

CFA/VISHNO 2016

Analyse expérimentale par vibrométrie laser des propriétés acoustiques des cavités irrégulièresF. Mbailassem^a, Q. Leclere^b, E. Gourdon^c et E. Redon^a^aLVA - Insa de Lyon, 25 bis Av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France^bLabCom P3A, Bâtiment St. Exupéry 25 bis av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France^cENTPE, 3 Rue Maurice Audin, 69120 Vaulx En Velin, France

fulbert.mbailassem@insa-lyon.fr



LE MANS

L'expérimentation est un élément clé dans la recherche scientifique et est essentielle dans le monde industriel car elle permet d'authentifier le raisonnement et la démarche scientifiques théoriques. Elle consiste à manipuler des données des grandeurs physiques mesurées au moyen des capteurs. C'est ainsi qu'en acoustique, on se sert souvent des microphones pour mesurer la pression. Cependant, il se trouve que dans certaines situations, l'utilisation des microphones est difficile ou impossible. C'est le cas des cavités irrégulières avec de très petites zones difficilement accessibles avec ces derniers. Pour proposer une réponse à ce problème, nous avons choisi d'utiliser la réfractovibrométrie, une technique non conventionnelle pour la mesure de la pression acoustique. Le vibromètre est un outil destiné en principe à la mesure des vibrations des structures. Toutefois, se basant sur son principe de fonctionnement, lorsque certaines conditions sont réalisées, il peut être employé pour mesurer la pression acoustique dans un milieu donné. Ce papier présente le développement de la réfractovibrométrie pour la mesure de pression avec quelques exemples de validation de la technique. Elle permet surtout de valider de façon expérimentale, la théorie de la localisation jusque là difficile à mettre en œuvre avec simplement des microphones.

1 Introduction

Durant ces dernières décennies, un intérêt particulier a été porté aux cavités à géométries irrégulières pour leurs propriétés acoustiques. Beaucoup d'études théoriques [1, 2] ont montré que de telles cavités exhibent quelques modes acoustiques dont l'énergie est confinée dans une petite région de la cavité. Ce phénomène particulier qui porte le nom de Localisation ne se manifeste pas dans les cavités à géométries régulières. Cependant, sa mise en évidence expérimentale demeure encore un challenge [3]. En effet, compte tenu des dimensions très petites des zones de localisation, il est parfois impossible d'y introduire un microphone pour en prélever la pression. En plus, lorsque cela est possible, l'intrusion d'un microphone pourrait perturber le champ acoustique. Ce phénomène serait de surcroît accompagné d'une dissipation de l'énergie sonore, d'où la nécessité de le vérifier expérimentalement pour d'éventuelles applications de contrôle du bruit surtout en espace clos.

De ce qui précède, l'analyse expérimentale des cavités irrégulières nécessite d'utiliser un moyen de mesure de pression non intrusif ou moins encombrant. Ainsi, s'inspirant des travaux antérieurs, nous avons fait le choix d'une méthode moins classique pour mesurer la pression : la réfractovibrométrie ou vibrométrie laser à effet Doppler. C'est une technique optique souvent utilisée pour mesurer les vibrations de structures. Zipser [4, 5] fait partie des premiers à proposer des conditions particulières à respecter pour utiliser le vibromètre laser comme moyen de mesure de pression. Cette technique innovante est ensuite utilisée dans quelques situations où l'utilisation des microphones a montré ses limites [6, 7]. Dans ce papier, le principe de fonctionnement de la vibrométrie laser classique pour mesurer la vitesse vibratoire et les dérivations qui en découlent pour la mesure de la pression seront présentés. La technique sera ensuite appliquée pour valider la théorie sur le phénomène de localisation par géométrie irrégulières. Pour cela des cartographies expérimentales du champ de pression de quelques cavités acoustiques seront présentées et discutées ainsi que l'indicateur de localisation de chacune de ces cavités. Expressément, nous avons choisi de ne pas aborder ici la théorie de localisation que le lecteur peut trouver dans les références [1, 2] et dans d'autres références qu'elles contiennent.

