



**HAL**  
open science

# ANALYSE DU DECLENCHEMENT D'UN MOTEUR THERMO ACOUSTIQUE PAR INTERFEROMETRIE HOLOGRAPHIQUE MULTI-ECHELLE

Pascal Picart, Guillaume Penelet, Mathieu Leclercq, Igor Kostyrko, Thibault  
Wassereau

► **To cite this version:**

Pascal Picart, Guillaume Penelet, Mathieu Leclercq, Igor Kostyrko, Thibault Wassereau. ANALYSE DU DECLENCHEMENT D'UN MOTEUR THERMO ACOUSTIQUE PAR INTERFEROMETRIE HOLOGRAPHIQUE MULTI-ECHELLE. 3ème rencontre francophone d'holographie numérique appliquée à la métrologie des fluides, Nov 2014, Ecully, France. hal-01112621

**HAL Id: hal-01112621**

**<https://hal.science/hal-01112621>**

Submitted on 3 Feb 2015

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License

# ANALYSE DU DECLENCHEMENT D'UN MOTEUR THERMO ACOUSTIQUE PAR INTERFEROMETRIE HOLOGRAPHIQUE MULTI-ECHELLE

Pascal Picart

Université du Maine, CNRS UMR 6613, LAUM, Avenue Olivier Messiaen, 72085 LE MANS Cedex  
9, France

[pascal.picart@univ-lemans.fr](mailto:pascal.picart@univ-lemans.fr)

Guillaume Penelet, Mathieu Leclercq, Igor Kostyrko, Thibault Wassereau

Université du Maine, CNRS UMR 6613, LAUM, Avenue Olivier Messiaen, 72085 LE MANS Cedex  
9, France

[guillaume.penelet@univ-lemans.fr](mailto:guillaume.penelet@univ-lemans.fr), [thibault.wassereau@gmail.com](mailto:thibault.wassereau@gmail.com), [Mathieu.Leclercq.Etu@univ-lemans.fr](mailto:Mathieu.Leclercq.Etu@univ-lemans.fr), [igorkostyrko@gmail.com](mailto:igorkostyrko@gmail.com)

## MOTS CLES

Thermo acoustique, holographie numérique, mesure de phase, traitement d'images, densité de l'air

## RÉSUMÉ

Cet article présente un dispositif d'interférométrie holographique avec deux longueurs d'ondes et deux capteurs d'images, dont les cadences d'acquisitions sont différentes, pour caractériser les auto-oscillations générées dans un moteur thermo acoustique à onde stationnaire. Les résultats expérimentaux devraient permettre une meilleure compréhension des mécanismes complexes de transfert de chaleur non stationnaire qui gouvernent le régime dynamique dans de telles machines.

## I. INTRODUCTION

Les machines thermo acoustiques possèdent plusieurs avantages comparativement aux systèmes actuellement disponibles : simplicité (bas cout), robustesse (pas d'éléments mobile, efficacité raisonnable (certaines machines peuvent atteindre 40% du cycle de Carnot), miniaturisation possible, etc. Elles utilisent également des fluides non polluants. De telles machines sont étudiées depuis 30 ans [1] avec l'espoir qu'elles pourraient être une alternative crédible pour relever les challenges énergétiques et environnementaux dans un futur proche. Dans ce champ disciplinaire de recherche, l'analyse expérimentale est cruciale, car un grand nombre d'aspects fondamentaux ne sont pas encore bien connus. Ainsi, il est incontournable de développer des techniques de mesure pour accéder à des informations qui ne peuvent pas être fournies par des mesures classiques au microphone. Dans ce contexte, cet article présente une méthode d'holographie numérique pour caractériser le phénomène thermo acoustique, en particulier les effets à l'extrémité du stack et de l'échangeur de chaleur. L'intérêt pour l'holographie est que le mesurande primaire est la phase optique qui est directement reliée à la densité de l'air, ce qui diffère des mesures obtenues avec des sondes de type Laser Doppler Velocimetry ou Particle Image Velocimetry [2,3]. L'objectif du travail reporté dans cet article est d'étudier les variations de densité de l'air induite par des oscillations acoustiques, à proximité du bord chaud du stack dans le résonateur thermo acoustique. En particulier, nous

sommes intéressés par le régime transitoire d'overshoot et de saturation du à l'instabilité thermo acoustique. Nous pensons que ces travaux pourraient conduire à une meilleure compréhension des phénomènes de transport de chaleur et de masse qui sont responsables de la dynamique complexe des auto-oscillations acoustiques au-delà du seuil.

