



HAL
open science

Quelques aspects liés aux différents niveaux de l'amplitude de vitesse acoustique mesurée par anémométrie fil chaud

Fathi Jebali Jerbi, Guadalupe Huelsz, Pierrick Lotton, Smaïne Kouidri

► To cite this version:

Fathi Jebali Jerbi, Guadalupe Huelsz, Pierrick Lotton, Smaïne Kouidri. Quelques aspects liés aux différents niveaux de l'amplitude de vitesse acoustique mesurée par anémométrie fil chaud. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00551162

HAL Id: hal-00551162

<https://hal.science/hal-00551162>

Submitted on 2 Jan 2011

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.

Quelques aspects liés aux différents niveaux de l'amplitude de vitesse acoustique mesurée par anémométrie fil chaud

Fathi Jebali Jerbi¹, Guadalupe Huelsz², Pierrick Lotton³, Smaïne Kouidri¹

¹Université Pierre & Marie Curie 4, place Jussieu, 75752 Paris Cedex 05, LIMSI-CNRS BP 133, 91403 Orsay Cedex, France, {jebali,kouidri}@limsi.fr

²Centro de Investigación en Energía, UNAM, A. P. 34, 62580 Temixco, Mor., Mexico, ghl@cie.unam.mx

³Laboratoire d'Acoustique, UMR CNRS 6613 Université du Maine, av. O. Messiaen, 72085 Le Mans Cedex 9, France, pierrick.lotton@univ-lemans.fr

La mesure de vitesse acoustique dans les résonateurs des dispositifs thermoacoustiques à l'aide de l'anémométrie fil chaud présente un intérêt aussi bien sur les plans fondamental et appliqué. Du point de vue fondamental, la technique d'étalonnage du fil chaud dans un fluide oscillant soulève encore des questions liées aux phénomènes inertiels présents à la fois dans le fil et au sein du fluide ainsi qu'aux lois reliant la vitesse de l'écoulement oscillant (autour d'une vitesse moyenne nulle ou en présence d'une vitesse moyenne non nulle) et le transfert de chaleur entre le fil et le fluide. Sur le plan des applications, les mesures de vitesse par anémométrie fil chaud présentent par rapport aux méthodes optiques l'avantage de simplicité d'un point de vue pratique et celui du coût. Dans des travaux antérieurs, G. Huelsz et F. López-Alquicira ont proposé une méthode de calibration au premier ordre afin de mesurer les amplitudes d'oscillation de la vitesse en considérant l'onde purement stationnaire en l'absence d'écoulement moyen ou, du moins, en présence d'un écoulement moyen de très faible niveau. Notre objectif est de présenter de nouveaux résultats sur la mesure de vitesse acoustique obtenus à partir de deux dispositifs distincts permettant d'obtenir des niveaux de vitesses différents : [1:12] m/s et [0.5:3] m/s. En particulier, on cherche à analyser les profils de la réponse du fil chaud et discuter l'effet de la présence d'un écoulement moyen dans deux configurations différentes. La technique développée par G. Huelsz est appliquée dans les deux cas pour effectuer l'étalonnage de l'amplitude de la vitesse acoustique en utilisant, comme référence, la valeur calculée à partir d'un modèle acoustique linéaire, qui tient compte des effets dissipatifs, validé par le biais des mesures de pression acoustique.

1 Introduction

La mesure des vitesses acoustiques à l'aide de l'anémométrie fil chaud présente un intérêt aussi bien sur le plan fondamental que technologique. D'un point de vue fondamental, la technique d'étalonnage d'un fil chaud dans un fluide oscillant diffère de celle utilisée dans les écoulements moyens à cause du changement de direction permanent de la vitesse et de la fluctuation de celle-ci autour d'une valeur moyenne quasi-nulle. En effet, l'anémomètre à fil chaud est incapable de discerner la direction de la vitesse et les effets d'inertie thermique du fil chaud n'arrivent pas à suivre fidèlement les variations instantanées de celle-ci. Malgré les progrès réalisés dans la dernière décennie [1,2,3,4,5], il existe toujours un manque important d'information sur la procédure d'étalonnage du fil chaud dans les fluides oscillants qui nécessite encore, à notre sens, de nouveaux développements. Sur le plan des applications, suite aux développements des systèmes thermoacoustiques [6] (générateurs d'ondes, réfrigérateurs, systèmes hybrides), les mesures des vitesses acoustiques dans les fluides oscillants suscitent un nouvel intérêt technologique. En particulier, la technique de mesure de la vitesse par anémométrie fil chaud présente l'avantage de simplicité et du coût de son installation dans des prototypes industriels. Elle devait ainsi permettre, avec la mesure de la pression acoustique, l'accès à la mesure directe de la puissance acoustique générée ou consommée dans ces machines. Dans ce travail, nous présentons certains de nos résultats sur les mesures de vitesse acoustique par anémométrie à fil chaud obtenues à l'aide de deux