2 Théorie sur le principe de mesure du vibromètre laser par effet Doppler

Le vibromètre Laser à effet Doppler, en anglais « Laser Doppler Vibrometer (LDV) » est un outil de mesure sans contact des systèmes vibrants. Il est doté d'un transducteur optique permettant de déterminer la vitesse et le déplacement des vibrations émises par un point donné. Le LDV présente l'avantage d'être non intrusif, ce qui permet de s'affranchir de certains problèmes de contact tels que la masse ajoutée constatée avec les accéléromètres. En plus, avec sa version à balayage en anglais Scanning Laser Doppler Vibrometer (SLDV), le vibromètre permet d'inspecter de larges surfaces donnant ainsi avec précision le champ vibratoire total d'un objet sous investigation de façon automatique et cela souvent avec un temps réduit. Enfin, le SLDV opère avec une haute résolution spatiale et est doté de performances métrologiques élevées telles que sa bande fréquentielle qui peut atteindre 200kHz , une gamme de vitesse pouvant dépasser $\pm 10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ avec une résolution d'environ 8nm pour le déplacement et de $0.5\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ en vitesse [8] pour certaines gammes actuellement disponibles sur le marché. Le principe de fonctionnement du SLDV est basé sur l'effet Doppler implémentée par la technologie d'interférométrie optique.

2.0.1 Effet Doppler

Le principe utilisé dans le vibromètre laser est l'effet Doppler. L'effet Doppler désigne le phénomène physique se manifestant par le décalage de fréquence d'une onde acoustique ou électromagnétique entre la mesure à l'émission et la mesure à la réception lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps. En effet, lorsqu'une onde de fréquence f_e est émise par une source mobile, elle sera reçue par un observateur immobile placé en un point donné avec une fréquence f_r différente de f_e . Le décalage fréquentiel ou le glissement de fréquence entre les deux points dépend de la vitesse de la source mobile. Dans le fonctionnement du vibromètre, un rayon laser monochromatique est envoyé sur la surface à analyser. Il est ensuite renvoyé par cette dernière vers le vibromètre. Si la surface vibre, le vibromètre reçoit le rayon réfléchi avec une fréquence différente de celle du rayon émis. Si la surface vibre avec une vitesse v alors le glissement Δf entre les deux fréquences est donnée en fonction de cette vitesse par la relation (1) où λ correspond à la longueur d'onde émise.

$$\Delta f = f_r - f_e = \pm 2 \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

2.0.2 Interférométrie

Dans l'étude des phénomènes ondulatoires, on parle d'*interférences* lorsque deux ondes cohérentes se rencontrent et interagissent. Les interférences ont souvent lieu avec les ondes lumineuses mais aussi avec les autres ondes électromagnétiques sans oublier les ondes sonores. Pour mesurer ou visualiser les interférences on utilise des appareils appelés interféromètres dont le principe de fonctionnement est appelé *interférométrie*. Ainsi, lorsque deux ondes lumineuses par exemple d'intensités respectives I_1 et I_2 interfèrent, il en résulte une onde dont l'intensité totale I [9] est donnée par l'équation (2).

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi) \quad (2)$$

L'équation (2) montre que l'intensité lumineuse résultant de l'interférence de deux ondes cohérentes n'est pas seulement égale à la somme de leurs intensités respectives mais vaut cette dernière modulée par un terme souvent appelé terme d'interférence ($2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi)$). C'est la quantité $\Delta\phi$ contenue dans ce terme qui porte l'information caractéristique des interférences. Elle traduit la différence de phase entre les deux ondes qui interfèrent et est proportionnelle à la différence entre leurs chemins optiques l_{op1} et l_{op2} (3) [10].

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(l_{op1} - l_{op2}) \quad (3)$$

L'intensité totale issue de l'interférence varie en fonction de la différence de phase entre les deux ondes. Si nous supposons que les deux ondes interférentes ont la même intensité I_0 alors l'expression (2) se réduit à la forme (4). Un photodétecteur placé dans la zone d'interférence donnera une cartographie avec des franges fortement éclairées correspondant aux interférences constructives et des franges faiblement éclairées voire sombres correspondant aux interférences destructives. Ces sont ces franges qui seront démodulées par des méthodes optiques et numériques pour donner la vitesse ou le déplacement de la structure.

$$I = 2I_0 + 2I_0 \cos(\Delta\phi) \quad (4)$$

Dans l'équation (3), le déphasage est exprimé en fonction de la différence de chemins d'optiques entre les deux ondes qui interfèrent. Il convient de préciser cette quantité qui doit être distinguée du chemin géométrique. En effet, lorsqu'une onde lumineuse se déplace d'un point A à un autre point B séparés par une distance géométrique L alors elle parcourt un chemin optique l_{op} donné la relation (5).

