



**HAL**  
open science

## Influence de la turbidité du fluide saturant sur le comportement acoustique d'un milieu poreux

Serge Derible, Ahmed Benamar, Dinh Hoang Tran, Hervé Franklin, Huaqing Wang

► **To cite this version:**

Serge Derible, Ahmed Benamar, Dinh Hoang Tran, Hervé Franklin, Huaqing Wang. Influence de la turbidité du fluide saturant sur le comportement acoustique d'un milieu poreux. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00534637

**HAL Id: hal-00534637**

**<https://hal.science/hal-00534637>**

Submitted on 10 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

## Influence de la turbidité du fluide saturant sur le comportement acoustique d'un milieu poreux.

Serge Derible, Ahmed Benamar, Dinh Hoang Tran, Hervé Franklin et Huaqing Wang.

Université du Havre, Laboratoire Ondes et Milieux Complexes FRE CNRS 3102 53 rue Prony  
BP 540 76058 Le havre cedex  
trandinhhoang001@gmail.com, ahmed.benamar@univ-lehavre.fr, serge.derible@univ-lehavre.fr,  
herve.franklin@univ-lehavre.fr, huaqing.wang@univ-lehavre.fr.

On étudie la propagation des ondes ultrasonores dans un milieu formé de billes de verre et saturé par une eau dont la turbidité peut être choisie. Les billes sont de même diamètre et le milieu obéit à la théorie de Biot. L'insonation normale est produite par un transducteur de fréquence centrale 100 kHz, plaqué sur la maquette métallique (section carrée de 10 cm de côté) contenant les billes, associé à un transducteur identique placé sur la face opposée. Le signal transmis par la maquette, uniquement remplie d'eau, sert de référence aux signaux transmis par le système en présence d'une eau turbide saturant les billes. Un "coefficient de comparaison" expérimental, issu du rapport des transformées de Fourier des signaux précédents, est comparé au rapport des coefficients de transmission théoriques de la maquette en présence du milieu poreux ou en présence d'eau pure. On cherche les valeurs des paramètres entrant dans la théorie de Biot qui réduisent l'écart théorie/expérience. Les modifications dues à la turbidité et les conditions de leurs manifestations sont ainsi mises en évidence par voie acoustique.

### 1 Introduction

Le modèle Biot-Stoll [1- 3] est très largement utilisé pour analyser la propagation d'ondes dans les milieux poreux. Cette théorie est appliquée ici pour caractériser un milieu saturé en présence de particules fines.

La première partie de l'étude constitue un modèle numérique qui présente les coefficients de transmission et de réflexion du milieu. La deuxième partie présente le montage expérimental permettant de comparer (en transmission ou en réflexion) le milieu avec et sans la présence d'eau turbide. Une inversion est menée par plages fréquentielles successives pour obtenir la sensibilité des paramètres à la fréquence.

### 2 Etude théorique

A partir de la manipulation sur la maquette construite au laboratoire, une simulation numérique fondée sur la théorie de Biot-Stoll est établie en considérant un modèle d'onde plane harmonique de fréquence angulaire  $\omega$  (voir Fig. 1). Cette onde émise dans l'eau rencontre sous incidence normale la face d'entrée de la maquette en  $z = -(d/2 + h)$  et donne naissance à des ondes qui se propagent dans les plaques d'aluminium et dans le milieu poreux. A l'interface  $z = (d/2 + h)$ , il n'y a qu'une seule onde transmise dans l'eau. Seules les ondes longitudinales seront présentes dans ces conditions d'insonation.

