



**HAL**  
open science

# Mesure de l'atténuation d'une onde acoustique se propageant dans un mélange eau/bulles d'air : bandes de fréquences interdites et passantes

Vincent Duro, Dominique Décultot, Gérard Maze

## ► To cite this version:

Vincent Duro, Dominique Décultot, Gérard Maze. Mesure de l'atténuation d'une onde acoustique se propageant dans un mélange eau/bulles d'air : bandes de fréquences interdites et passantes. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00541389

**HAL Id: hal-00541389**

**<https://hal.science/hal-00541389>**

Submitted on 30 Nov 2010

**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.

# 10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

## Mesure de l'atténuation d'une onde acoustique se propageant dans un mélange eau/bulles d'air : Bandes de fréquences interdites et passantes.

Vincent Duro, Dominique Décultot et Gérard Maze

LOMC FRE CNRS 3102, Université du Havre, Place Robert Schuman, 76610 Le Havre, durov@univ-lehavre.fr

L'étude acoustique du sillage d'un navire de surface peut, dans une approche de laboratoire, se réduire à l'étude de la propagation d'une onde acoustique dans un mélange eau/bulles d'air. Dans une grande cuve d'eau, des microbulles d'air sont générées par l'intermédiaire d'un jet d'eau haute pression. L'atténuation du signal acoustique transmis à travers le nuage de bulles est obtenue à partir de mesures de la réponse impulsionnelle du mélange. L'influence de la fréquence d'émission acoustique est mise en évidence. L'atténuation importante mesurée autour de la fréquence de résonance monopôle des bulles est un phénomène connu. Cette fréquence de résonance est en relation avec la taille des bulles et la valeur de l'atténuation est liée à la concentration de bulles dans le mélange. Dans ce travail, nous mettons en évidence, expérimentalement, des bandes de fréquences interdites et passantes situées en très hautes fréquences. Elles sont obtenues pour de fortes concentrations de bulles. La relation entre l'espacement interbulles et la longueur d'onde d'émission est l'axe de recherche privilégié pour comprendre l'origine de ces bandes.

## 1 Introduction

Au cours de travaux expérimentaux portant sur l'étude acoustique du sillage d'un navire mais plus particulièrement sur l'étude acoustique d'un mélange eau/bulles d'air, les mesures du rayon et de la concentration de bulles dans un tel mélange ont été effectuées [1 - 5]. Pour cela, nous avons développé dans les cuves du laboratoire des méthodes acoustiques de mesure utilisant des fréquences basses mais aussi une méthode optique qui a validé les résultats obtenus acoustiquement. Ces résultats sont aussi en accord avec les travaux d'autres auteurs portant sur le même sujet [6, 7]. Pour les interpréter, une étude théorique sur la relation entre le rayon des bulles et leur fréquence de résonance en basse fréquence a été réalisée [3 - 5]. Une étude théorique en diffusion multiple établissant un nombre d'onde effectif caractérisant la propagation d'une onde acoustique transmise dans ce type de mélange a aussi été utilisée [8, 9]. Une variation de l'atténuation et une variation de la vitesse de phase de cette onde sont obtenues autour de la fréquence de résonance des bulles [1 - 5]. L'importance de ces variations dépend de la concentration de bulles. Ainsi, à partir d'une analyse fréquentielle du signal acoustique de cette onde, le rayon des bulles et leur concentration dans le mélange ont été estimés. L'ordre de grandeur moyen du rayon des bulles a été estimé autour de 40 microns. Un maximum d'environ 200 millions de microbulles par  $m^3$  de mélange a été dénombré.

Cependant, les nombreuses manipulations réalisées dans l'étude acoustique d'un mélange eau/bulles d'air ont permis de remarquer des phénomènes complémentaires. Dans ce papier, nous décrivons, dans un esprit prospectif, un de ces phénomènes. Il s'agit de mettre en évidence l'existence de bandes de fréquences passantes et interdites d'un signal acoustique transmis dans un tel mélange.

Dans une première partie, nous présentons le dispositif expérimental utilisé pour effectuer des mesures de l'atténuation d'une onde acoustique de très hautes fréquences transmise dans un mélange eau/bulles d'air ainsi que le mécanisme de génération des microbulles d'air. Une impulsion acoustique brève est appliquée à différents couples de transducteurs large bande ayant des fréquences centrales respectives de 5 et 10 MHz. Des enregistrements du signal transmis dans le mélange sont effectués durant l'évolution temporelle du nuage de bulles généré. Ainsi, l'évolution de l'atténuation en fréquence du signal transmis est suivie depuis l'injection des bulles jusqu'à la disparition du nuage de bulles.