$$l_{op} = \int_{AB} n dL = \int_L n dL \quad (5)$$

n est l'indice de réfraction du milieu traversé par l'onde optique. Si l'indice de réfraction est constant ($n = n_0$) alors l'équation (5) se réduit au produit $l_{op} = n_0 L$. C'est le cas dans l'air au repos avec un indice de réfraction voisin de l'unité donnant ainsi un chemin optique égal au chemin géométrique ($l_{op} = L$). Autrement, lorsqu'il est variable dans le temps alors l'indice de réfraction peut être composé d'une partie moyenne n_0 et d'une partie variable dans le temps $\Delta n(t)$ sous la forme $n(t) = n_0 + \Delta n(t)$, ce qui donnerait un chemin optique variable donné par (6).

$$l_{op} = \int_L n dL = n_0 L + \int_L \Delta n(t) dL \quad (6)$$

2.0.3 Principe de mesure du vibromètre à effet Doppler

Le SLDV est construit autour d'un interféromètre comme l'interféromètre de Mach-Zender utilisé dans le vibromètre laser commercialisé par Polytec ©. De par sa construction, ce type d'interféromètre permet d'interférer une onde de référence de chemin optique constant et une onde de mesure réfléchi par l'objet d'étude. Le déphasage entre les ondes lumineuses (3) ou le glissement de fréquence (1) détecté par l'interféromètre est proportionnel à la variation du chemin optique (5), (6) dans le temps. Ainsi la vitesse mesurée par le vibromètre et qui correspond à la dérivée temporelle du chemin optique n'est pas seulement due au mouvement de l'objet réfléchissant mais aussi à la pression acoustique à travers la variation de l'indice de réfraction du milieu comme le montre l'Eq. (7).

$$v = \frac{dl_{op}(\mathbf{x}, t)}{dt} = n_0 \frac{dL}{dt} + \int_L \frac{d\Delta n(t)}{dt} dL = v_g + v_a \quad (7)$$

v_g est la vitesse géométrique correspondant aux variations du chemin géométrique (donc au mouvement de la structure) dans le temps. C'est exactement le cas lorsqu'une structure vibre dans l'air ayant un indice de réfraction constant ou soumis à des variations de très faibles amplitudes. v_a représente en revanche la contribution à la vitesse mesurée due aux variations de l'indice de réfraction donc aux vibrations acoustiques du milieu de propagation du rayon lumineux. Lorsque la structure réfléchissante est soumise à des vibrations, la contribution acoustique est souvent très faible et négligeable devant la composante géométrique de la vitesse mesurée (8). Cette simplification qui est valablement fondée justifie le fait que le vibromètre est presque exclusivement utilisé pour la mesure des vibrations. D'ailleurs, il est considéré de nos jours comme l'un des moyens les plus robustes et le plus performants pour la mesure des vibrations de structures malgré son prix élevé qui constitue son principal inconvénient. Il est même utilisé dans le domaine de la biomécanique [11]. En plus des vibrations, il peut être utilisé pour la mesure des grandeurs acoustiques telles que la pression, à condition que le dispositif respecte un certain nombre de conditions.

$$v \simeq v_g \quad (8)$$

2.1 Principe de mesure de la pression acoustique : la réfractovibrométrie

L'équation (7) montre clairement que la vitesse donnée par un vibromètre laser à effet Doppler, d'une surface réfléchissante ne correspond pas seulement, en toute rigueur, aux mouvements de cette dernière. elle prend en compte les effets dus aux fluctuations de pression. Malheureusement ces effets sont très faibles pour influencer le résultat d'une mesure lorsque la composante géométrique est non nulle. Toutefois, lorsque certaines conditions sont réunies, le vibromètre peut permettre de distinguer la contribution acoustique comme nous allons le voir dans les paragraphes suivants.

2.1.1 Conditions

Zisper [4] est l'un des premiers à proposer des hypothèses et des conditions à respecter afin de pouvoir utiliser le

vibromètre laser pour mesurer la pression acoustique. La première condition peut être déduite de l'équation de la vitesse totale mesurée par l'équipement (7). En raison du fait que la contribution géométrique de cette vitesse domine toujours la contribution acoustique, la première condition nécessaire pour mesurer cette dernière est d'annuler la vitesse structurale. Pour assurer cette condition, il va falloir une surface réfléchissante rigide et immobile. Par ailleurs, une paroi réfléchissante seule est nécessaire mais pas suffisante pour mesurer la pression acoustique en utilisant le vibromètre. Il faut aussi que le champ acoustique sous investigation ainsi que tout le milieu traversé par le rayon lumineux soit transparent à ce dernier et non réfléchissant.