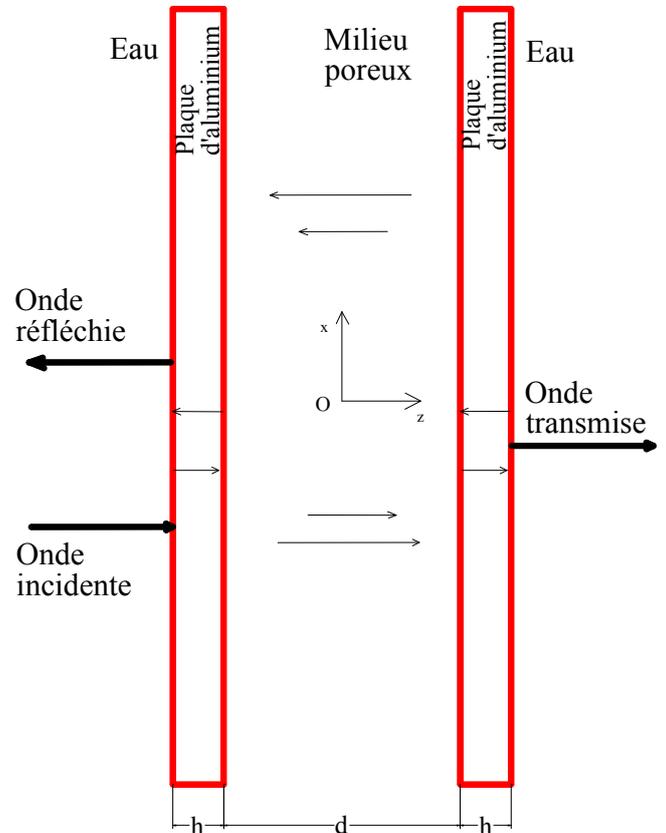


Figure 1 : Réflexion et transmission par la maquette.

Les pressions des ondes incidentes, réfléchies et transmises dans l'eau baignant la maquette peuvent s'écrire :

$$P_{inc} = A_{inc} e^{ik_0 z z} e^{-i\omega t}, \quad (1)$$

$$P_{re} = A_{re} e^{-ik_0 z z} e^{-i\omega t}, \quad (2)$$

$$P_{tr} = A_{tr} e^{ik_0 z z} e^{-i\omega t}. \quad (3)$$

Dans les plaques d'aluminium (milieux élastiques), il se propage une onde longitudinale. Dans le milieu poreux, il se propage une onde longitudinale rapide et une onde longitudinale lente. Les potentiels correspondants ne sont pas donnés ici. Soient  $P_0$  et  $\vec{u}_0$  la pression et la vitesse des particules dans le fluide extérieur ;  $\tau_p$  et  $\vec{u}_p$  le tenseur des contraintes et le déplacement dans le milieu élastique ; et enfin  $\tau$ ,  $\vec{u}$  et  $\vec{w}$  le tenseur des contraintes, le déplacement dans la matrice poreuse et le déplacement relatif du fluide par rapport à la matrice solide. Pour une incidence quelconque, les conditions de passage aux interfaces eau/plaque d'aluminium situées en  $z = \pm(d/2 + h)$  sont

$$\begin{cases} -P_0 = \tau_{pzz} \\ 0 = \tau_{pxz} \\ u_{oz} = u_{pz} \end{cases}, \quad (4)$$

tandis qu'aux interfaces plaque/milieu poreux situées en  $z = \pm d/2$ , elles prennent la forme

$$\begin{cases} 0 = w_z \\ \tau_{pxz} = \tau_{xz} \\ \tau_{pzz} = \tau_{zz} \\ u_{px} = u_{sx} \\ u_{pz} = u_{sz} \end{cases}. \quad (5)$$

C'est à partir de ces conditions de passage que l'on obtient le système linéaire (de 10 équations à 10 inconnues) permettant de calculer les coefficients de réflexion et de transmission du dispositif. Dans le cas présent, le coefficient de réflexion peut s'écrire :

$$T = \frac{P_{tr}}{P_{inc}}. \quad (6)$$

A partir des paramètres caractéristiques du milieu constitué, ce calcul pourra être mené pour les diverses configurations : maquette pleine d'eau mais sans billes, maquette remplie de billes de verre en présence d'eau pure ou d'une eau turbide jouant le rôle du fluide saturant.

