

Mesure de flux de chaleur dans un réfrigérateur thermoacoustique miniature

G. POIGNAND^a, E. JONDEAU^a, PH. BLANC-BENON^a, E. GAVIOT^b, L. CAMBERLEIN^b, G. PENELET^b

a. Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, UMR CNRS 5509, 36 Avenue Guy de Collongue, 69134 ÉCULLY cedex

b. Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, UMR CNRS 6613, Avenue Olivier Messiaen, 72085 LE MANS

Résumé :

Dans le cadre de la miniaturisation de systèmes thermoacoustiques réfrigérants, un démonstrateur de dimension réduite, muni d'un couple stack-échangeurs de chaleur, qui a la capacité de refroidir un liquide jusqu'à son changement de phase vers l'état solide a été construit. L'évolution temporelle de la température et le flux de chaleur transverse sont mesurés à l'aide de microcapteurs spécifiquement développés. Les premiers résultats expérimentaux sont présentés.

Abstract :

In the framework of the miniaturisation of the thermoacoustic refrigerant systems, a small-scale demonstrator was built with a couple of stack and heat exchangers, which is able to cool down a liquid to its phase change from a liquid phase to a solid phase. The temporal evolution of the temperature and of the transversal heat flux are measured using some microsensors specifically developed. The first experimental results are presented.

Mots clefs : réfrigérateur thermoacoustique, capteur de flux de chaleur, miniaturisation

L'effet thermoacoustique offre la possibilité de convertir l'énergie thermique en énergie acoustique, ou réciproquement. Les réfrigérateurs thermoacoustiques classiques à ondes stationnaires exploitent cet effet dans un empilement de plaques placé dans un résonateur excité à sa fréquence de résonance. Il se traduit par la génération d'un flux de chaleur dont résulte un gradient de température le long de l'empilement de plaques. Deux échangeurs de chaleur sont placés aux extrémités de l'empilement de plaques. Ces échangeurs de chaleur jouent un rôle particulièrement important puisqu'ils permettent le transfert de chaleur vers le milieu extérieur. Les systèmes thermoacoustiques présentent de nombreux avantages par rapport aux systèmes thermiques "classiques" : fluides utilisés non nocifs pour l'environnement, faible coût, absences de parties mobiles, miniaturisation possible... Malgré leur potentiel important dans un large domaine d'applications, leur développement industriel reste limité notamment en raison de leur faible performance. De nombreuses études sont menées en vue de l'optimisation de leur efficacité mais également en vue de leur miniaturisation. Concernant cet aspect, un des objectifs de recherches actuelles est de mettre au point des réfrigérateurs thermoacoustiques miniaturisés à l'extrême dans le but d'évacuer la chaleur des composants électroniques. La miniaturisation des réfrigérateurs nécessite de mettre au point des techniques de fabrications MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) d'une part pour la fabrication des composants du réfrigérateurs (microstacks et microéchangeurs de chaleurs) et d'autre part, pour le développement des microcapteurs spécifiques. Ce dernier point fait l'objet des travaux présentés ici. L'objectif est d'étudier expérimentalement un capteur de flux de chaleur miniaturisable permettant la mesure du flux de chaleur thermique extrait ou rejeté aux échangeurs de chaleur. Leur principe de fonctionnement et leur procédé de fabrication ont déjà fait l'objet de nombreuses publications ([1, 2, 3]) mais ils n'ont pas été testés (à notre connaissance) dans un système thermoacoustique. Dans cette étude, ce capteur est utilisé dans un démonstrateur de réfrigérateur thermoacoustique décimétrique.

Après avoir présenté le démonstrateur de réfrigérateur thermoacoustique dans le paragraphe 1, l'instrumentation du système est décrite dans le paragraphe 2. Les premiers résultats expérimentaux obtenus sont donnés dans le paragraphe 3.

1 Description du démonstrateur

Le démonstrateur de réfrigérateur thermoacoustique, présenté sur la figure 1, a été construit dans l'objectif de disposer d'un prototype de dimension réduite permettant de refroidir un liquide jusqu'à son changement de phase vers l'état solide. Le liquide choisi est du diméthylsulfoxyde ((CH₃)₂SO) dont 1 ml se solidifie à une température de 16°C en une vingtaine de minute.