## II. DISPOSITIF THERMO ACOUSTIQUE

Une photographie représentant un système thermo acoustique est montrée sur la Fig. 1. Le système est constitué d'un tube en verre (diamètre 52 mm, longueur 49 cm) ouvert en espace libre à une extrémité et fermé par une paroi rigide à l'autre extrémité. Cette paroi est équipée d'un microphone. Dans le tube est placé le "stack", qui est une céramique de longueur 48 mm et diamètre 52 mm constituée de micro pores de taille 0,9 mm×0,9 mm.

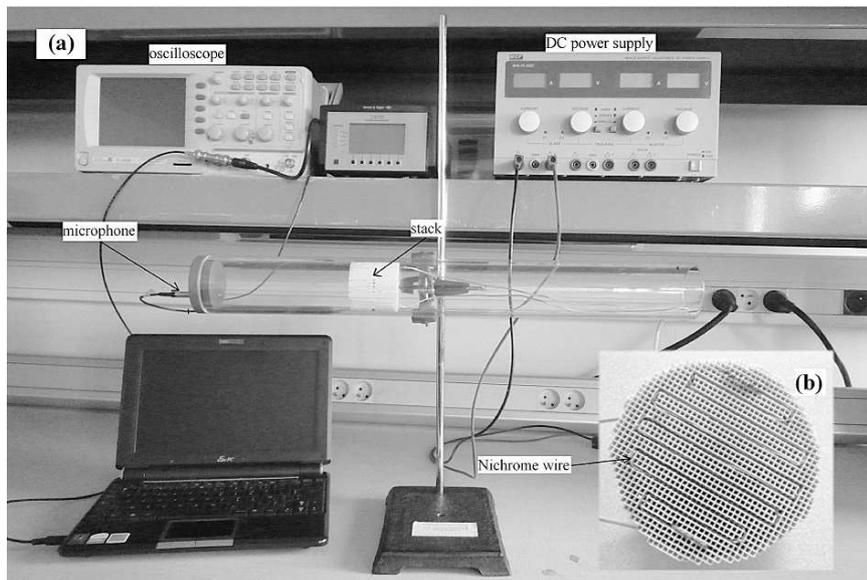


Figure 1: photographie du résonateur thermo acoustique

Un fil chauffant est collé à l'extrémité du stack face à la paroi de fond de cavité du guide d'onde acoustique. La résistance est alimentée par une tension continue pour générer un gradient de température le long du stack. Au delà d'un certain seuil de puissance de chauffage, une instabilité est établie, qui génère une onde acoustique auto-oscillante, avec un fort niveau sonore et une fréquence donnée par la longueur du tube en verre (mode quart d'onde). Ce système simple a en fait un comportement physique très complexe. Par exemple, en fonction de la position du stack et de la puissance de chauffage dans le tube, l'instabilité thermo acoustique peut déboucher soit sur un régime auto oscillant avec une amplitude stable et finie, soit sur un régime instable de relaxation de burst acoustiques à haute amplitude [4]. A ce jour, le mécanisme responsable de la transition d'un régime stable vers un régime instable n'est pas clairement identifié, et très peu de résultats expérimentaux suggèrent que ce processus pourrait être lié à des mécanismes de transport de chaleur induits par l'onde acoustique, et opérant avec un temps caractéristique différent de celui de l'amplification de l'auto oscillation acoustique. Ainsi, nous sommes intéressés par l'analyse par holographie des variations d'indice de réfraction dans une région localisée près du stack, où les gradients de températures sont les plus élevés, et à deux échelles de temps différentes (« courte » et « longue »). L'utilisation de deux longueurs d'ondes permettra également d'étudier si du chromatisme dans l'air chaud pourrait être mis en évidence et utilisé pour séparer les fluctuations de température des fluctuations de pression acoustique.