### 3 Etude expérimentale

La maquette est un caisson d'aluminium de section carrée (10cm×10cm), de longueur 45cm et placé verticalement dans un bac rempli d'eau (voir Fig. 2). Elle

peut être remplie d'eau ou de billes de verre constituant un milieu poreux que l'on peut saturer par une eau de turbidité connue. L'injection de la solution turbide (limon) est faite à l'aide d'une pompe et le contrôle se fait grâce à un turbidimètre.

Deux transducteurs ultrasonores (émetteur et récepteur) de fréquence centrale 100 kHz sont placés sur les faces opposées de la colonne.

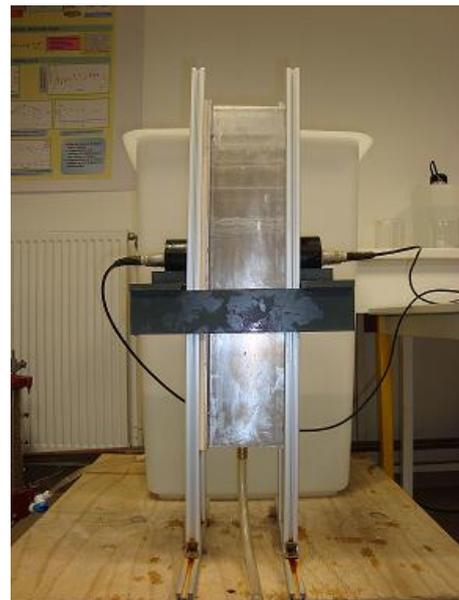
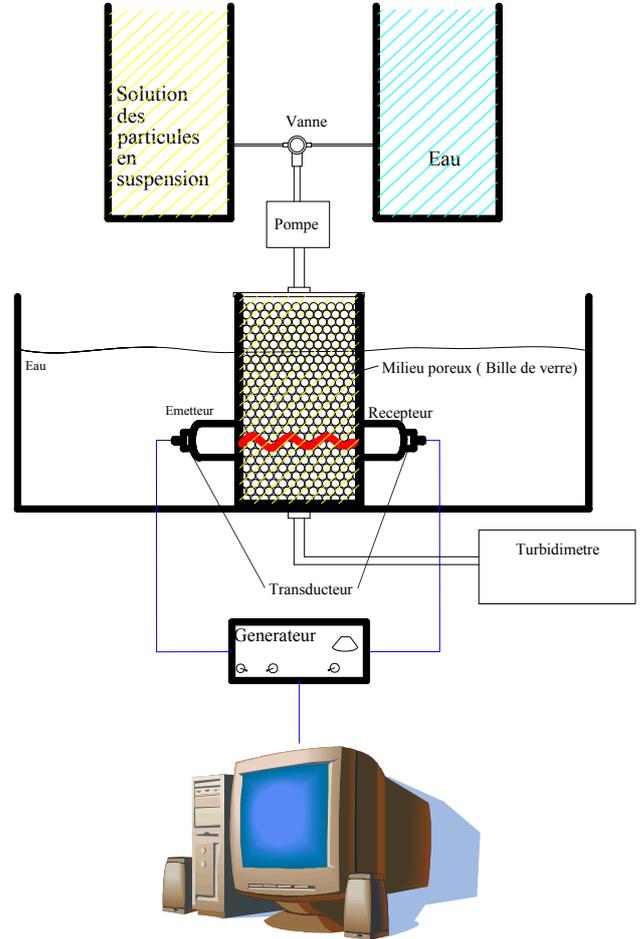


Figure 2 : Schéma et photo du dispositif expérimental.

Le signal transmis par la maquette, uniquement remplie d'eau, sert de référence aux signaux transmis par le système rempli de billes saturées par de l'eau pure ou d'une solution turbide. Il est présenté figures 3 et 4 des exemples de ces signaux temporels.