2.1.2 Mesure de la pression acoustique

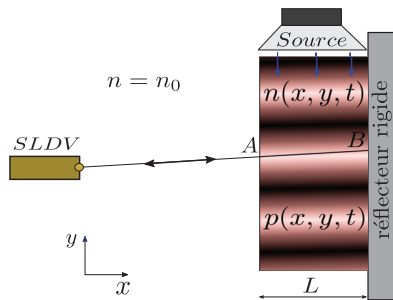


FIGURE 1 – Mesure de pression acoustique par réfractovibrométrie

Le principe de mesure de la pression acoustique par le vibromètre laser est schématisé par la figure 1. Lorsque le milieu transparent (air) traversé par le rayon lumineux d'un vibromètre laser est soumis à une onde acoustique, celle-ci induit une variation de l'indice de réfraction du milieu. Si le réflecteur est strictement rigide et immobile, le vibromètre mesure, en raison de la pression acoustique, une vitesse qui peut être considérée à première vue comme correspondant à un mouvement virtuel de la structure. Cette vitesse n'est rien d'autre que la composante acoustique de l'équation (7), soit $v = v_a$. On montre [12], d'après l'équation (7), que la vitesse mesurée est liée à l'indice de réfraction par l'Eq. (9).

$$v(x, y, t) = v_a = \int_L \dot{n}(x, y, t) dx \quad (9)$$

Pour une onde plane comme celle représentée la figure 1, $\dot{n}(x, y, t)$ peut être constante suivant la direction du laser (x) et l'intégrale de l'Eq. (9) se ramène à la forme réduite donnée par l'équation (10).

$$v(x, y, t) = \dot{n}(x, y, t)L \quad (10)$$

Nous servant de l'équation dite de Gladstone ($n = 1 + \kappa\rho$) liant l'indice de réfraction à la masse volumique ρ et de la relation acoustique adiabatique liant cette dernière à la pression ($p = c^2\rho$), nous avons montré que la vitesse mesurée peut être exprimée en fonction de la pression grâce à l'Eq. (11).

$$v(x, y, t) = K\dot{p}(x, y, t)L \quad (11)$$

κ est la constante de Gladstone tandis K est une constante dépendant de cette dernière et du type de lumière. Pour le laser rouge à l'hélium-néon de longueur d'onde $\lambda = 632nm$,

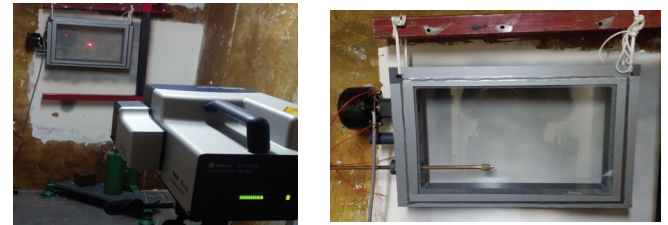
K vaut $2.8 \cdot 10^{-9}$ environ. Si enfin, on considère un régime harmonique tel que $v = Ve^{j\omega t}$ et $p = Pe^{j\omega t}$, on peut déterminer une fonction de transfert H entre la vitesse donnée par le vibromètre et la pression correspondante par l'équation (12).

$$H = \frac{V}{P} = -jL\omega K \quad (12)$$

A l'aide de cette fonction de transfert, on peut reconstruire le champ de pression d'un milieu à partir de vitesse virtuelle d'un réflecteur immobile mesurée par le vibromètre. Nous allons nous servir de ce principe pour mesurer la pression et mener une caractérisation acoustique de certaines cavités.

3 Résultats expérimentaux

3.1 Dispositif expérimental et validation



(a)

(b)

FIGURE 2 – Dispositif expérimental

Nous avons employé la technique de mesure de pression par le vibromètre décrite précédemment pour mesurer la pression dans quelques cavités excitées par une source acoustique. A l'exception de ces cavités, le dispositif expérimental (Cf. photos de la figure 2) est composé d'un vibromètre laser à balayage PSV400 commercialisé par Polytec ©, d'un haut-parleur (chambre de compression) de marque BOUYER (type ZR409a, N° 18062912, 25W, $Z = 16\Omega$) et d'un microphone 1/4 de pouce G.R.A.S., type 40PQ et de sensibilité $0.0115V/Pa$ à $250Hz$.