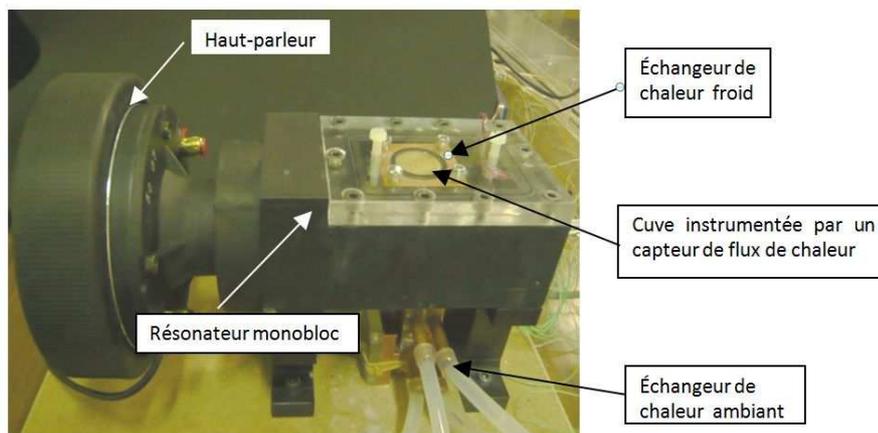


FIGURE 1 – Photographie du démonstrateur de réfrigérateur thermoacoustique.

Le démonstrateur est constitué d'un résonateur raccordé à une extrémité à un haut-parleur électrodynamique à chambre de compression (Monacor MRD 120). Le résonateur est composé de deux parties : un tube de longueur 6.8 cm et de section $3.2 \times 1 \text{ cm}^2$ fermé par un plafond en PVC et un convergent exponentiel de longueur 2.5 cm qui permet l'adaptation entre les sections du tube et du haut-parleur. Le résonateur est construit en un seul bloc par prototypage rapide en plastique ABS lui garantissant ainsi une bonne étanchéité. Sa longueur totale est de 9.3 cm. Un couple échangeur de chaleur-empilement de plaques fabriqué manuellement est disposé à l'intérieur du résonateur.

L'empilement de plaques, de longueur 1 cm, est constitué de feuilles de kapton d'épaisseur 0.15 mm superposées de manière régulière. Les feuilles, de dimension $1 \times 1 \text{ cm}^2$, sont espacées de $300 \mu\text{m}$ (soit environ 2.5 fois l'épaisseur de la couche limite thermique pour l'air à une fréquence de 1000 Hz). Des échangeurs de chaleur sont placés à chaque extrémité de l'empilement. Ils sont constitués de plaques de cuivre de mêmes épaisseur et espacement que les feuilles de kapton utilisées pour le stack et disposées en vis-à-vis.

Une plaque de cuivre est vissée sur la partie inférieure de l'échangeur de chaleur ambiant. Cette plaque est creusée de manière à faire circuler de l'eau à température ambiante pour maintenir sa température constante. L'eau est maintenue en circulation par une pompe péristaltique avec un débit de $30 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$.

L'échangeur de chaleur froid est relié à une cuve de cuivre contenant une goutte de produit à solidifier. Un capteur de flux de chaleur chargé par un disque de laiton est placé dans le fond de la cuve. La goutte de produit repose alors sur ce disque.

Le fluide utilisé est de l'air à pression atmosphérique et à température ambiante. Le haut-parleur à chambre de compression entretient une onde acoustique plane stationnaire dont la fréquence de fonctionnement dépend du mode de fonctionnement du résonateur choisi (quart ou demi-longueur d'onde).

2 Instrumentation du démonstrateur

Cette partie est consacrée à la description des moyens expérimentaux mis en oeuvre dans le démonstrateur afin de caractériser son fonctionnement.

Le niveau de pression acoustique est mesuré à l'extrémité fermée du résonateur par un microphone 1/4" (Bruel & Kjaer, type 4136) affleurant à la paroi. Des thermocouples de type K permettent de mesurer l'évolution temporelle de la température en différents points du système. Des thermocouples sont placés à chaque extrémité de l'empilement de plaques. Ils sont désignés par T_c et T_f respectivement pour la température des cotés chaud et froid. Deux autres thermocouples, désignés par $T_{c\text{HX}}$ et $T_{f\text{HX}}$, mesurent les températures des échangeurs de chaleur chaud et froid à l'intérieur du résonateur. Un cinquième thermocouple, noté T_{HP} est placé dans le résonateur à proximité de la membrane du haut-parleur et permet de contrôler l'échauffement de la température dû au haut-parleur.