dispositifs distincts permettant d'obtenir des niveaux de vitesses acoustiques différents. En particulier, on propose une technique d'étalonnage de l'amplitude de la vitesse tout en utilisant comme référence, la valeur la obtenue à partir d'un modèle acoustique linéaire validé, préalablement, par la mesure du champ de pression acoustique. Notons qu'il est évident que la précision de l'opération de l'étalonnage dépend du niveau de précision des résultats du modèle et de sa validation. Néanmoins, nous voulons attirer l'attention du lecteur sur le fait que l'objectif principal de ce travail est essentiellement orienté vers l'étude de faisabilité de la méthode de calibration plutôt que l'analyse même du modèle théorique ou le développement d'un modèle exhaustif prenant en compte l'ensemble de phénomènes physiques présents dans la configuration étudiée. Ainsi, l'analyse quantitative du phénomène d'écoulement moyen « streaming » sort de l'objet de cet article. Toute fois, quelques aspects des effets de ce phénomène inévitable dans les systèmes thermoacoustiques sont, à titre d'exemples, présentés. En particulier, la technique développée par G. Huelsz and al [4] pour éliminer l'effet de l'écoulement moyen dans la procédure d'étalonnage est discutée dans deux configurations différentes réalisées à l'aide de deux dispositifs différents. Dispositif A : étalonnage de l'amplitude de la vitesse acoustique en fonction de la fréquence pour une puissance de source et une pression moyenne données. Dispositif B : étalonnage de l'amplitude de la vitesse et, par la même occasion, de la phase relative de la vitesse par rapport à celle de la pression pour une fréquence donnée et pour différents niveaux de puissance du haut-parleur.

2 Description des dispositifs expérimentaux

2.1 Dispositif A

Le dispositif A (fig. 1) se compose d'un résonateur horizontal de 3.59 m de longueur et de 36-56 mm de diamètres sur lequel deux capteurs de pression piézoélectriques KISTLER alignés, P^1 et P^2 , sont montés aux niveaux des sections d'abscisses, respectivement, $x_{A1} = 1.92$ m et $x_{A2} = 3.54$ m. Une sonde à fil chaud type TSI de 5 μ m de diamètre et 6 Ω de résistance électrique ainsi qu'un thermocouple ont été placés dans l'axe du résonateur à une distance $x = 0.82$ m de la source. Notons que la portion du tube de diamètre 56 mm a été rajoutée afin de permettre l'insertion du support de la sonde fil chaud sans encombrement. L'anémomètre utilisé est un système de type CTA, modèle DISA 55M, associé à un pont symétrique type 55M12. Une source à piston mécanique permet de générer des ondes acoustiques avec des fréquences variant de 5 à 60 Hz et des amplitudes de pression acoustique de l'ordre de quelques dizaines de kPa.

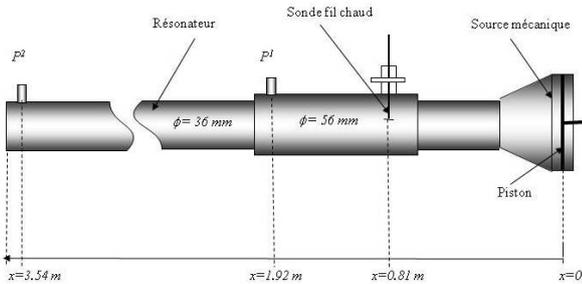


Figure 1 : Résonateur couplé à une source à piston mécanique (dispositif A)

