

# Réflexion et transmission des ondes acoustiques par un milieu poreux

F. KACHKOUCH<sup>a</sup>, H. FRANKLIN<sup>a</sup>, A. TINEL<sup>a</sup>, A. ALEM<sup>a</sup>, H. WANG<sup>a</sup>

a. Université Le Havre Normandie, Laboratoire Ondes et Milieux Complexes LOMC UMR CNRS 6294, 75 rue de Bellot, 76600 Le Havre, CS 80 540 76058 Le Havre France

## Résumé

*La propagation des ondes ultrasonores dans un milieu à double porosité est un moyen permettant d'accéder à plusieurs de ses caractéristiques. L'influence du dépôt de particules et du bouchage des pores de ce type de milieu est l'une des problématiques étudiées. Plusieurs propriétés permettent d'étudier le comportement acoustique à travers un milieu poreux, à savoir la réflexion et la réfraction des ondes. Dans cet article, nous présentons l'évolution fréquentielle (à angles fixés) et angulaire (à fréquences fixées) des coefficients de réflexion et de transmission des ondes acoustiques par un milieu à double porosité, ainsi que l'effet de la variation de la porosité sur l'évolution de ces coefficients. Nous présentons également une comparaison théorie/expérience entre la transmission des ondes à travers un milieu propre et un milieu soumis à un écoulement chargé de particules fines. Pour cela, nous nous basons sur un modèle théorique développé par Berryman et Wang (1995) visant à étendre la théorie de Biot (1956) à un milieu doublement poreux.*

## Abstract

*The propagation of ultrasonic waves in a double porosity medium is a tool for accessing to several characteristics of this medium. The influence of particle deposition and pore clogging of this type of medium is one of the studied problems. Several properties allow studying the acoustic behavior through a porous medium, namely reflection and refraction of waves. In this paper, we describe the frequency (fixed angles) and angular (fixed frequency) evolution of the reflection and the transmission of acoustic waves by a double porosity medium, as well as the effect of the porosity variation on the evolution of these coefficients, we describe also a theoretical/experimental comparison between the transmission of waves through a clean medium and a medium subjected to a flow charged of fine particles. In order to do this, we used the extension of Biot model (1956) developed by Berryman and Wang (1995) to describe a double porosity medium.*

**Mots clefs : Milieu à double porosité, réflexion, transmission, colmatage**

## 1 Introduction

Dans le génie civil, le colmatage est un phénomène courant qui affecte les milieux poreux soumis à l'écoulement en profondeur d'un fluide contenant de fines particules en suspension. Le colmatage engendre des modifications de certains paramètres caractérisant un milieu poreux, notamment la porosité et la perméabilité [1]. Nous étudions la réponse acoustique, par des méthodes ultrasonores non destructives, d'un milieu à double porosité (extension de Berryman et Wang [2-3] de

la théorie de Biot [4]) suite à un dépôt de particules fines. Les échantillons étudiés sont contenus dans une boîte métallique immergée dans l'eau. Nous présentons, dans un premier temps, l'évolution fréquentielle (à angles fixés) et angulaire (à fréquences fixées) du coefficient de transmission et de réflexion des ondes acoustiques par un milieu à double porosité saturé, ensuite nous étudions l'effet de la variation de la porosité sur le coefficient de transmission. Dans un second temps, nous définissons un coefficient permettant de comparer les résultats théorique et expérimental de la transmission des ondes acoustiques par un milieu à double porosité saturé avant et après injection de particules fines.