Le flux de chaleur extrait à l'échangeur froid est mesuré à l'aide d'un capteur de flux de chaleur de diamètre 2 cm. Ce type de capteur mesure le flux de chaleur échangé entre la face du corps sur lequel il repose et le milieu environnant. Lorsqu'il est chargé thermiquement sur ses deux faces, il mesure le flux de chaleur le traversant. Le fluxmètre est peu intrusif du fait de sa faible épaisseur et donc, ne perturbe pas les échanges thermiques. De plus, ce type de capteur est fabriqué par technologie des circuits imprimés et est miniaturisable. La sensibilité du capteur de flux de chaleur utilisé est de 5 mV/W .

Le flux de chaleur rejeté à l'échangeur de chaleur chaud est calculé à partir de la relation

$$Q_c = \rho C_p U_{eau} \Delta T_{eau},$$

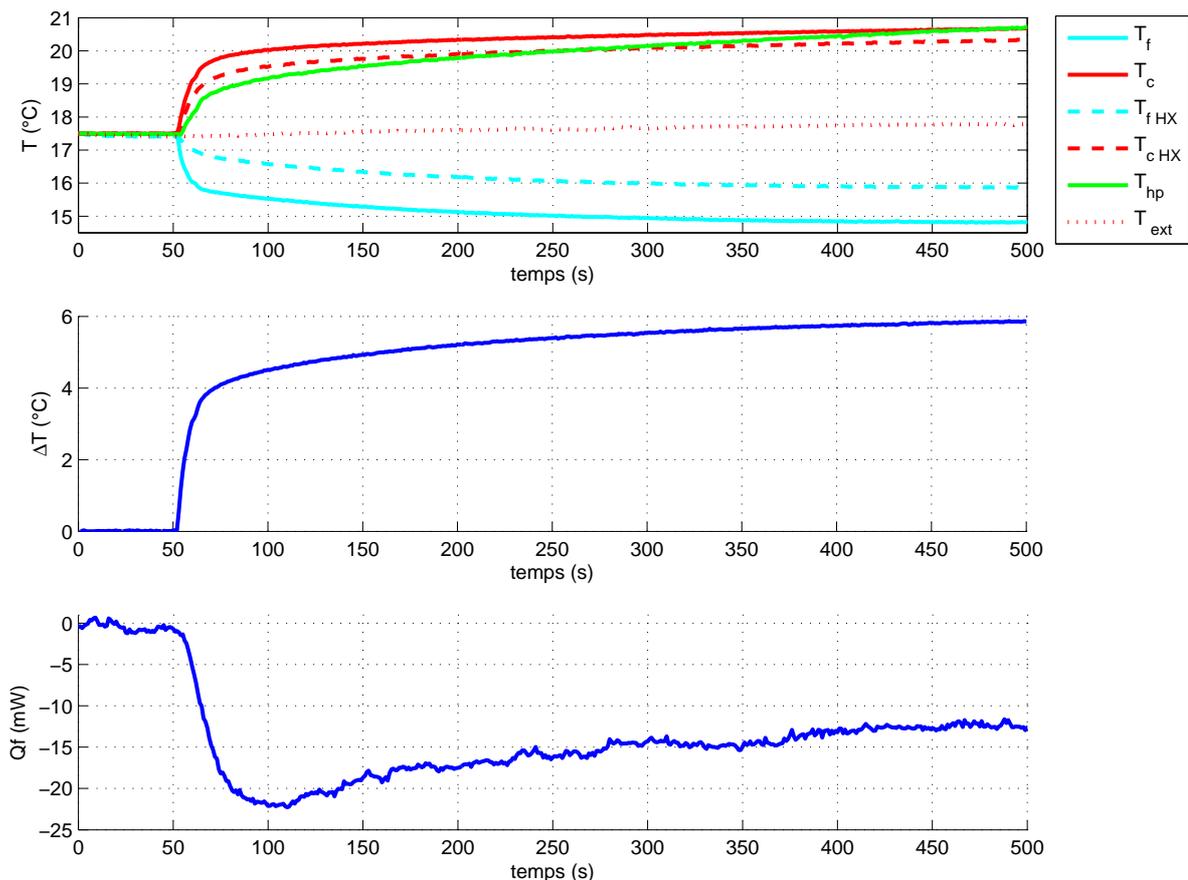


FIGURE 2 – Évolution temporelle des températures dans le système, de la différence de température ΔT et du flux de chaleur Q_f extrait à l'échangeur froid pour une pression acoustique de 5000 Pa et une fréquence de 980 Hz.