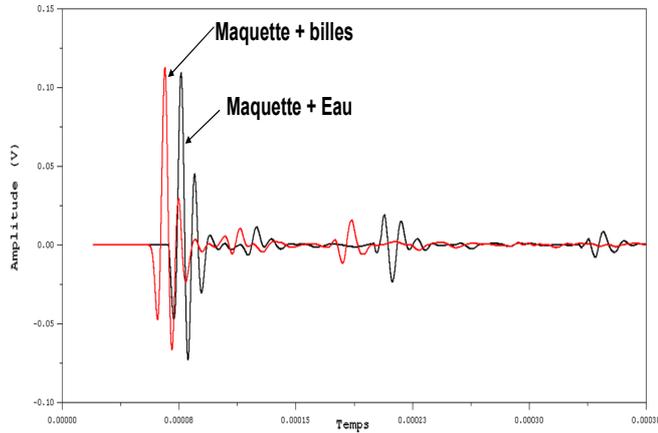


Figure 3. Signaux temporels transmis par la maquette pleine d'eau, puis remplie de billes de verre de 1mm et d'eau.

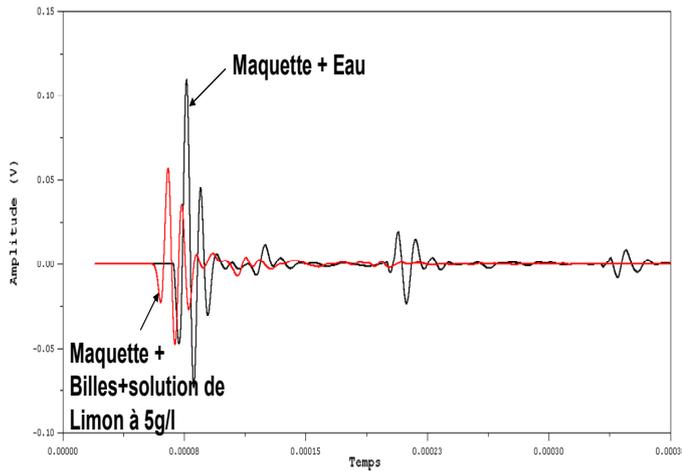


Figure 4. Signaux temporels transmis par la maquette pleine d'eau, puis remplie de billes de verre de 1mm et d'eau.

Un "coefficient de comparaison" complexe expérimental, issu du rapport des transformées de Fourier des signaux précédents, permet l'étude de l'influence de la présence des particules dans le milieu poreux :

$$C_{\text{comp}}^{\text{exp}} = \frac{S(w)}{S_0(w)} \quad (7)$$

$S_0(w)$  : transformée de Fourier des signaux transmis par la maquette pleine d'eau.

$S(w)$  : transformée de Fourier des signaux transmis par la maquette contenant les billes et de l'eau de turbidité connue. Des coefficients de comparaison sont présentés figure 5.

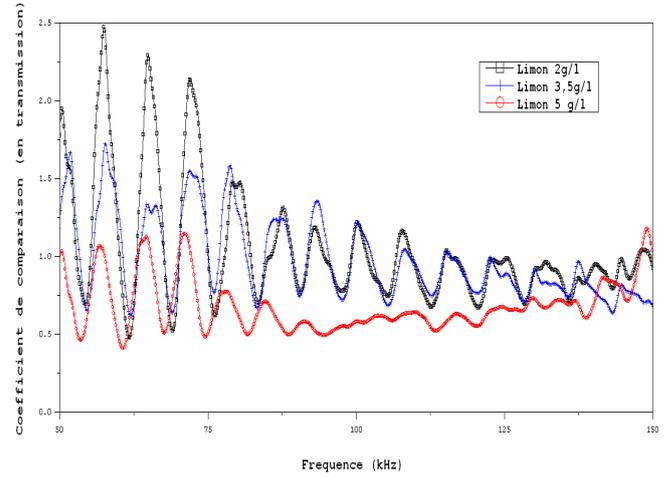


Figure 5 : Module des coefficients de comparaison en fonction de la fréquence pour plusieurs concentrations de la solution injectée.

Il apparaît sur la figure précédente une réduction de l'amplitude du coefficient de comparaison à partir de 2g/l de la solution injectée. L'atténuation des ondes augmente avec la fréquence et s'accroît avec la concentration des particules.