2.2 Dispositif B

Ce dispositif (fig. 2) se compose d'un résonateur d'une longueur ajustable (0.88 m dans le travail actuel) et de 110 mm de diamètre intérieur. L'onde est générée à l'aide d'un haut-parleur électrodynamique couplé au résonateur et chargé sur le côté arrière par une cavité cubique de 270 x 270 x 270 mm de dimensions. Le haut-parleur est piloté par un générateur de fonctions dont la sortie est liée à un amplificateur de puissance. La pression acoustique est mesurée à l'aide de deux microphones $\frac{1}{4}$ - pouce - type 4944A, liés à deux voies d'un préamplificateur DeltaTron, montés aux niveaux des sections d'abscisses, respectivement, $x_{B1} = 0.015$ m et $x_{B2} = 0.71$ m par rapport à la face avant du haut-parleur. Les sensibilités du microphone 1 et du microphone 2 sont, respectivement, 0.820 mV/Pa et 0.894 mV/Pa. Les ondes acoustiques générées ont des fréquences pouvant aller jusqu'à des centaines de Hz et des amplitudes de pression acoustique de l'ordre de quelques kPa. Avec ce dispositif, une sonde à fil chaud type DISA 5501P est utilisée comportant un fil de tungstène de 5 μ m de diamètre et de 1,25 mm de longueur et ayant une résistance électrique de 3.3 Ω et un coefficient de température de 0,35 %/°C. Le fil est monté horizontalement dans l'axe du résonateur et dans la même

section que le microphone 2. Le système d'anémométrie utilisé ici est un mini anémomètre à température constante de type DANTEC modèle 54T30.

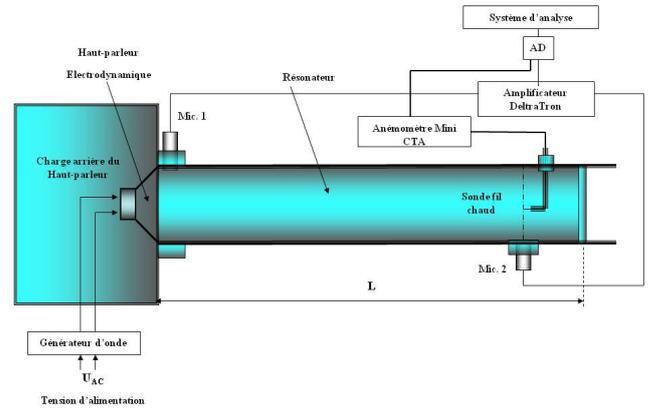


Figure 2 : Résonateur couplé à un haut-parleur électrodynamique (dispositif B)

3 Modèle théorique

En théorie, le système thermoacoustique peut être considéré comme une série de sections parallèles perpendiculaires à l'axe du résonateur constituant ainsi une ligne de transmission par analogie aux réseaux électriques. Ce modèle, dit de réseaux, qui prend en compte le caractère de propagation dans les lignes et appliqué aux dispositifs thermoacoustiques a été décrit dans plusieurs articles [7,8]. Dans des travaux précédents, nous avons présenté de nombreux résultats sur l'amplitude de la pression acoustique en fonction de la fréquence de l'onde pour une pression moyenne du fluide donnée. La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux obtenus à partir de ce modèle a montré un accord satisfaisant. Ceci est confirmé dans le présent travail comme le montrent les résultats des figures 3 et 4 de l'amplitude de pression acoustique mesurée avec le dispositif A en fonction de la fréquence et pour une pression moyenne $p_m = 6$ bars, respectivement, aux niveaux des abscisses $x_{A1} = 1.92$ m et $x_{A2} = 3.54$ m. Notons, toutefois, que ce dispositif ne nous a pas permis de conclure quant à la mesure du déphasage φ_{pu} entre la vitesse et la pression acoustiques ce qui est dû à notre sens à une maîtrise non totale du phénomène de couplage entre le système et la source mécanique [9]. En effet, la source a été représentée dans ce cas par une source de débit acoustique q_0 exprimé à l'aide d'une formule simple de type

$$q_0 = j\omega A_p e^{j\omega t} \quad (1)$$

où ω est la pulsation de l'onde et A_p est l'aire du piston mécanique. Ce modèle a été légèrement modifié dans le cas du dispositif B afin de prendre en compte les paramètres du couplage entre la source acoustique (haut-parleur) et les cavités arrière et avant qui lui sont couplées en calculant le débit acoustique au niveau de la source par

$$q_0 = \frac{P_g}{Z_f + Z_r + Z_{as}} \quad (2)$$

où Z_f et Z_r sont les impédances acoustiques d'entrée, respectivement, de la cavité avant et de la cavité arrière du haut parleur, p_g et Z_{as} sont, respectivement, la pression et l'impédance acoustique équivalente de la source [9].