Pour valider la technique, une comparaison entre la fonction transfert expérimentale et la fonction de transfert théorique (Eq. 12) a été effectuée. Pour cela une cavité rectangulaire de dimensions $0.37 \times 0.5 \times 0.04$ (Fig. 2b) a été excitée par la source sonore avec un bruit blanc. La cavité est faite d'un cadre rectangulaire en plexiglas fermé de deux côtés par deux plaques de verre extra blanc de $6mm$. Une mesure directe de pression en quelques points de la cavité a été réalisée grâce un microphone mobile monté de façon à assurer une certaine étanchéité de la cavité. La vitesse mesurée par le vibromètre aux mêmes endroits a permis de calculer la fonction de transfert. Le résultat de cette mesure est donné sur la figure 3 où sont représentés le module et la phase de H .

La figure 3 montre que la mesure n'approxime le modèle théorique qu'à partir d'une certaine fréquence ($800Hz$ environ). En-dessous de cette fréquence, la mesure est assez bruitée. Ce problème dont nous n'appréhendons pas encore clairement tous les contours pourrait toutefois avoir les explications suivantes. Premièrement, la cavité serait probablement perturbée par les vibrations des plaques de verre dans les basses fréquences. Ensuite, on penserait que

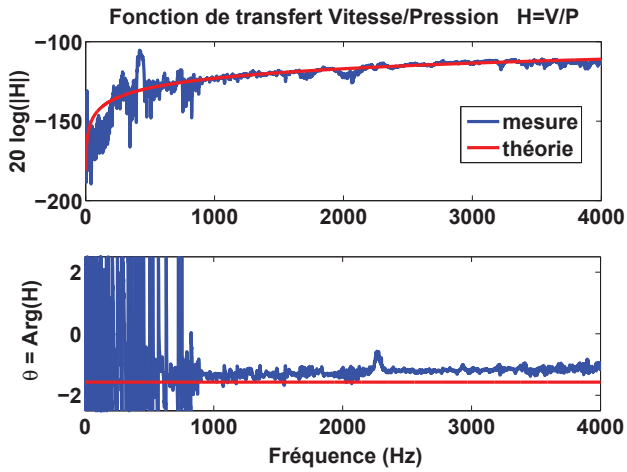


FIGURE 3 – Courbe de transfert entre la vitesse du vibromètre et la pression de microphone

dans les basses fréquences, compte tenu des dimensions de la cavité, le niveau d'excitation n'est pas suffisant pour que les variations de l'indice de réfraction soit clairement identifiées par le système de mesure. Cette sous-excitation pourrait provenir de la bande passante de la source qui est 500Hz à 4500. Enfin, relativement à la dernière explication, si les variations de l'indice de réfraction dans la cavité ne sont pas assez grandes, elles peuvent être du même ordre de grandeur que celles en dehors de la cavité le long du rayon lumineux. Dans ce cas, la mesure pourrait être aussi perturbée par les petites variations de pression en-dehors de la cavité.

3.2 Visualisation de modes acoustiques localisés

Dans le cadre de l'étude du phénomène de localisation, plusieurs cavités ont été analysées expérimentalement grâce à la réfractovibrométrie : la cavité rectangulaire de la figure 2 et une cavité fractale de même volume (Fig. 4).

Excitation: HP



FIGURE 4 – Photographie de la cavité fractale

Ces différentes cavités sont excitées en bruit blanc par la même chambre de compression dans les conditions similaires. Pour chaque cavité, la mesure est réalisée sur la quasi totalité de sa surface dans le plan des vitres, donnant ainsi des cartographies de pression. Certaines de

ces cartographies expérimentales sont comparées à des cartographies théoriques (construites à partir d'un calcul numérique réalisé sous Comsol®) sur la figure 5 pour la cavité fractale et la figure 6 pour la cavité rectangulaire.