Le coefficient  $C_{\text{comp}}^{\text{exp}}$  doit être égal au rapport des coefficients de transmission théoriques de la maquette utilisée dans des conditions analogues.

$$C_{\text{comp}}^{\text{exp}} = \frac{T_{\text{Maq+Billes+Eau turbide}}}{T_{\text{Maq+Eau}}} \quad (8)$$

L'inversion est menée à partir de cette relation.

## 4 Comparaison Théorie/Expérience

### 4.1 Paramètres

Dans le cadre de la théorie de Biot, les paramètres nécessaires à la caractérisation d'un milieu poreux sont les suivants :

- $K_s$  : Module de compressibilité des billes de verre.
- $K_f$  : Module de compressibilité du fluide remplissant les pores.
- $K_{b1}$  et  $K_{b2}$  : Partie réelle et partie imaginaire du module de compressibilité du squelette poreux sec.
- $\mu_1$  et  $\mu_2$  : Partie réelle et partie imaginaire du module de cisaillement du squelette poreux sec.
- $\eta$  : Viscosité dynamique du fluide saturant.
- $\rho_s$  : Masse volumique du verre.
- $\rho_f$  : Masse volumique du fluide saturant.
- $\beta$  : Porosité du milieu.
- $K$  : Perméabilité du milieu.
- $a_p$  : Rayon moyen des pores.
- $\alpha$  : Tortuosité.

	Milieu bille de verre 1mm
$K_s$ (Pa)	$3.66 \cdot 10^{10}$
$K_f$ (Pa)	$2.00 \cdot 10^9$
$\eta$ (Pa.s)	$1.3 \cdot 10^{-3}$
$\rho_s$ (kg.m <sup>-3</sup> )	2500
$\rho_f$ (kg.m <sup>-3</sup> )	1000
$\alpha$	1.9

La perméabilité et le rayon des pores sont définis en fonction de la porosité  $\beta$  et le diamètre des billes  $d_m$  et calculés à partir des formules données par Hovem-Ingram [4] et Kozeny-Carman [5] :

$$a_p = \beta d_m / [3(1 - \beta)], \quad (9)$$

$$K = (\beta/5)(d_m/6)^2 [\beta/(1 - \beta)]^2. \quad (10)$$

La valeur de la porosité est déterminée par la pesée de la quantité de billes nécessaire au remplissage du volume interne de la maquette. On trouve 0,38.

Par plages de fréquence successives de 10 kHz, on cherche les valeurs des paramètres entrant dans la théorie de Biot qui réduisent l'écart théorie/expérience. La présentation dans le plan complexe (diagramme d'Argand) illustre la minimisation obtenue (figure 6).

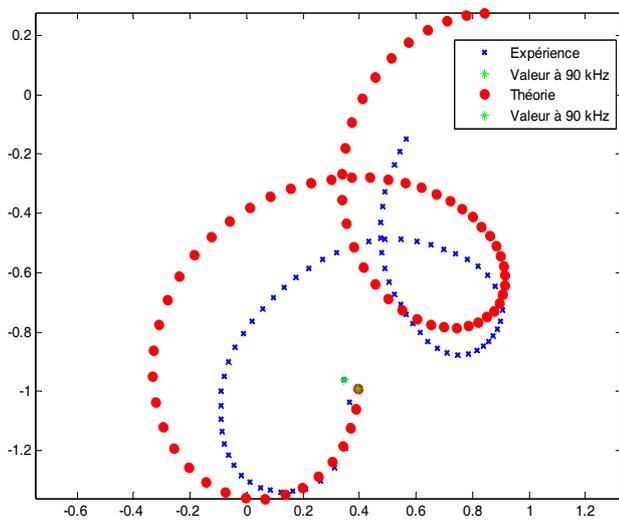


Figure 6 : Diagramme d'Argand des coefficients de comparaison de 90 à 100 kHz. Maquette contenant billes et eau.