La seconde partie est consacrée aux résultats obtenus pour un des couples de transducteurs utilisés (10 MHz à l'émission et 5 MHz à la réception) dans une gamme fréquentielle de mesure comprise entre 1 et 15 MHz.

Enfin, ce papier se termine par une discussion et une conclusion dont le but est d'essayer d'expliquer l'origine des bandes de fréquences passantes et interdites.

## 2 Dispositif expérimental

La figure 1 représente le schéma du dispositif de mesures acoustiques utilisé au cours de ces travaux expérimentaux. Les expériences sont conduites dans une piscine cylindrique, faisant 2 m de profondeur et 3 m de diamètre. Elle est remplie d'eau douce sur une hauteur de 1,5 m. Un pistolet jet d'eau haute pression de 70 bars servant à la génération des microbulles d'air *via* un phénomène de cavitation est placé verticalement au centre de la cuve et est immergé dans l'eau [5]. Pendant la génération des microbulles, les signaux mesurés sont erronés à cause de la saturation sonore produite par le jet haute pression. C'est juste après l'injection des microbulles que celles-ci sont les plus nombreuses dans le mélange. Les microbulles montent lentement vers la surface libre de l'eau et collapent. En conséquence, la

concentration de bulles dans l'eau diminue progressivement et prend plusieurs minutes avant de devenir quasi-nulle. Cette technique de génération de bulles ne favorise pas le contrôle des rayons et de la concentration de bulles dans le mélange eau/bulles d'air.

Cependant, une répétitivité des résultats obtenus a été observée pour toutes les expériences menées. Une quasi-régularité du comportement dans le temps des caractéristiques physiques des nuages de bulles générés est donc obtenue.

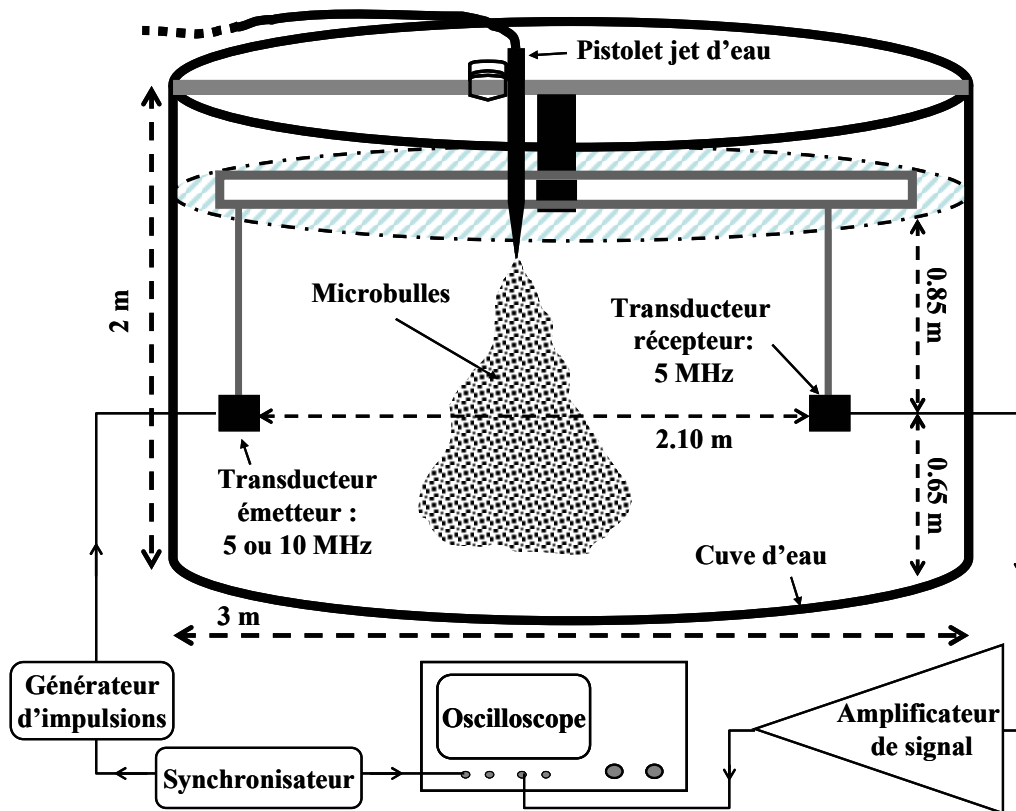


Figure 1 : Schéma du dispositif de mesures acoustiques impulsionnelles en transmission.