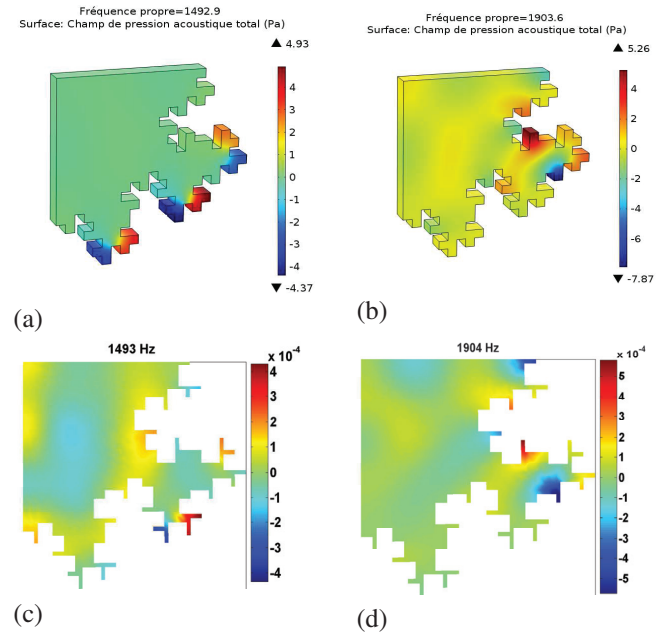


FIGURE 5 – Modes localisés de la cavité fractale

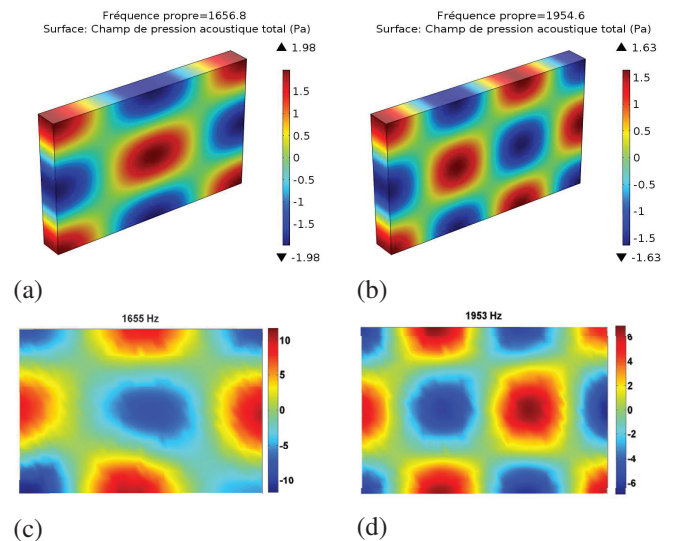


FIGURE 6 – Modes de la cavité rectangulaire

Les cartographies expérimentales de la cavité fractale sont construites avec la fonction de transfert tandis que celles de la cavité régulière représentent le champ de pression déterminé à partir de la relation (12). Toutefois, dans les deux cas, on obtient le même résultat qualitatif à savoir la visualisation des modes acoustiques de cavité. Le vibromètre a permis surtout d'observer de façon expérimentale le phénomène de localisation, chose jusque là assez difficile avec les microphones. Il faut néanmoins noter que, compte tenu de la position de la source, certains modes localisés n'ont pas été excités ou l'ont été très faiblement et donc sont difficilement détectables.

3.2.1 Volume d'existence relatif

Les cartographies expérimentales de la cavité fractale données sur la figure 5 montrent deux modes acoustiques localisés en deux zones différentes. Étant donné que la localisation est un phénomène caractéristique de la géométrie, elle est théoriquement souvent traitée par une analyse modale. Pour savoir si un mode acoustique est localisé ou non, on utilise le volume d'existence relatif (V_{ER}). En effet, pour une cavité de volume V , le V_{ER} est donné par le quotient $V_{ER} = V_n/V$ où V_n est le volume d'existence du mode n de la cavité et est défini par l'Eq. 13.

$$V_n = \left[\iiint_V |\phi_n(X)|^4 dV \right]^{-1} \quad (13)$$

$\phi_n(X)$ est le mode n . Il est normalisé de telle sorte que :

$$\iiint_V |\phi_n(X)|^2 dV = 1$$

Le V_{ER} permet non seulement de savoir si un mode est localisé ou non mais permet également de quantifier le degré de localisation de ce dernier. Ainsi, un mode est dit localisé si son volume d'existence relatif est plus petit (pratiquement inférieur à 0.20 sachant que c'est une grandeur variant entre 0 et 1). Pour confirmer les observations des cartographies précédentes, cet indicateur de la localisation (V_{ER}) a été calculé à partir du champ de pression expérimental mesuré par le vibromètre. Les résultats de ce calcul sont donnés sur la figure 7 où le volume d'existence relatif expérimental est comparé à celui du calcul théorique (numérique).