avec C_p et ρ la capacité calorifique et la masse volumique de l'eau, U_{eau} le débit de l'eau (donné par la pompe péristaltique) et ΔT_{eau} la différence de température de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur. Cette différence de température est mesurée à l'aide de deux thermocouples de type K.

Notons que l'ensemble des signaux provenant des différents capteurs sont connectés à une carte d'acquisition permettant l'enregistrement des données.

2.1 Résultats expérimentaux

L'objectif de ces expériences est de mesurer le flux de chaleur extrait à l'échangeur froid du démonstrateur thermoacoustique à l'aide d'un capteur de flux de chaleur dans différentes configurations. La configuration pour laquelle la fréquence est de 980 Hz et la pression acoustique de 5000 Pa est d'abord étudiée. La figure 2 représente l'évolution temporelle des températures en différents points du système, de la différence de température ΔT aux extrémités de l'empilement et du flux de chaleur Q_f extrait à l'échangeur froid.

On retrouve les évolutions classiques des températures aux extrémités de l'empilement d'un réfrigérateur thermoacoustique. Les températures évoluent rapidement durant les premières secondes pour se stabiliser lorsque le régime permanent est établi, c'est-à-dire lorsque le flux de chaleur d'origine thermoacoustique est compensé par le flux de chaleur par conduction retour dans les plaques de l'empilement. Les températures $T_{c\ HX}$ et $T_{f\ HX}$ sur les échangeurs de chaleur sont légèrement inférieures aux températures T_c et T_f aux extrémités de l'empilement. La différence de température ΔT en régime permanent est de 6 °C et la température du côté froid de l'empilement diminue de 2.5 °C par rapport à la température ambiante T_{ext} . Le flux de chaleur Q_f a également une évolution très rapide durant les premiers instants où il diminue (indiquant qu'un flux est extrait à l'échangeur froid) jusqu'à -22 mW puis se stabilise aux environs de -12 mW. Ces performances sont suffisantes pour solidifier une goutte de diméthylsulfoxyde. Une expérience avec ce produit sera effectuée prochainement.