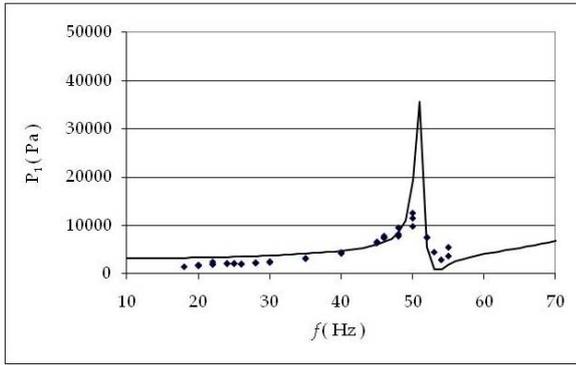


Figure 3 : Pression acoustique en $x_{A1} = 1.92$ m en fonction de la fréquence pour une pression moyenne $p_m = 6$ bars

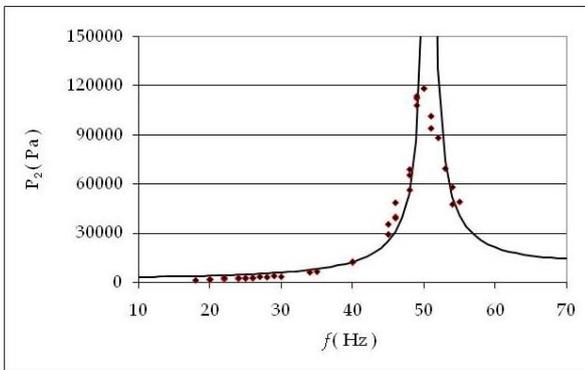


Figure 4 : Pression acoustique en $x_{A2} = 3.54$ m en fonction de la fréquence pour une pression moyenne $p_m = 6$ bars

4 Technique de l'étalonnage

4.1 Réponses des sondes à fil chaud

Le fil chaud délivre une tension de sortie différente de zéro même dans un fluide au repos par principe du fonctionnement de l'anémomètre [1]. On désigne par tension de référence, notée E_0 , la tension à l'arrêt de la source. Parce que l'anémomètre à fil chaud ne peut pas distinguer la sens de la vitesse, la tension de sortie de l'anémomètre, notée $E(t)$, est proportionnelle à la valeur absolue de la somme de l'amplitude de la tension fluctuante (E_a) au-dessus de la tension de référence et de celle correspondant à la vitesse de l'écoulement moyen (E_m). Ainsi, la tension de sortie de l'anémomètre prend la forme suivante

$$E = E_0 + |E_a \sin(\omega t) + E_m| \quad (3)$$

Théoriquement, en l'absence d'écoulement moyen, le signal de sortie de l'anémomètre est totalement redressé. En outre, pour la même raison concernant l'incapacité de l'anémomètre de distinguer le sens de la vitesse, le signal de sortie du fil chaud présente une fréquence double de celle

de l'onde acoustique. En présence d'un écoulement moyen, l'onde est redressée partiellement sur moins de la moitié d'une période d'oscillation. D'autre part, tant que $0 < E_m < E_a$, la convection naturelle provoque une « dissymétrie » du signal i.e. une alternance de deux lobes d'amplitudes différentes. Lorsque $E_m > E_a$, le signal retrouve la même forme sinusoidale et la même fréquence que celles de l'onde acoustique. Ces comportements ont été déjà observés par Elger and al [2]. Il faut noter qu'en pratique, comme on pouvait s'y attendre, la tension de sortie de l'anémomètre ne peut en aucun cas atteindre la valeur de référence E_0 en raison de l'inertie thermique de fil chauffé et que cet effet augmente avec la fréquence. Ainsi, le résultat présenté sur la figure 5 représente la tension de sortie de l'anémomètre obtenu avec le dispositif A pour une pression moyenne $p_m = 6$ bars et une fréquence $f = 50$ Hz. Ce signal est l'exemple typique de la réponse du fil chaud en l'absence d'écoulement moyen. Plus exactement, puisque ce signal est obtenu pour des fortes amplitudes de vitesse acoustique (~ 10 m/s), il est facile d'imaginer que la composante moyenne est noyée dans la partie fluctuante de la vitesse.