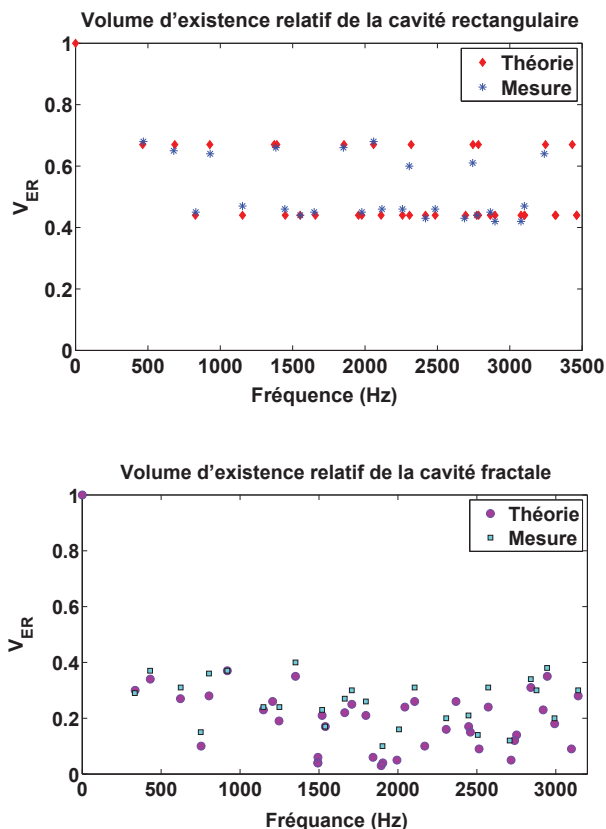


FIGURE 7 – Volume d'existence relatif

Sur les graphes de la figure 7, les valeurs du V_{ER} expérimental de la cavité régulière sont plus proches de celles obtenus par le calcul théorique. Pour la cavité fractale en revanche, il existe des écarts à certaines fréquences. Toutefois, ces résultats permettent de confirmer le fait que les cavités à géométries irrégulières localisent mieux l'énergie que celles qui sont régulières. La figure 8 où les V_{ER} expérimentaux des deux cavités sont comparés montre que le V_{ER} de la cavité fractale est globalement inférieur à celui de la cavité rectangulaire justifiant le postulat que la localisation est un phénomène caractéristique des irrégularités géométriques. De plus, malgré certains de ses modes qui ne sont pas apparus expérimentalement, la cavité fractale exhibe bien une densité modale supérieure à celle de la cavité régulière.

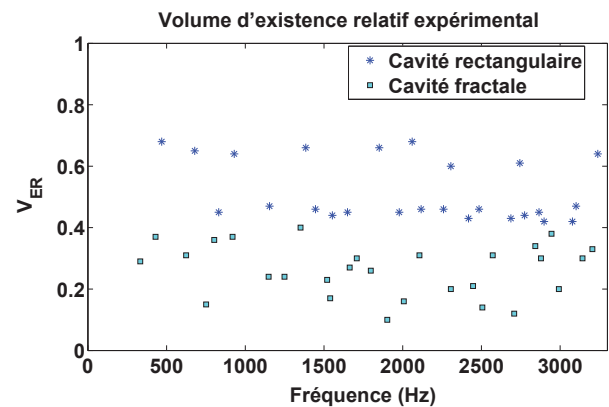


FIGURE 8 – Volume d'existence relatif expérimental des deux cavités

3.3 Discussion

Que ce soit dans la visualisation des modes acoustiques ou dans l'estimation du volume d'existence relatif, la réfractovibrométrie permet d'avoir des résultats qualitatifs acceptables et prometteurs. Cependant, les résultats présentés ici révèlent encore des imperfections qui pourraient expliquer la particularité de cette technique. En effet, l'utilisation du vibromètre laser pour mesurer la pression est une technique non conventionnelle et très contraignante. Vue la faible sensibilité du système aux variations d'indice de réfraction, tout moindre manquement aux conditions d'application de cette technique entraîne de sérieuses perturbations. Cela se traduit souvent par des signaux assez bruités. Un autre problème auquel nous avons été confronté dans ce travail et dans d'autres analyses est le manque d'étanchéité. Toutes les cavités que nous avons utilisées dans ce papier ne sont pas stricto sensu étanches, en l'occurrence la cavité fractale qui est faite d'un assemblage de quatre plaques de plexiglas d'état de surface plus ou moins différent d'une plaque à une autre. Cela a entraîné des fuites plus ou moins importantes et incontrôlables qui seraient à l'origine d'une mauvaise cohérence à certaines fréquences. Malgré ces limites, la réfractovibrométrie présente quelques avantages que n'ont pas les microphones pour la mesure de pression acoustique. C'est par exemple le fait de pouvoir mesurer la pression dans les sous-cavités (de petites dimensions) de la cavité fractale. En outre, cette technique nous a permis de confirmer les

difficultés rencontrées par d'autres auteurs [3] dans l'étude expérimentale du phénomène de localisation. La forte localisation de certains modes fait qu'ils sont difficilement excités par une source sonore placée dans une zone qui est considérée comme un nœud de vibration. C'est en raison de cette difficulté que certains modes n'ont pas été observés sur les cartographies et sur la courbe du V_{ER} .