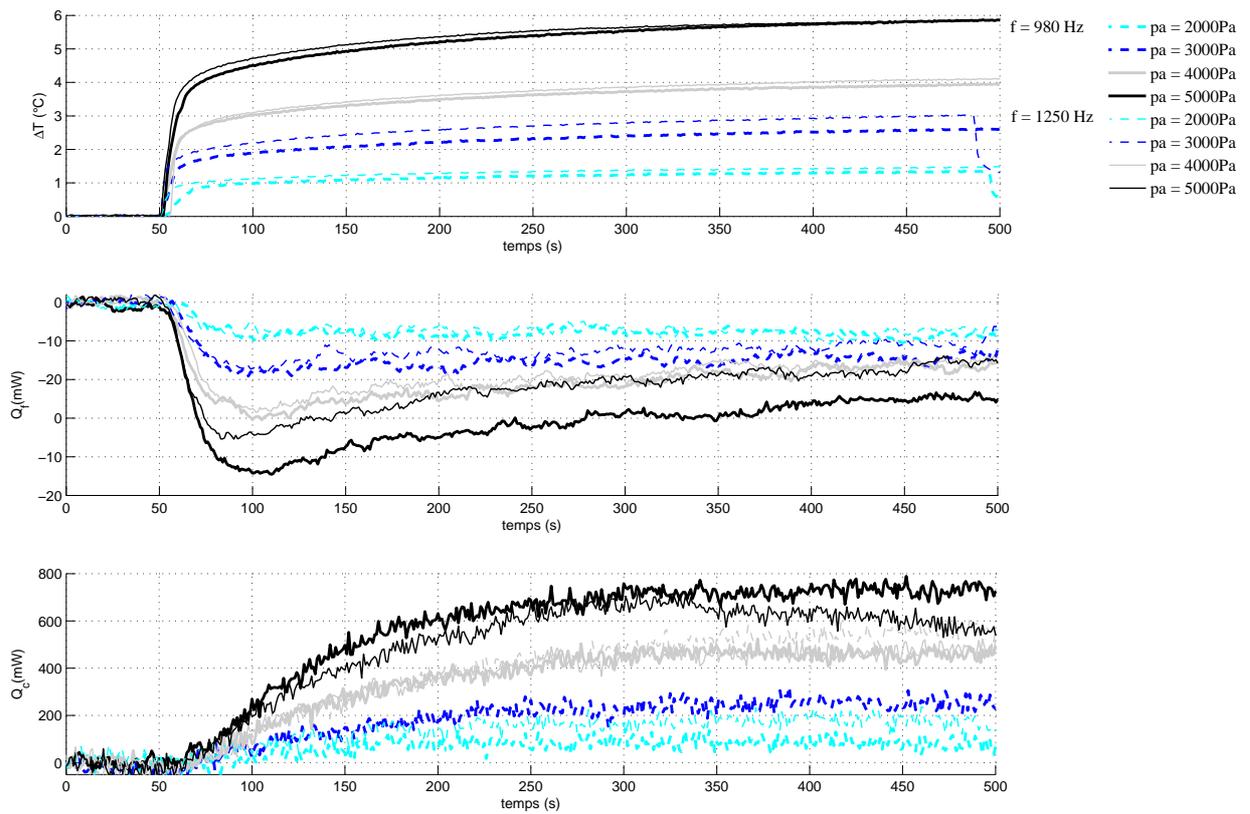


FIGURE 3 – Évolution temporelle de la différence de température ΔT , des flux de chaleur Q_f et Q_c extrait et rejeté aux échangeurs de chaleur pour une pression acoustique variant de 2000 Pa à 5000 Pa et pour une fréquence de 980 Hz et 1250 Hz.

pa (Pa)	$2d_{ac}$ (mm) f= 980 Hz	v_{ac} ($m.s^{-1}$) f= 980 Hz	$2d_{ac}$ (mm) f= 1250 Hz	v_{ac} ($m.s^{-1}$) f= 1250 Hz
5000	1.06	3.28	1.06	4.15
4000	0.835	2.57	0.829	3.25
3000	0.637	1.96	0.632	2.48
2000	0.432	1.33	0.428	1.68

TABLE 1 – Distance $2d_{ac}$ et vitesse particulière v_{ac} dans l’empilement de plaques pour les deux fréquences et les différents niveaux de pressions acoustiques considérés.

Le comportement du système est ensuite étudié pour les deux premières fréquences de résonances (980 Hz et 1250 Hz) en fonction du niveau acoustique. Les évolutions en fonction du temps de la différence de température ΔT , du flux de chaleur Q_f extrait à l’échangeur froid et du flux de chaleur Q_e rejeté à l’échangeur chaud sont présentées sur la figure 3 pour des niveaux de pression acoustique allant de 2000 Pa à 5000 Pa.

Comme attendu, l’augmentation de la pression acoustique entraîne une augmentation de la différence de température ΔT ainsi que des flux de chaleur rejeté et extrait aux échangeurs (en valeur absolue). Ces résultats expérimentaux montrent que le flux de chaleur rejeté vers l’extérieur est supérieur au flux de chaleur extrait à l’échangeur froid en valeur absolue. Par ailleurs, pour l’une ou l’autre des fréquences considérées, les différences de température et les flux de chaleur rejetés sont comparables. Concernant les flux de chaleur extraits, pour des pressions inférieures à 3000 Pa, ils diminuent puis se stabilisent à la même valeur. A 4000 Pa et pour les deux fréquences, ces flux présentent un minimum, 60 s après la mise en fonctionnement de la source acoustique. A 5000 Pa, la valeur absolue du minimum atteint est plus importante pour une fréquence de 980 Hz que pour une fréquence de 1250 Hz.