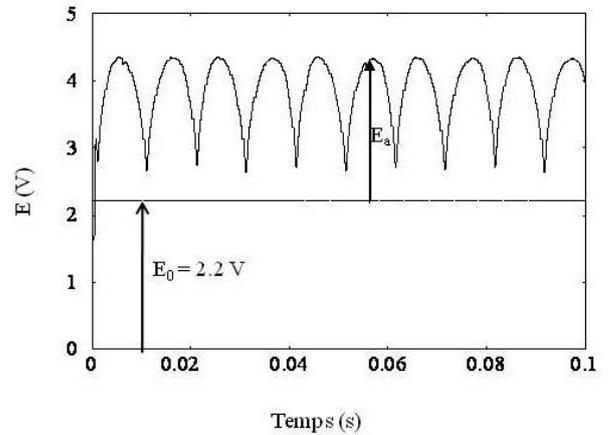


Figure 5 : Signal fil chaud obtenu avec le dispositif A
Pression moyenne : $p_m = 6$ bars ; fréquence $f = 50$ Hz

Les résultats obtenus avec le dispositif B, correspondant à des champs de vitesse moins intenses (~ 1 m/s), montrent en revanche, d'une manière ergodique, des signaux plus ou moins redressés mettant en évidence la présence d'écoulements moyens. Ainsi, sur la figure 6, sont présentés les réponses du signal fil chaud pour une même fréquence $f = 175$ Hz, et une même tension d'entrée du haut-parleur $V_{HP} = 12.12$ V mais en des positions différentes : (a) $x_B = 0.71$ m, (b) $x_B = 0.77$ m, (c) $x_B = 0.83$ m. Dans le cas (a), le signal n'est que partiellement redressé montrant que les écoulements moyens arrivent à apposer leurs signatures. Dans le cas (b), le signal est quasi-totalement redressé ce qui nous laisse penser que la vitesse oscille autour d'une valeur moyenne quasi-nulle. Le cas (c) correspond à une position de la sonde très proche de celle de l'extrémité fermée du résonateur et par conséquent très proche d'un nœud de vitesse. On voit un signal nettement « dissymétrique ». Ceci pourrait être dû probablement au fait que les écoulements moyens prennent naissance dans les couches limites. L'oscillation ayant lieu dans une région (paroi et son voisinage) où la vitesse est quasiment nulle, l'écoulement moyen devient relativement important par rapport à la composante oscillante (i.e. $E_m \lesssim E_a$).

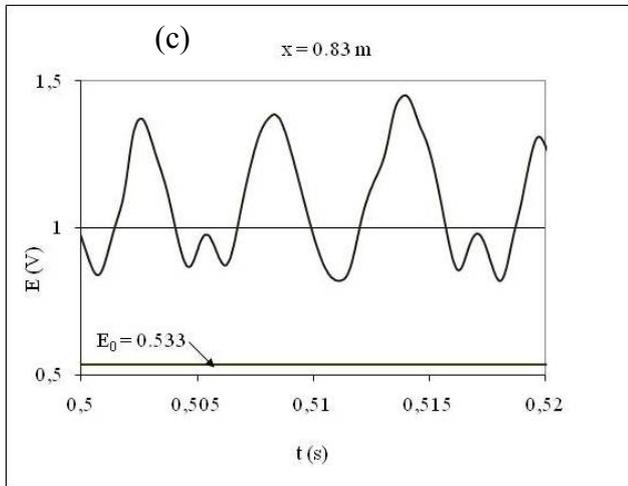
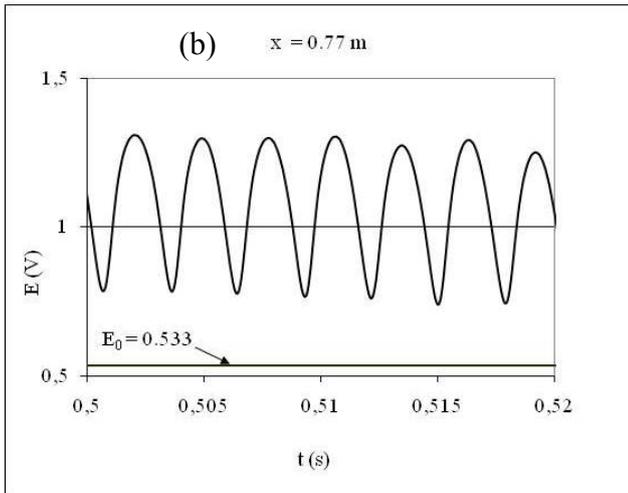
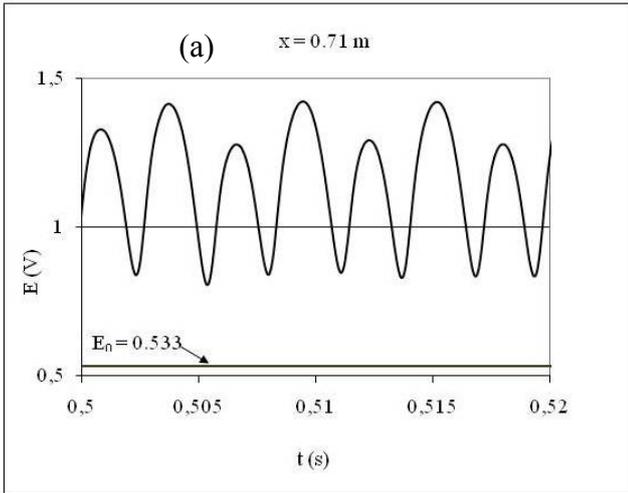