### III. DISPOSITIF HOLOGRAPHIQUE

Le dispositif expérimental d'interférométrie holographique multi échelle est décrit Fig. 2. L'interféromètre est arrangé en configuration hors-axe et le traitement des hologrammes est similaire à celui décrit dans [5]. Deux lasers continus de 300 mW à 532 nm et 660 nm sont utilisés pour éclairer le guide d'onde en proximité du bord chaud du stack. Deux caméras sont utilisées : l'une pour les temps longs est un 3CCD « lent » à 5 Hz avec 1360×1024 pixels de taille 6,45µm, et l'autre est une caméra CMOS « rapide » à 1000 Hz avec 1024×1024 pixels de taille 14,8µm pour étudier les oscillations rapides. Le capteur rapide est déclenché lorsque l'auto-oscillation acoustique augmente, après un certain laps de temps durant le régime transitoire (typ. 50 Pa).

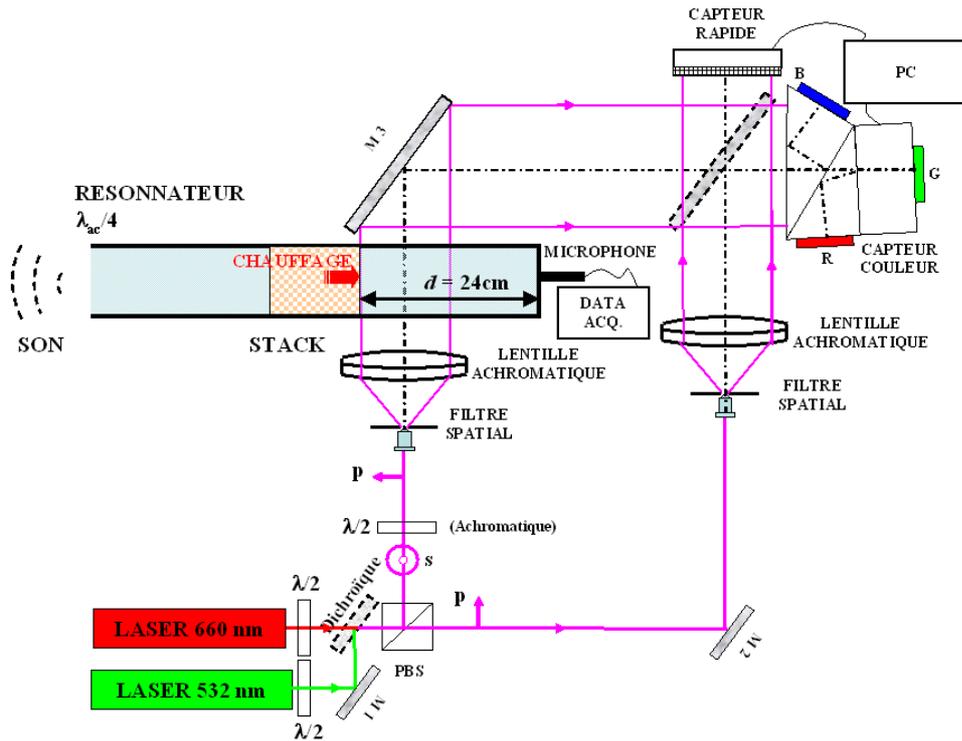


Figure 2: dispositif holographique numérique multi-échelle

La quantité donnée par la mesure holographique est la phase optique entre le faisceau de référence et le faisceau sonde qui traverse le guide d'onde acoustique. Cette différence de phase est liée aux variations d'indice de réfraction près du stack. La différence de phase entre un état dit de « référence » et un état dit « instantané », à tout instant  $t$ , est liée à la différence de chemin optique par cette relation :

$$L(n_0(x, y, t) - n_0^{ref}(x, y, t)) = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\varphi \quad (1)$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $L$  est la longueur de la section de mesure,  $n_0$  est l'indice de réfraction pour l'état « excité » et  $n_0^{ref}$  est celui de l'état « référence ». La différence de phase est liée à l'indice par la relation de Gladstone-Dale. Ainsi, la valeur moyenne de la densité de l'air intégrée sur le trajet optique (longueur  $L$ ) est obtenue par :

$$\langle \rho \rangle = \frac{2}{3\hat{r}} \frac{\lambda}{2\pi L} \Delta\varphi \quad (2)$$

Dans l'Eq. (2),  $\hat{r}(\lambda)$  est la réfractivité spécifique et dépend de la longueur d'onde. A 288K, on a  $\hat{r} = 0,1516 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  pour  $\lambda = 509,7 \text{ nm}$  pour le domaine visible (cette valeur ne change pas significativement,  $\sim 0,0036 \times 10^{-3}$  pour les longueurs d'ondes entre 408 nm et 703,4 nm).