Comme le montre le tableau 1, pour une fréquence de 1250 Hz la vitesse particulière dans l’empilement est plus importante que pour 980 Hz. Il apparaît donc que pour une forte vitesse particulière dans l’empilement, le flux extrait à l’échangeur froid présente une limitation. L’origine de cette limitation pourrait être la dégradation du transfert de chaleur entre l’empilement de plaques et l’échangeur de chaleur. En effet, des études récentes de Berson et al. [4] et de Besnoin et Knio [5] montrent qu’à fort niveau acoustique, des oscillations des couches de cisaillement apparaissent derrière l’empilement. Ces oscillations augmentent avec l’amplitude de la vitesse particulière et lorsqu’elles se développent, des structures tourbillonnaires se forment et sont expulsées des canaux du stack. Les tourbillons ainsi formés peuvent entrer dans les canaux de l’échangeur de chaleur et modifier le comportement thermique entre le stack et l’échangeur de chaleur. Les travaux de Besnoin montrent que les oscillations des couches limites de cisaillement sont responsables d’oscillations basses fréquences de la puissance réfrigérante du système à une fréquence inférieure à la fréquence de fonctionnement. Les tourbillons peuvent donc détériorer le flux de chaleur extrait. Un critère, est proposé pour déterminer l’apparition des tourbillons

$$2d_{ac} > \frac{2y_0}{0.44}. \quad (1)$$

Il dépend du nombre de Strouhal $St_{2y_0} = 2y_0/\Delta x$ basé sur l’espace $2y_0$ entre les plaques du stack (avec Δx la distance entre deux paires consécutives de tourbillons) et du déplacement particulière d_{ac} .

Dans l’empilement considéré ici, le rapport $\frac{2y_0}{0.44}$ vaut $6.8 \cdot 10^{-4}$. Les distances $2d_{ac}$ sont données dans le tableau 1 pour les deux fréquences considérées et pour les différentes pressions acoustiques. Le critère (1) est vérifié à partir d’une pression acoustique de 4000 Pa. Cela conforte notre hypothèse selon laquelle la formation de tourbillons peut être à l’origine de la limitation du flux de chaleur observée.

Des essais complémentaires pourraient permettre de confirmer cette hypothèse.

3 Conclusion

Des premiers essais de mesures de flux de chaleur extrait à l’échangeur de chaleur froid à l’aide de capteurs de flux effectués dans un démonstrateur de réfrigérateur thermoacoustique sont présentés dans cette étude. Pour une pression acoustique de 5000 Pa et une fréquence de 980 Hz, la température du côté froid diminue de 2.5°C et le flux extrait à l’échangeur de chaleur froid est de 25 mW. L’évolution en fonction du temps du flux de chaleur est mesurée pour différentes pressions acoustiques. A faible niveau acoustique, il diminue très rapidement dans les premiers instants puis se stabilise. A fort niveau acoustique, il atteint un minimum environ une minute après la mise en fonctionnement de la source acoustique. Le flux de chaleur présente une limitation dont l’origine peut être la formation de tourbillons derrière l’empilement de plaques. Des essais complémentaires sont nécessaires afin de comprendre les évolutions temporelles des flux de chaleurs mesurées.

Remerciement

Cette étude a été soutenue par l'ANR dans le cadre du projet MICROTHERMAC NT051-42101. Les auteurs tiennent à remercier Alexandre Azouzi et Horacio Correia pour leur participation à la réalisation du démonstrateur thermoacoustique.

Références

- [1] Yala-Aithammouda M. Etude et réalisation de microcapteurs de flux thermique en technologie silicium. Thèse, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 1987.
- [2] Thery P. and al . Fluxmètre calorifique. Brevet ANVAR, 1979. FR 2 536 536.
- [3] Polet F. Contribution à l'application de la fluxmétrie thermique aux mesures des températures sans contacts at au contrôle des hautes températures. PhD thesis, Université de Lille, 1999.
- [4] Berson A. and Blanc-Benon P. Nonperiodicity of the flow within the gap of a thermoacoustic couple at high amplitudes. *J. Acoust. Soc. Am.*, 122(6), EL122–EL127, 2007.
- [5] Besnoin E. and Knio O. Numerical study of thermoacoustic heat exchangers. *Acta Acustica united with Acustica*, 90, 432–444, 2004.