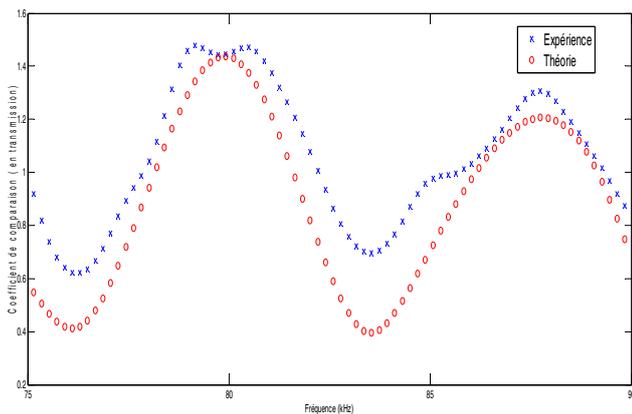


Figure 7 : Module des coefficients de comparaison de 75 à 90 kHz. Maquette contenant billes et eau.

#### 4.2 Résultats de l'inversion

Les relevés expérimentaux ont porté sur trois concentrations de limon : 2, 3,5 et 5 g/l. Les meilleurs résultats pour l'inversion ont été obtenus en prenant une tortuosité de 1,9 et en considérant que la porosité dépendait de la turbidité. Elle est de 0,38 jusqu'à 2g/l de limon puis

passé de 0,37 (solution de 3,5g/l) à 0,35 pour la solution contenant 5g/l de limon. Cela laisse supposer que le limon se répartit plutôt sur les billes, réduisant ainsi le volume des pores.

L'évolution en fréquence des paramètres ( $Kb_1$ ,  $Kb_2$ ,  $\mu_1$  et  $\mu_2$ ) est tracée ci dessous (Figure 8-11).

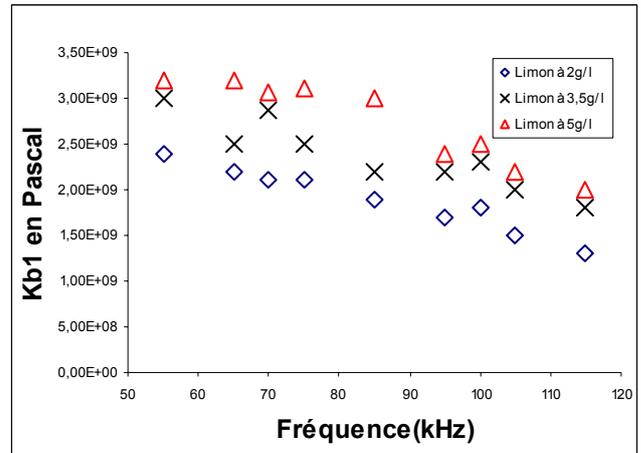


Figure 8 :  $Kb_1$  en fonction de fréquence pour plusieurs concentrations de la solution injectée.

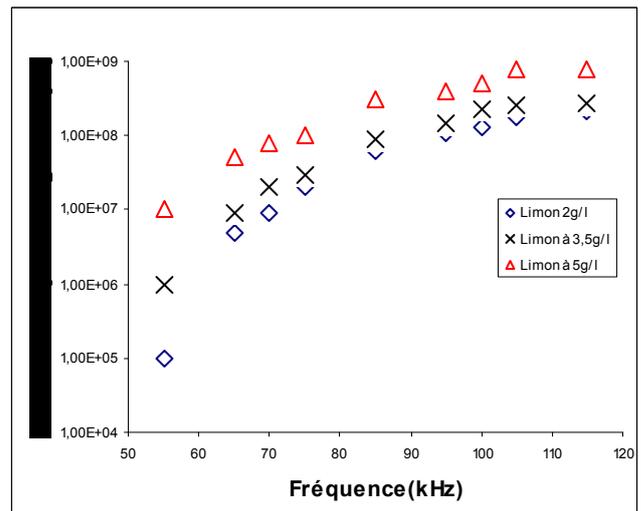


Figure 9 :  $Kb_2$  en fonction de fréquence pour plusieurs concentrations de la solution injectée. Echelle verticale logarithmique.