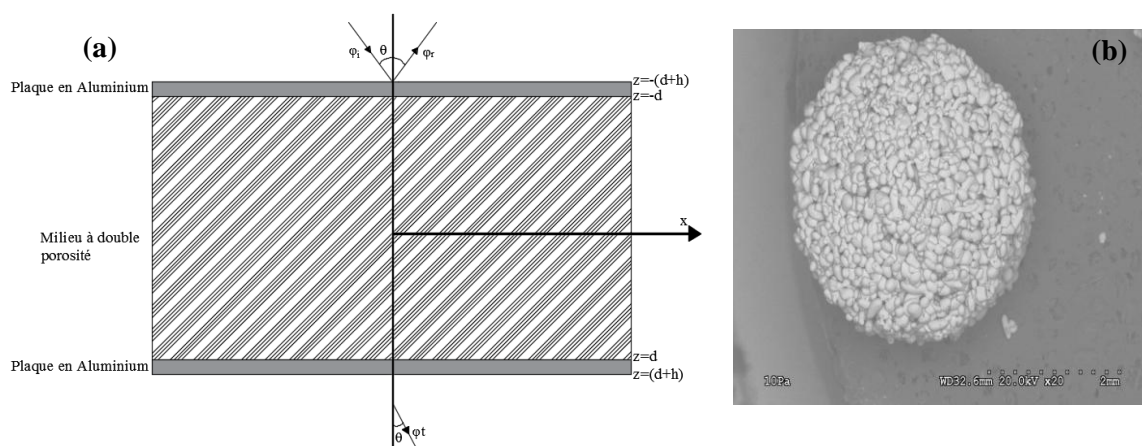
## 2 Dispositif expérimental

L'objet d'étude est une boîte rectangulaire de dimensions  $10 \times 10 \times 45 \text{ cm}^3$  constituée de plaques d'aluminium de 2 mm d'épaisseur. Cette maquette est remplie de grains de matériau à double porosité saturé d'eau (voir description, §3.2 ci-dessous), l'ensemble étant immergé dans l'eau. Une impulsion électrique est générée et est convertie en onde acoustique à l'aide d'un transducteur à immersion de 5 cm de diamètre ayant une fréquence centrale de 100 kHz, et qui est mis en contact avec l'une des parois en aluminium de la maquette. Sur la paroi opposée de la maquette un autre transducteur identique au premier convertit les ondes acoustiques transmises à travers le matériau à double porosité en un signal électrique. Un oscilloscope numérique est utilisé pour enregistrer ce signal reçu. Un écoulement de 75 ml/min de débit, chargé de 3 g/l de particules d'argile (Kaolinite Portland) de  $15 \mu\text{m}$  de diamètre moyen traverse le milieu pendant une durée de 3 heures.

## 3 Modèle numérique

### 3.1 Configuration d'étude

Un schéma (figure 1) a été établi en correspondance avec le modèle expérimental. L'onde incidente est émise dans le fluide avec un angle  $\theta$  par rapport au plan vertical. Son arrivée à l'interface eau-plaque provoque l'apparition d'une onde réfléchie dans le fluide. En traversant la plaque solide, deux ondes y apparaissent (une longitudinale et une transversale), et de même, la pénétration de l'onde dans le milieu poreux donne naissance à trois ondes longitudinales et à une onde transversale. Ces ondes sont toutes dispersives et atténuées.



**Figure 1** : Modèle du milieu à double porosité empilé dans une boîte métallique (a), et aspect d'un grain de ROBU (b)

### 3.2 Matériau étudié

Le milieu est composé de billes de verres de borosilicate appelées ROBU de 3.5 mm de diamètre ayant une forme quasi-sphérique. Ces billes sont en contact entre elles. Les paramètres du ROBU adoptés (tableau 1) sont soit issus de la littérature, soit déterminés par des essais mécaniques. C'est un matériau constitué de deux phases : une phase solide élastique et une phase constituée de pores totalement connectés et saturés par un fluide visqueux newtonien incompressible. La phase porale est séparée en deux échelles de porosité : une microporosité (pores dans les grains) et une macroporosité (pores entre les grains) (figure 1), d'où la notation « double porosité ». La figure (1 (b)) qui est une image prise par un microscope électronique à balayage (MEB) d'un grain de ROBU montrant la présence de micropores.

Afin d'étudier analytiquement le comportement acoustique de ce milieu supposé à double porosité, nous utilisons l'extension faite par Berryman et Wang [2-3] de la théorie de Biot [4]. Cette théorie n'est plus applicable pour un diamètre plutôt élevé (plus de 4 mm), en haute fréquence. En effet, le contact entre les grains provoque un phénomène de multi-diffusion des ondes qui doit être pris en compte [5]. En se plaçant en basse fréquence, ce phénomène peut être évité. Le contact entre les billes de ROBU et leur entassement permet de supposer que le milieu est continu et que par suite, la théorie de Biot est applicable. Berryman et Wang ont mis en évidence une troisième onde longitudinale se propageant dans ce milieu, qui est due à la vibration du fluide dans les pores de la matrice. Suite aux équations du mouvement [2-3], les contraintes et la pression du fluide sont déterminées. Ainsi, un système d'équations est obtenu à partir des conditions de passage [6] définies aux interfaces du modèle.

---

#### Eau

$$K_f = 2.2 \times 10^9 \text{ Pa}, \quad \rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$$

#### Plaque d'aluminium

$$E_p = 67 \times 10^9 \text{ Pa}, \quad \nu_p = 0.34, \quad \rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$$

#### Couche du milieu poreux double

$$K_s = 4.55 \times 10^9 \text{ Pa}, \quad K = 0.10 \times 10^9 \text{ Pa}, \quad K^{(1)} = 1 \times 10^9 \text{ Pa}, \quad \mu = 0.09 \times 10^9 \text{ Pa}$$

$$\rho_s = 2230 \text{ kg/m}^3, \quad \beta^{(1)} = 0.38, \quad \beta^{(2)} = 1, \quad \nu^{(2)} = 0.34, \quad \beta = 0.59$$