Figure 6 : Signal fil chaud obtenu avec le dispositif B pour une amplitude de tension du haut-parleur $V_{HP} = 12.12$ V et une fréquence $f = 175$ Hz : $x_B = 0.71$ m (a), $x_B = 0.77$ m (b), $x_B = 0.83$ m (c)

4.2 Calibration en amplitude

La technique d'étalonnage en amplitude a été décrite assez brièvement par G. Huelsz [4]. Dans une première étape, le signal de sortie de l'anémomètre $E(t)$ est filtré pour éliminer le bruit électronique. Ensuite tous les maxima locaux, E_{max} , sont extraits du signal et sont indexés de nouveau avant d'être stockés dans un premier tableau de

valeurs. On détermine ensuite la moyenne de ces maxima, $\overline{E_{max}}^0$, ainsi que l'écart-type, σ , par rapport à cette moyenne. Dans une deuxième étape, on élimine tous les maxima locaux E_{max} vérifiant la condition

$$\overline{E_{max}}^0 - \sigma < E_{max} < \overline{E_{max}}^0 + \sigma \quad (4)$$

Une nouvelle moyenne $\overline{E_{max}}$ est alors calculée à partir du nouveau tableau de valeurs. Ainsi, l'amplitude de la tension de sortie de l'anémomètre, E_a , est obtenue en soustrayant la tension de référence E_0 à la moyenne des maxima :

$$E_a = \overline{E_{max}} - E_0 \quad (5)$$

Cette technique permet donc de filtrer l'effet de l'écoulement moyen (naturellement, il ne s'agit pas de supprimer le phénomène physique, mais de rechercher une moyenne des amplitudes maximales de la variation de la vitesse). Ainsi, si le signal de sortie est totalement redressé (ou symétrique), ce qui se produit dans le cas d'un écoulement oscillant autour d'une valeur moyenne quasiment nulle (cas des figures 5 et 6-b), E_{max} est quasiment constant et l'application de cette technique ne change pas sensiblement le résultat.

Les résultats des deux calibrations en amplitudes obtenues à partir des dispositifs A et B sont représentés sur les figures, respectivement, 7 et 8. Notons que les résultats de la figure 7 sont obtenus en faisant varier la fréquence de la source de 5 à 60 Hz en fixant une pression moyenne dans le fluide égale à $p_m = 6$ bars. Les résultats de la figure 8 sont obtenus en faisant varier la tension d'entrée du haut-parleur V_{HP} en fixant la fréquence de l'onde à $f = 191$ Hz. Dans les deux cas, les valeurs de l'amplitude de la vitesse acoustique U_a sont déterminées à l'aide des modèles théoriques cités ci-dessus. Les courbes de tendance (traits continus reliant les points expérimentaux) montrent que la loi de puissance de type loi de King ne peut être utilisée. Toutefois, on retrouve le comportement non linéaire de l'amplitude de la tension de sortie de l'anémomètre en fonction des variations de l'amplitude de vitesse oscillante.