La méthode acoustique de mesure impulsionnelle en transmission est utilisée pour mesurer l'atténuation d'un signal acoustique transmis dans le mélange eau/bulles d'air. Elle consiste à générer une impulsion de Dirac qui va permettre d'utiliser l'ensemble de la bande fréquentielle passante des transducteurs. L'appareillage électronique employé pour ce type de mesure comporte un générateur d'impulsions (SOFRANEL PANAMETRICS® 5052 UA) pour l'excitation acoustique, un amplificateur de signal en réception (52 à 92 dB). Un oscilloscope numérique (LECROY® wave Runner 6051, 500 MHz) sert à numériser et enregistrer les signaux reçus. Un générateur de signal (Sony Tektronix AFG320) utilisé en mode « pulse » synchronise l'émission et l'enregistrement des signaux toutes les 0,5 s, aux instants de mesure  $\tau$ . Placés l'un en face de l'autre, distants de 2,1 m et positionnés à une profondeur de 85 cm en dessous de la surface libre de l'eau, deux couples de transducteurs de hautes fréquences sont utilisés. Le premier est constitué d'un transducteur émetteur et d'un transducteur récepteur, large bande de fréquence centrale égale à 5 MHz et de bande de fréquences passantes comprises entre 1 MHz et 11 MHz. Dans le second couple, le transducteur émetteur de 5 MHz est remplacé par un transducteur large bande de fréquence centrale égale à 10 MHz. La bande de fréquences étudiées

avec ce couple de transducteurs est comprise entre 1 MHz et 15 MHz. Les expériences sont réalisées plusieurs fois pour chaque couple de transducteurs afin de constater la répétitivité des mesures. Les signaux temporels enregistrés sont traités à l'aide d'algorithmes de transformée de Fourier et les spectres obtenus sont normalisés par le spectre initial obtenu pour l'eau sans bulle.

### 3 Résultats

Dans ce papier, nous présentons uniquement les résultats obtenus avec un transducteur large bande de fréquence centrale 10 MHz à l'émission et un transducteur large bande de fréquence centrale 5 MHz à la réception.

a) La figure 2 présente des exemples de signaux temporels impulsionnels transmis  $s(t)$  (Fig. 2a), de spectres bruts  $S(f)$  (Fig. 2b) et de spectres normalisés  $T(f)$  (Fig. 2c) obtenus respectivement avant l'injection des bulles ( $\tau = 0$  minute), et pour les instants de mesures  $\tau = 4, 5$  et 10 minutes.

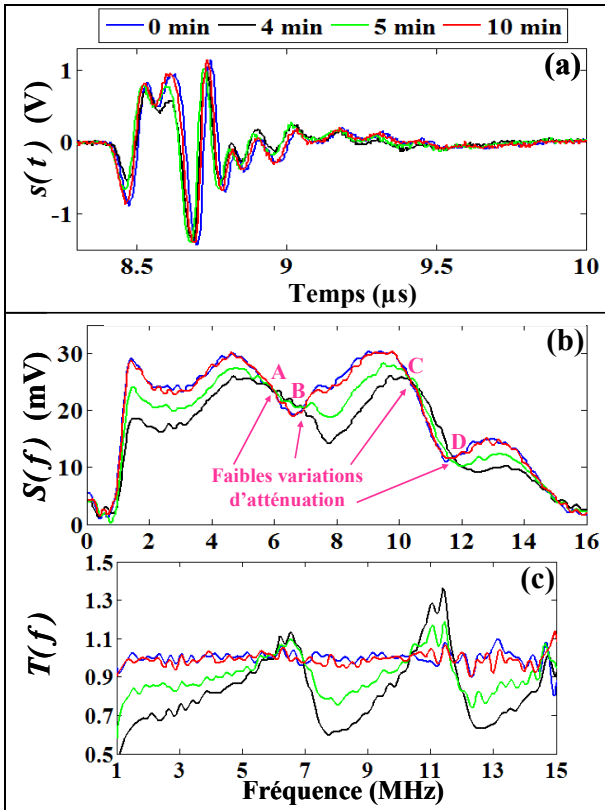


Figure 2 : Courbes, pour différents instants de mesure  $\tau$  de l'expérience, pour une émission avec un transducteur de fréquence centrale de 10 MHz et pour une réception avec un transducteur de fréquence centrale de 5 MHz, : (a) de la réponse impulsionnelle  $s(t)$  du mélange eau/bulles d'air ; (b) du spectre correspondant  $S(f)$  ; (c) du spectre normalisé correspondant  $T(f)$ .