Il découle donc que la mesure du champ acoustique par holographie fournit directement la densité, et fournit ainsi une information complémentaire à celle donnée par les autres moyens de mesure (LDV, PIV, fil chaud, fil froid). De plus, l'utilisation d'un microphone en fond de cavité permet de mesurer indépendamment la pression acoustique à l'intérieur du résonateur. C'est précisément cette approche qu'avaient suivi Wetzell et Hermann lors de, historiquement, la première application de l'holographie à la thermo acoustique [6,7].

## IV. RESULTATS EXPERIMENTAUX

### IV.1 Montée en température

Les premiers résultats expérimentaux présentés dans cet article concernent la montée en température devant le stack, et avant que l'onde acoustique se déclenche. De la mesure de densité, on peut déterminer la température à l'aide de Eq. (2) et de la loi des gaz parfaits qui lie pression, température et densité. Dans ce cas, on suppose que la pression est constante le long de l'axe optique. La Fig. 3 montre la variation de température extraite des mesures avec les lasers rouge et vert (resp. courbes rouges et verte). La courbe noire montre la mesure donnée par un thermocouple inséré dans la cavité près du stack. La zone observée est très proche du stack, et la mesure de température calculée sur un voisinage de  $50 \times 10$  pixels, qui correspond à la zone 1 sur la Fig. 4. La dynamique mesurée par holographie durant le chauffage montre la même évolution que celle obtenue par le thermocouple, bien qu'il n'y ait pas de coïncidence exacte des deux courbes. Ceci est dû à l'intégration axiale le long du chemin optique dans la mesure holographique, alors que le thermocouple fournit une mesure ponctuelle. La température étant fortement inhomogène dans la section du tube, la mesure holographique est inférieure à celle donnée par le thermocouple. On note également que la mesure à deux longueurs d'ondes ne montre pas de chromatisme significatif qui aurait pu être très utile pour dissocier les effets de température des effets acoustiques.

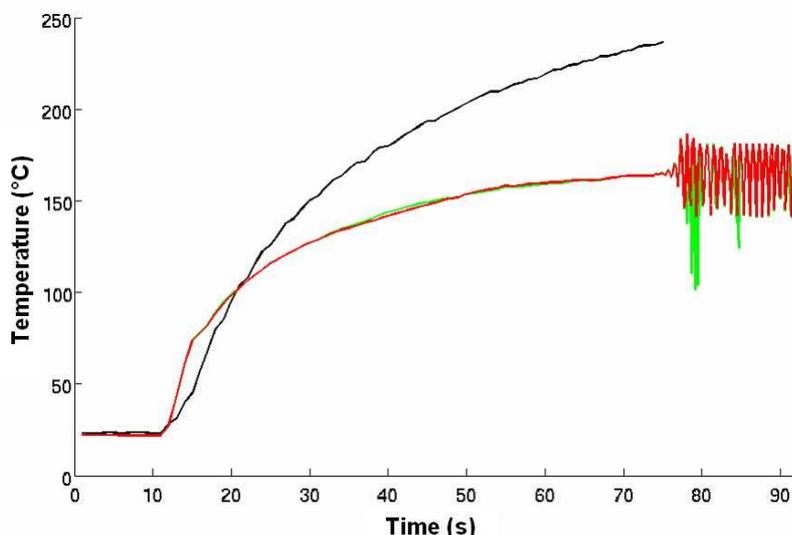
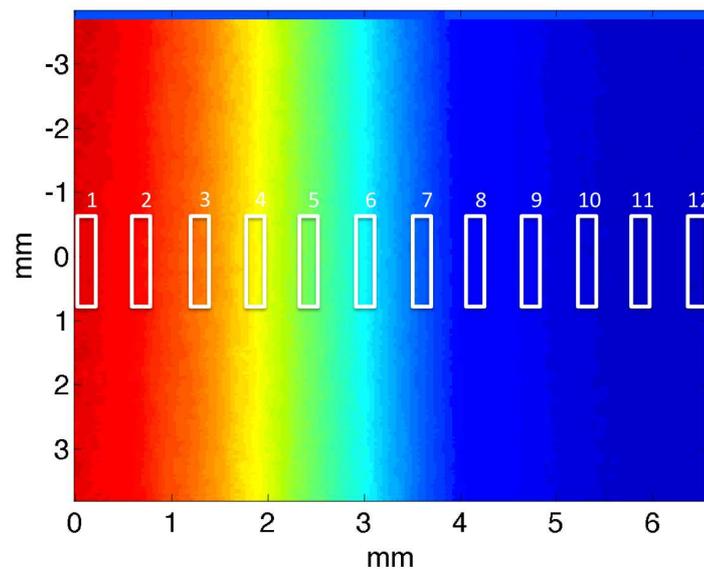