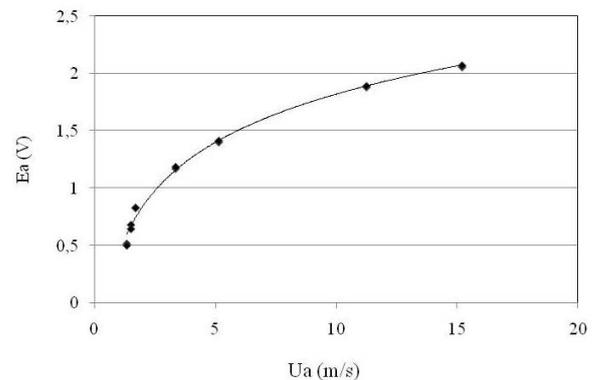


Figure 7 : Courbe d'étalonnage en amplitude obtenue avec le dispositif A pour une pression moyenne $p_m = 6$ bars et des fréquences variables

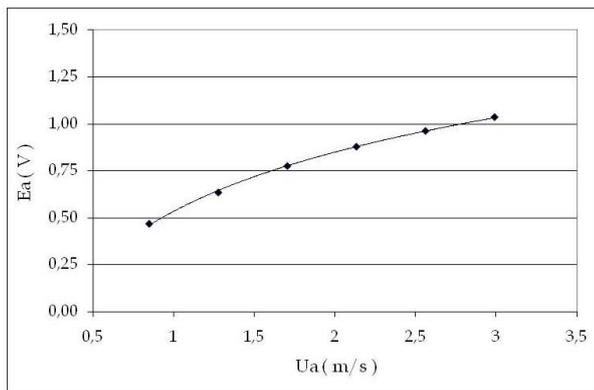


Figure 8 : Courbe d'étalonnage en amplitude obtenue avec le dispositif B pour une fréquence $f=191$ Hz et des niveaux de puissance du haut-parleur variables.

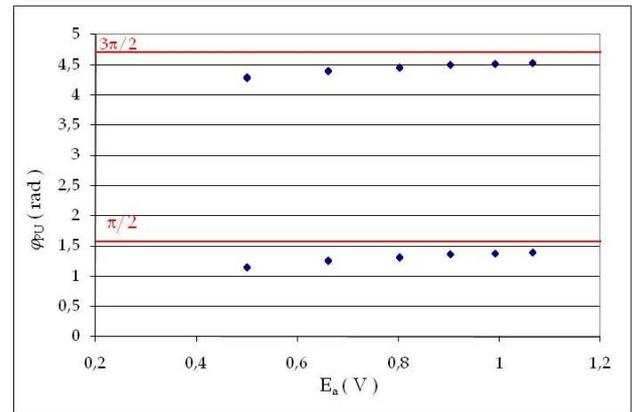


Figure 9 : Courbe d'étalonnage en phase obtenue avec le dispositif B pour une fréquence $f=191$ Hz et des niveaux de puissance du haut-parleur variables

4.3 Calibration en phase

L'étalonnage en phase est réalisé de la façon suivante : Soit φ_p la valeur positive de la phase mesurée à l'aide du spectre FFT à la fréquence fondamentale (f) du signal de pression enregistré au niveau du microphone 2. Soit φ_U la phase mesurée par la même technique à la fréquence double ($2f$) du signal redressé de l'anémomètre. Comme l'anémomètre ne peut pas distinguer le sens de la vitesse, il existe deux valeurs possibles de la phase de celle-ci : une première valeur positive φ_{U1} à la fréquence ($2f$) divisée par deux. La deuxième φ_{U2} est égale la valeur de φ_{U1} augmentée de la valeur π . Ainsi l'expérience fournit deux valeurs du déphasage entre le signal de pression et le signal de vitesse, $(\varphi_{pU})_{exp1}$ et $(\varphi_{pU})_{exp2}$, où φ_{pU} est défini par