Sur la figure 2a, avant l'injection des bulles, la réponse impulsionnelle obtenue est plus structurée que celle obtenue avec le couple de transducteurs 5 MHz, à cause de la plus large bande couverte et de la différence de fréquence centrale des transducteurs émetteur (10 MHz) et récepteur (5 MHz). Après l'injection des bulles, les réponses impulsionnelles obtenues aux instants de mesure  $\tau = 4, 5$  et 10 minutes ont la même structure que celle obtenue avant injection de bulles mais sont légèrement atténuées et n'ont, semble-t-il, pas de déphasages notables.

Sur la figure 2b, avant l'injection des bulles, le spectre tracé en bleu montre une bande de fréquence passante comprise entre 1 et 15 MHz. Deux maxima d'amplitude sont notés autour de 5 MHz et de 10 MHz, correspondant aux fréquences centrales des deux transducteurs utilisés. En dehors de ces maxima, le niveau moyen d'amplitude reste relativement important sauf en haute fréquence, au-dessus de 11 MHz, où il décroît fortement. Après l'injection des bulles, tous les spectres bruts font apparaître une atténuation régulière sur pratiquement toute la bande fréquentielle. Plus l'instant de mesure est proche de l'injection des bulles (bulles plus nombreuses), plus les

spectres sont atténués. Pour les fréquences correspondant aux points A, B, C et D de la figure, les spectres ont pratiquement la même amplitude.

Sur la figure 2c, les remarques formulées pour la figure 2b se confirment sur les spectres normalisés. L'atténuation est d'autant plus élevée que la concentration de bulles est grande. Nous notons une première bande interdite en basse fréquence entre 1 et 6 MHz, une seconde entre 7 et 10 MHz et une troisième entre 12 et 14 MHz. Nous observons deux bandes passantes entre 5 et 7 MHz et entre 10 et 12 MHz. Nous remarquons, pour ces deux bandes passantes, une amplification de l'amplitude qu'il est difficile d'expliquer. La première bande passante a aussi été observée pour le couple de transducteurs de 5 MHz ce qui conforte le résultat présenté ici [5]. Il semble aussi qu'une bande passante supplémentaire commence à apparaître à partir de 14 MHz. Pour le confirmer, il faut élargir l'étude en plus hautes fréquences.

b) La figure 3 montre l'évolution au cours de l'expérience des spectres normalisés. Les spectres sont superposés les uns à la suite des autres du début à la fin de l'expérience. La période d'injection des microbulles est représentée par une bande blanche qui dure environ 2 minutes. Avant cette bande blanche, nous avons, en couleur jaune-rouge, les spectres obtenus dans l'eau sans bulles. Dans ce cas, de 1 MHz à 15 MHz, l'amplitude des spectres est à la même valeur.

A partir de  $\tau = 3$  minutes, immédiatement après l'injection des bulles, leur concentration dans le mélange est au maximum. Pour  $\tau$  compris entre 3 et 7 minutes l'observation de la figure 3 permet de constater que l'amplitude des spectres normalisés est atténuée dans les bandes de fréquence comprises entre 1 et 6 MHz, entre 7 et 10 MHz et entre 12 et 15 MHz (bleu-vert sur la figure). Par contre, dans les bandes de fréquences comprises entre 6 et 7 MHz, d'une part, et entre 11 et 12 MHz, d'autre part, l'amplitude des spectres est peu ou pas atténuée (jaune-rouge sur la figure), deux bandes de fréquences passantes du mélange sont donc identifiées.