Figure 3: évolution de la température proche du bord chaud du stack (zone 1) pendant le chauffage transitoire



**Figure 4:** exemple de champ de température mesuré pendant le chauffage (12 zones sont sélectionnées pour le traitement des évolutions temporelles)

#### IV.2 Régime de déclenchement simple

A  $t \approx 70-75$  s durant le chauffage, l'instabilité acoustique prend place. Rapidement un overshoot apparaît à  $t \approx 78$  s, suivi par une stabilisation du niveau acoustique (Fig. 3, partie droite des courbes). A partir de  $t \approx 77$  s, les hologrammes numériques sont enregistrés avec la camera rapide durant 4 s, à une cadence de 1000 Hz.

La Fig. 5 montre l'évolution temporelle de la densité de l'air durant la croissance de l'onde acoustique, à différentes distances du bord chaud du stack, pour les zones 3, 6, 9, et 12 (cf Fig. 4). Le temps démarre à  $t = 0$  s, mais il correspond physiquement à  $t \approx 77$  s (cf Fig. 3). La Fig. 5 montre des variations locales significatives de la densité. Ceci indique que l'extrémité du stack génère des effets de bord qui sont certainement responsables des effets aérodynamiques complexes.

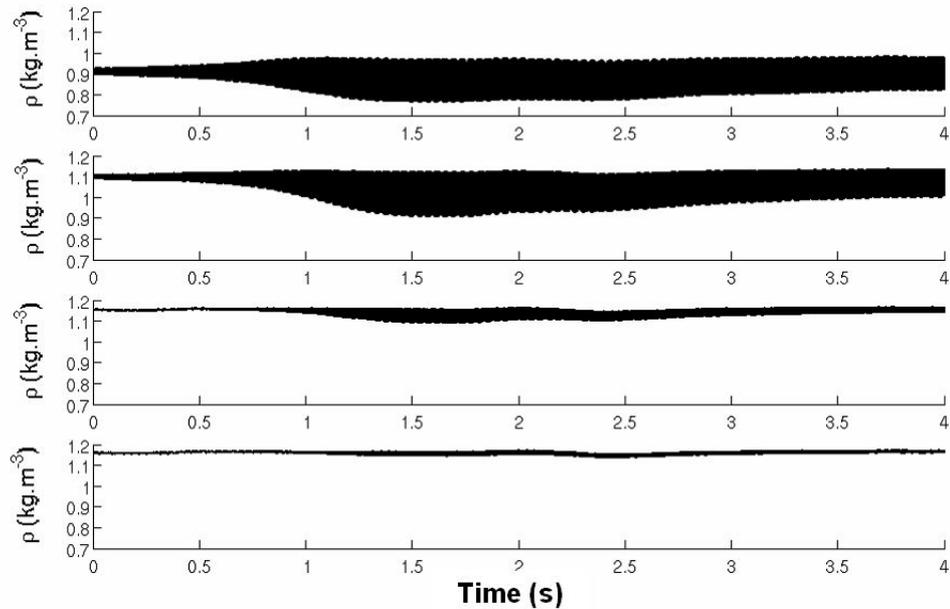


Figure 5: évolution temporelle de la densité dans les zones 3, 6, 9, 12 (du haut vers le bas)

La Fig. 6 montre les spectres de puissances des signaux acoustiques de la Fig. 5. Ces spectres montrent la présence d'harmoniques d'ordre élevés, particulièrement lors de l'établissement de l'onde acoustique. Le fondamental est à 174 Hz et les harmoniques d'ordre 2, 3 et 4 sont respectivement aux fréquences 348 Hz, 478 Hz et 303,2 Hz, puisque les harmoniques 3 et 4 replient. Une composante basse fréquence suggère que la densité est soumise à une évolution lente qui pourrait être due à un transport de chaleur complexe induit par l'onde acoustique.