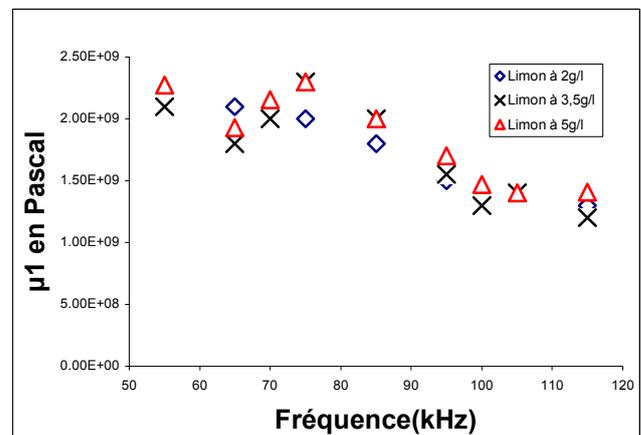


Figure 10 :  $\mu_1$  en fonction de fréquence pour plusieurs concentrations de la solution injectée.

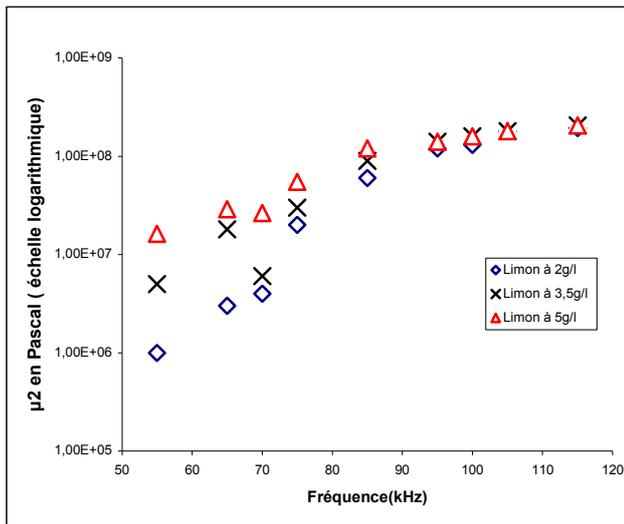


Figure 11 :  $\mu_2$  en fonction de fréquence pour plusieurs concentrations de la solution injectée. Echelle verticale logarithmique.

On peut constater que  $K_{b1}$  et  $\mu_1$  sont quasiment constants en fonction de fréquence. Mais en fonction de la concentration en particules,  $K_{b1}$  augmente et  $\mu_1$  ne change pas (figures 8 et 10). Par contre,  $K_{b2}$  et  $\mu_2$  augmentent fortement avec la fréquence (figures 9 et 11).

## 5 Conclusion

L'acoustique ultrasonore peut servir à caractériser l'évolution de la turbidité du liquide saturant un milieu poreux. Le modèle théorique de Biot-Stoll est applicable. Le paramètre le plus sensible est le module de compressibilité du milieu sec  $K_{b1}$ . Il augmente avec la concentration en particules. On observe corrélativement une forte augmentation en fonction de la fréquence des parties imaginaires des modules. Ceci a pour conséquence une croissance assez forte de l'atténuation des ondes se propageant dans le milieu poreux.

## Références

- [1] M. A. Biot, "Theory of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range", *J. Acoust. Soc. Am.* **28**, 168-178 (1956).
- [2] M. A. Biot, "Theory of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range", *J. Acoust. Soc. Am.* **28**, 179-191 (1956).
- [3] R. D. Stoll, "Theoretical aspects of sound transmission in sediments", *J. Acoust. Soc. Am.* **68** (5), 1341-1350 (1980).
- [4] J. M. Hovem, G. D. Ingram, "Viscous attenuation of sound in saturated sand", *J. Acoust. Soc. Am.* **66**, 1807-1812 (1979).
- [5] P. C. Carman, "Flow of Gases through Porous Media", (*Academic, New York, 1956*).