Pour  $\tau > 7$  minutes, les spectres reprennent progressivement leur amplitude initiale. Ce retour à l'amplitude initiale se fait simultanément pour toutes les bandes de fréquences interdites, ce qui tend à penser qu'elles ne seraient pas indépendantes les unes des autres. Nous remarquons aussi que la durée ( $\approx 1$  min) du retour vers l'amplitude initiale est 4 fois inférieure à la durée ( $\approx 4$  min) pendant laquelle les bandes interdites sont observées. Ceci donne l'impression d'un effet de seuil qui nous amène à penser qu'il y aurait une valeur minimale seuil de concentration de bulles au delà de laquelle les bandes interdites apparaissent.

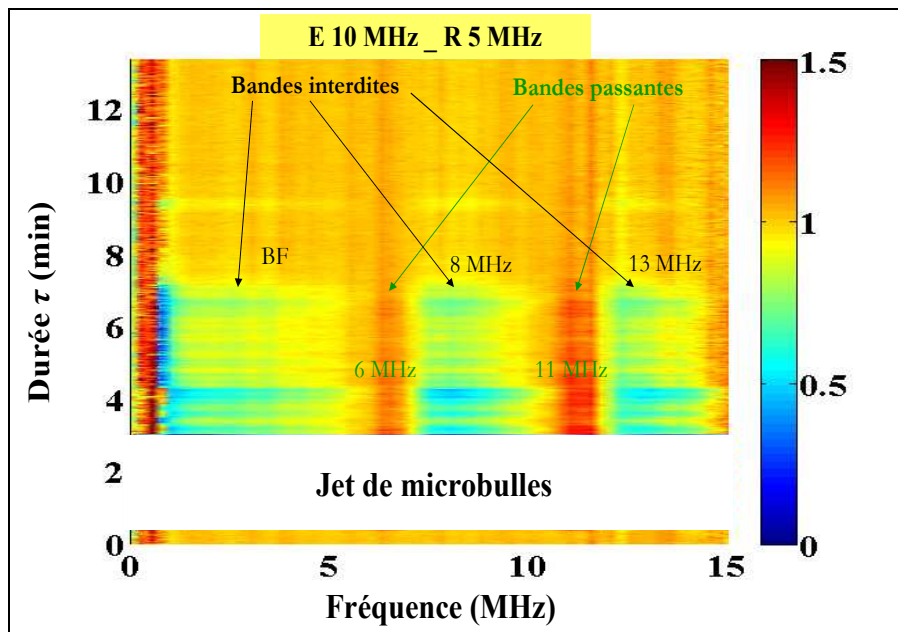


Figure 3 : Evolution, à chaque instant de mesure  $\tau$  de l'expérience, du spectre normalisé  $T(f)$  de la réponse impulsionnelle du mélange eau/bulles d'air, pour une émission avec un transducteur de fréquence centrale de 10 MHz et une réception avec un transducteur de fréquence centrale de 5 MHz.

#### 4 Discussion et conclusion

L'étude de la transmission d'une impulsion acoustique dans un mélange eau/bulles d'air avec plusieurs couples de transducteurs hautes fréquences, a mis en évidence des bandes de fréquences passantes et interdites liées à la présence d'une forte concentration de bulles d'air. Deux bandes de fréquences passantes sont distinguées autour de 6,5 MHz et autour de 11 MHz. Les bandes de fréquences interdites sont situées en dessous de 6 MHz, autour de 8 MHz et autour de 13 MHz.

Les milieux à diffusion multiple peuvent faire apparaître des bandes de fréquences interdites et passantes. En effet, dans sa thèse, Robert [10] a étudié théoriquement et expérimentalement la propagation en diffusion multiple d'une onde acoustique dans un milieu solide élastique contenant des inclusions cylindriques d'air ou d'eau rangées spatialement en réseau ou aléatoirement. Il montre que les bandes de fréquences interdites et passantes dépendent du rayon des cylindres, de la distance entre eux et de leur concentration dans le milieu hôte. Une étude théorique de Kafesaki [11] sur les mélanges eau/bulles d'air prouve que les effets de diffusion multiple sont responsables de l'apparition de larges bandes de fréquences interdites dans la transmission d'une onde acoustique à travers un nuage de bulles dans l'eau réparties en réseau ou même fortement désordonnées en rayon et en position. Dans le même registre, nous pouvons aussi citer les travaux numériques de Ruffa [12] qui lient, pour une répartition spatiale désordonnée des bulles, les bandes interdites et passantes à la distance interbulle moyenne du mélange.