4 Conclusion

La vibrométrie laser est une technique assez performante de mesure non intrusive de vibration de structures. Lorsque la structure réfléchissante est assez rigide et immobile, la réflectovibrométrie permet de mesurer la pression acoustique lorsque le milieu est transparent au rayon laser. Dans ce papier, elle a été employée pour visualiser les modes localisés d'une cavité fractale donnant ainsi une validation expérimentale du phénomène de localisation. L'indicateur de la localisation (V_{ER}) a été calculé aussi de façon expérimental et a permis de confirmer que certaines cavités irrégulières ont bien ce comportement particulier de confiner l'énergie acoustique dans de faibles zones à des fréquences spécifiques. L'avantage de cet outil est que nous avons pu mesurer la pression dans une sous-cavité de dimension inférieure au diamètre du microphone. En plus de l'accessibilité, la vibrométrie laser peut être utilisée pour la mesure de pression en zones agressives au microphone (chaudes, corrosives, etc.). Malgré son avantage, la mesure de pression par le vibromètre laser est encore onéreuse et exigeante. Elle doit être menée avec minutie car très sensible aux bruits de toute sorte.

5 Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au soutien financier du Labex CeLyA de l'Université de Lyon, géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-10-LABX-0060/ ANR-11-IDEX-0007). Nous tenons à dire aussi un sincère remerciement au technicien du LVA, Patrick BLACHIER pour sa grande contribution dans la réalisation des dispositifs expérimentaux utilisés dans ce travail.

Références

- [1] Simon Félix, Mark Asch, Marcel Filoche, and Bernard Sapoval. Localization and increased damping in irregular acoustic cavities. *Journal of sound and vibration*, 299(4) :965–976, 2007.
- [2] Bernard Sapoval, Olivier Haeberlé, and Stephanie Russ. Acoustical properties of irregular and fractal cavities. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4) :2014–2019, 1997.
- [3] B Hebert, B Sapoval, and S Russ. Experimental study of a fractal acoustical cavity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(3) :1567–1574, 1999.
- [4] L Zipser and S Lindner. Visualisation of vortices and acoustic sound waves. In *Proc. 17th Int. Congr. on Acoustics*, volume 1, pages 24–25, 2001.
- [5] Lothar Zipser and Heinz Franke. Laser-scanning vibrometry for the investigation of sound generation and propagation. In *Sixth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques : Advances and Applications*, pages 209–214. International Society for Optics and Photonics, 2004.
- [6] Cedric Vuye, Steve Vanlanduit, Gert De Sitter, Patrick Guillaume, and Laurens Boeckx. Measurement of normal and oblique incidence absorption coefficients using a scanning laser doppler vibrometer. In *Proc. 19th International Congress on Acoustics-ICA2007, Madrid (Spain), September*, pages 2–7, 2007.
- [7] Lothar Zipser and Heinz H Franke. Refractovibrometry—a novel method for visualizing sound waves in transparent media. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5) :3314, 2008.
- [8] P Castellini, GM Revel, and EP Tomasini. Laser doppler vibrometry : a review of advances and applications. *The Shock and vibration digest*, 30(6) :443–456, 1998.
- [9] Sam Hitchman, Kasper van Wijk, Neil Broderick, and Ludmila Adam. Heterodyne interferometry for the detection of elastic waves : a tutorial and open-hardware project. *European Journal of Physics*, 36(3) :035011, 2015.
- [10] Wikipedia. Laser doppler vibrometer — wikipedia, the free encyclopedia, 2015. [Online ; accessed 7-March-2016].
- [11] Habib Tabatabai, David E Oliver, John W Rohrbaugh, and Christopher Papadopoulos. Novel applications of laser doppler vibration measurements to medical imaging. *Sensing and Imaging : An International Journal*, 14(1-2) :13–28, 2013.
- [12] Nils-Erik Molin and Lothar Zipser. Optical methods of today for visualizing sound fields in musical acoustics. *Acta Acustica united with Acustica*, 90(4) :618–628, 2004.