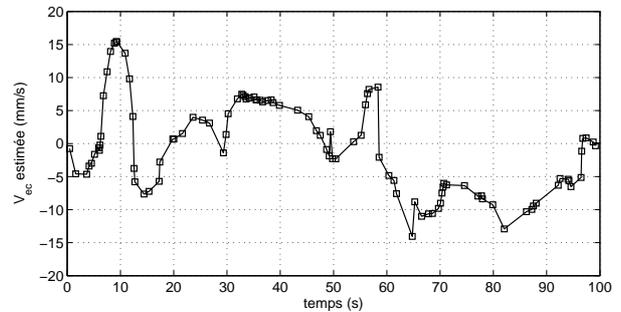


FIG. 7: Exemple de vitesse d'écoulement mesurée expérimentalement.  $F_{ac} = 1000$  Hz.

## Références

- [1] V. Valeau. *Mesure de la vitesse acoustique particulière par anémométrie laser Doppler : estimation de fréquences instantanée à variation sinusoïdale, validation de la mesure*. Thèse de doctorat, Université du Maine, 1999.
- [2] S. Poggi. *Contribution au développement d'un banc de mesure de la vitesse particulière acoustique par vélocimétrie laser doppler (VLD) : évaluation des résultats et applications*. Thèse de doctorat, Université du Maine, 2000.
- [3] F. Durst, A. Melling and J.H. Whitelaw. *Principles and practice of laser-Doppler anemometry*. Academic Press, 1976.
- [4] A. Le Duff, G. Plantier, J.C. Valière et R. Perdriau, *Acoustic Velocity Measurement in the Air by Means of Laser Velocimetry: Cramer-Rao Bounds and Maximum Likelihood Estimation*, IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, ICASSP'2002, Orlando, may 2002.
- [5] P. Rouquier, B. Gazengel, O. Richoux, G. Tournois et M. Bruneau. *Etude par VLD d'un champ acoustique en champ libre : extraction des paramètres de la vitesse particulière acoustique*. 8<sup>e</sup> congrès francophone de vélocimétrie laser, Orsay, septembre 2002.
- [6] P. Rouquier, B. Gazengel, O. Richoux, L. Simon, G. Tournois and M. Bruneau. *Acoustic particle velocities measurement by means of laser Doppler velocimetry: application to harmonic acoustic field in free space with weak flow*. Forum Acusticum, Sevilla, september 2002.
- [7] A. Le Duff. *Contribution à l'estimation paramétrique de signaux à variation sinusoïdale de la fréquence instantanée et à amplitude variable : application à l'anémométrie laser Doppler pour l'acoustique*. Thèse de doctorat, Université du Maine, 2003.