$$\varphi_{pU} = \varphi_p - \varphi_U \quad (6)$$

Si l'on considère uniquement les valeurs positives de φ_{pU} , celles-ci devraient être, dans l'hypothèse d'une onde stationnaire pure et en négligeant les effets d'inertie thermique, égales à $\pi/2$ et $3\pi/2$. En pratique, les valeurs mesurées sont différentes des valeurs théoriques en raison du déphasage introduit par la chaîne de mesure, en particulier par l'anémomètre, et en raison des effets d'inertie thermique dans le fil et dans le fluide même. La figure 9 représente le déphasage φ_{pU} en fonction de l'amplitude de tension de sortie de l'anémomètre, E_a , pour différentes tensions du haut-parleur et pour une fréquence donnée $f=191$ Hz. Ces résultats montrent que, pour les faibles amplitudes de tension de sortie, $(\varphi_{pU})_{exp1}$ et $(\varphi_{pU})_{exp2}$ varient légèrement avec l'amplitude pour atteindre des valeurs constantes proches des valeurs théoriques, respectivement, $\pi/2$ et $3\pi/2$. Les écarts observés pour les faibles amplitudes sont probablement dus aux erreurs liées au redressement du signal fil chaud pour les faibles oscillations. Cependant, en comparaison avec les résultats obtenus par G. Huelsz and al [4], ces résultats confirment que l'écart entre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales, noté θ_b , est le même pour les deux valeurs de $(\varphi_{pU})_{exp1}$ et $(\varphi_{pU})_{exp2}$.

5 Conclusion

Ce travail, s'appuyant sur une étude précédente, est une approche au premier ordre portant sur la faisabilité de la technique d'anémométrie à fil chaud afin de mesurer les vitesses acoustiques pour des champs acoustiques aussi bien de faibles comme de fortes intensités. Elle a permis de confirmer certaines observations telles que le comportement non linéaire de l'amplitude de la tension de sortie de l'anémomètre en fonction de l'amplitude de la vitesse acoustique. La réponse des signaux de fil chaud montrent que ceux-ci ne sont pas toujours totalement redressés. Ils présentent, occasionnellement, des profils dissymétriques mettant en évidence la présence d'écoulements secondaires moyens, à caractère ergodique, aussi bien pour les forts que les faibles niveaux acoustiques. En dépit de la présence de ces écoulements moyens, les résultats montrent que la méthode dite « Moyenne des maxima » s'avère un outil satisfaisant pour filtrer le signal de sortie de l'anémomètre et d'en déduire une technique de calibration considérée, à notre sens, suffisamment fiable pour mesurer l'amplitude de la vitesse oscillante. La technique de calibration en phase appliquée dans le cas du dispositif B pour une fréquence donnée et différentes puissances du haut-parleur s'avère aussi prometteuse. Cependant, son application pour une puissance donnée et des fréquences variables mérite clairement plus de mesures et d'analyse théorique compte tenu de la complexité du transfert de chaleur en régime dynamique autour du fil chaud.

Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre du GDR 3058 THERMOACOUSTIQUE. Les auteurs tiennent à remercier Mme H. Bailliet du laboratoire LEA à Poitiers ainsi que Messieurs V. Bourdin, G. Defresne, M. Firdaouss et P. Gougat du laboratoire LIMSI à Orsay pour les nombreuses discussions fructueuses.

Références

- [1] Perry AE., "Hot-wire Anemometry", *Oxford University Press*, New York, 9-15 (1982).

- [2] Elger D. F., Adams R. L., "Dynamic hot-wire anemometer calibration using an oscillating flow", *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 22, 166-172 (1989).
- [3] Lebedeva IV., Dragan SP., "Calibration of hot-wire anemometer in sound fields", *Dantec information*, 10, 12-13 (1991).
- [4] Huelsz G., López-Alquicira F., "Hot wire anemometry in acoustic waves", *Experiments in Fluids*, 30, 283-285 (2001).
- [5] Persoons T., Hoefnagels A., Van den Bulck E., "Calibration of an oscillating hot-wire anemometer for bidirectional velocity measurements", *Experiments in Fluids*, 40, 555-567 (2006).
- [6] Swift G. W., "Thermoacoustic engines", *J. Acoust. Soc. Am.*, 84 (4), 1145-1180 (1988).
- [7] Jebali F., Lubiez J. V., François M. X., "Response of a thermoacoustic refrigerator to the variation of the driving frequency and loading", *Int. J. Refrig.*, 27, 165-175 (2004).
- [8] Lubiez J. V., Jebali F., François M. X., "Experimental Investigation of Heat Pumping in Thermoacoustic Refrigerator", *Advances in Cryogenic Engineering*, 45 A, 143-149 (2000).
- [9] Bailliet H., Lotton P., Bruneau M., Gusev V., "Coupling between electrodynamic loudspeakers and thermoacoustic cavities", *Acustica- Acta-Acustica*, 86, 363-373 (2000).