Dans des précédents travaux [5], nous avons estimé, par une méthode optique, les distances interbulles sur une image de bulles. Les bulles étaient générées avec le même système et dans des conditions peu différentes de celles du

présent papier. Le rayon moyen des bulles a été évalué à environ 31  $\mu\text{m}$  pour un instant de mesure proche de l'injection des bulles (les plus importantes concentrations de bulles). Le nombre de bulles était d'environ 170 millions par  $\text{m}^3$  de mélange, au même instant de mesure. La distance interbulle moyenne a été évaluée à 1 mm. Cependant, sur l'image étudiée, nous avons constaté que la distance interbulle pouvait, selon la localisation des bulles dans le nuage, évoluer tant vers une valeur minimale d'environ 0,3 mm que vers une valeur maximale d'environ 2 mm.

La bande de fréquence étudiée dans le présent travail est comprise entre 1 MHz et 15 MHz, soit des longueurs d'onde comprises entre 0,1 mm et 1,5 mm. Nous pouvons ainsi remarquer que les longueurs d'onde émises évoluent dans une gamme de valeur qui est du même ordre de grandeur que celle des distances interbulles potentielles. Bien que nous ne puissions pas encore expliquer ce phénomène, il semble qu'il y ait un lien entre la longueur d'onde émise, la distance interbulle et la localisation en fréquence des bandes interdites et passantes.

#### Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier la DGA Techniques Hydrodynamiques de Val de Reuil (Bassin d'Essais des Carènes) et la région Haute-Normandie pour le support financier qu'ils ont apporté à ce travail.

#### Références

- [1] V. Duro, D. Décultot et G. Maze, "Experiment on acoustic wave propagation in a bubbly water : Frequency influence", *153<sup>rd</sup> Acoustical Society of America Meeting*, Salt Lake City, USA, June 2007.

- [2] V. Duro, D. Décultot et G. Maze, "Multiple scattering of acoustical waves in a bubbly liquid medium : Comparison between theoretical and experimental results," *Proceedings of the Institute of Acoustics Meeting of the International Conference on Detection and Classification of Underwater Targets*, Edinburgh, Scotland, 97-104, September 18-19 2007.
- [3] V. Duro, D. Rajaona, D. Décultot et G. Maze, "Acoustical and optical measurements on a mixture of air microbubbles in water," *ECUA Acoustics' 08*, Paris, June 29 - July 4 2008.
- [4] V. Duro, D. Rajaona, D. Décultot, G. Maze, "Experimental Study on Sound Propagation through Bubbly Water : Comparison with Optical Measurements," *IEEE J. Ocean. Eng.*, submitted (2009).
- [5] V. Duro, "Caractérisation acoustique d'un sillage engendré par un navire de surface : Propagation d'une onde acoustique dans un mélange eau/bulles d'air", Thèse de doctorat, Université du Havre (2009).
- [6] J. Mobley, J. N. Marsh, C. S. Hall, M. S. Hughes, G. H. Brandenburger and J. G. Miller, "Broadband measurements of phase velocity in Alunex<sup>®</sup> suspensions," *J. Acoust. Soc. Am.* **103**(4), 2145-2153 (1998).
- [7] J. N. Marsh, C. S. Hall, M. S. Hughes, J. Mobley, J. G. Miller and G. H. Brandenburger, "Broadband through-transmission signal loss measurements of Alunex<sup>®</sup> suspensions at concentrations approaching *in vivo* doses," *J. Acoust. Soc. Am.* **101**(2), 1155-1161 (1997).
- [8] L. L. Foldy, "The multiple scattering of waves," *Phys. Rev.* **67**, 107-119 (1945).
- [9] E. L. Carstensen and L. L. Foldy, "Propagation of sound through a liquid containing bubble," *J. Acoust. Soc. Am.* **19**, 481-501 (1947).
- [10] S. Robert, "Propagation d'ondes cohérentes et résonances dans des milieux élastiques présentant des inclusions cylindriques périodiquement ou aléatoirement distribuées," Thèse de Doctorat, Université du Havre (2004).
- [11] M. Kafesaki, R. S. Penciu and E. N. Economou, "Air bubbles in water : A strongly multiple scattering medium for acoustic waves," *Phys. Rev. Lett.* **84**(26), 6050-6053 (2000).
- [12] A. Ruffà, "Acoustic wave propagation through periodic bubbly liquids," *J. Acoust. Soc. Am.* **91**(1), 1-11 (1992).