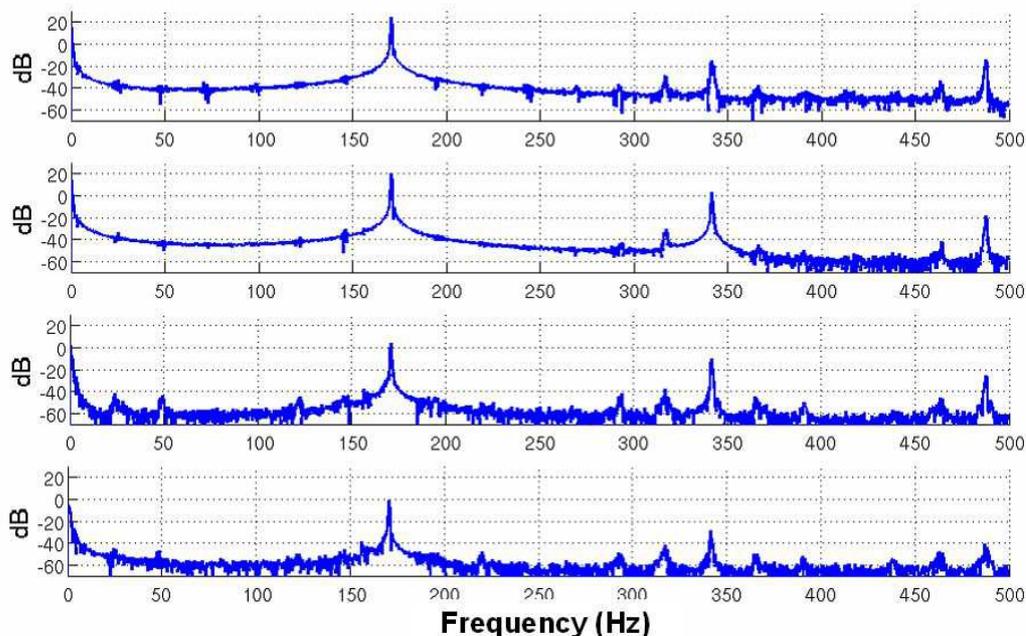


Figure 6 spectre de puissance des évolutions temporelles des densités dans les zones 3, 6, 9, 12 (du haut vers le bas)

## CONCLUSIONS

Cet article présente une technique holographique numérique multi-échelle pour caractériser un moteur thermoacoustique. Les temps « longs » et « courts » sont enregistrés. Les temps « longs », enregistrés avec une caméra lente, permettent l'étude de la montée en température en proche paroi du bord chaud du stack. Les temps « court », enregistrés avec une caméra rapide, permettent de mesurer la croissance de l'onde acoustique et d'analyser les spectres de puissance des variations temporelles de densité. Les résultats expérimentaux montrent des effets de bord significatifs près de l'extrémité chaude du stack, qui indiquent ainsi qu'un phénomène de transport existe.

## REMERCIEMENTS

Ces travaux sont financés par l'Agence Nationale de la Recherche sous la convention n°ANR 2010 BLAN 0302.

## REFERENCES

- [1] Swift G.W. (2009). Thermoacoustics engines. *Journal of the Acoustical Society of America* **84**.
- [2] Berson A. & Blanc-Benon P. (2007). Nonperiodicity of the flow within the gap of a thermoacoustic couple at high amplitudes. *Journal of the Acoustical Society of America* **122**.
- [3] Berson A., Michard M., & Blanc-Benon P. (2009). Vortex identification and tracking in unsteady flows. *Comptes Rendus Mécanique* **337**.
- [4] Guedra M., Penelet G. & Lotton P. (2014). Experimental and theoretical study of the dynamics of self-sustained oscillations in a standing wave thermoacoustic engine. *J. Appl. Phys.* **115**.
- [5] Desse J.M., Picart P., & Tankam P. (2008). Digital three-color holographic interferometry for flow analysis. *Optics Express* **16**.
- [6] Wetzel M. & Herman C. (2000). Experimental study of thermoacoustic effects on a single plate part i: Temperature fields. *Heat and Mass Transfer* **36**.
- [7] Wetzel M. & Herman C. (1999). Experimental study of thermoacoustic effects on a single plate part ii: Heat transfer. *Heat and Mass Transfer* **35**.