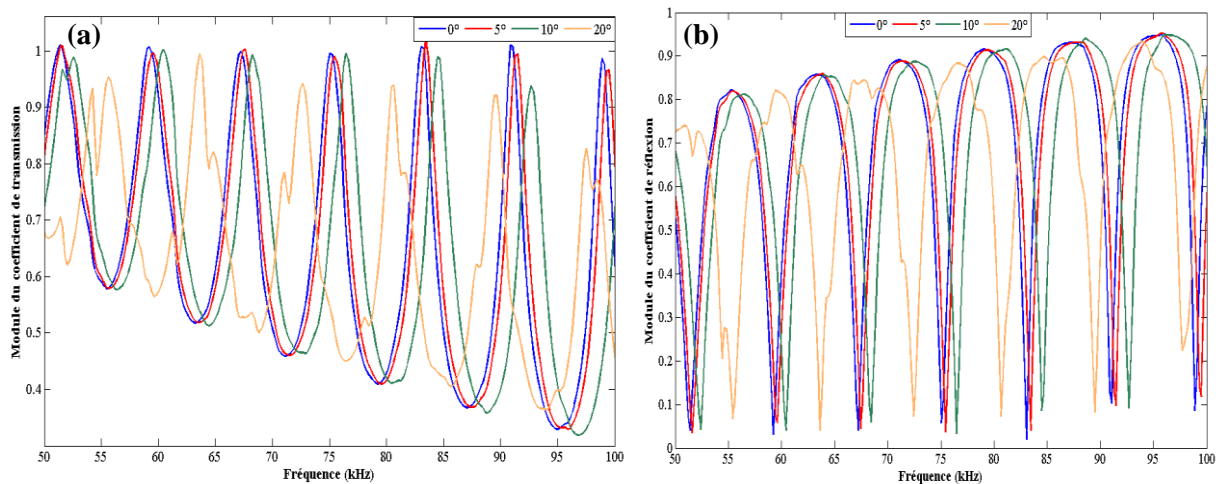
$$k^{(11)} = 2.9 \times 10^{-11} \text{ m}^2, \quad k^{(22)} = 2.5 \times 10^{-9} \text{ m}^2, \quad \eta = 10^{-3}$$


---

**Tableau 1** : Paramètres de l'eau, de la plaque d'aluminium et du milieu à double porosité (ROBU)

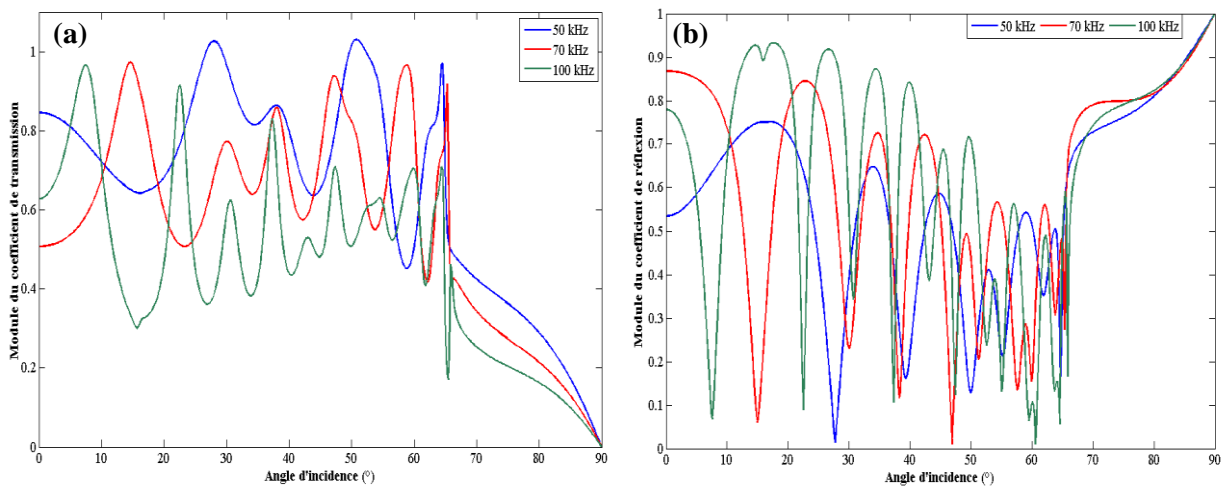
## 4 Coefficients de transmission et de réflexion

La figure (2) présente la variation des coefficients de transmission (a) et de réflexion (b) en fonction de la fréquence pour des angles d'incidence donnés (0, 5, 10 et 20°). A noter que le choix du domaine fréquentiel (50-100 kHz) est en relation avec la bande passante des transducteurs utilisés expérimentalement. Nous constatons une diminution d'amplitude de l'onde transmise à travers le milieu poreux ainsi qu'un décalage vers la haute fréquence avec l'augmentation de l'angle d'incidence. La périodicité observée soit sur le coefficient de transmission, soit sur le coefficient de réflexion peut être expliquée par la propagation des modes guidés dans la couche poreuse, contrairement aux modes existant dans les plaques élastiques qui n'ont pas d'influence à une telle bande passante.



**Figure 2 :** Variation fréquentielle des coefficients de transmission (a) et de réflexion (b) pour différents angles

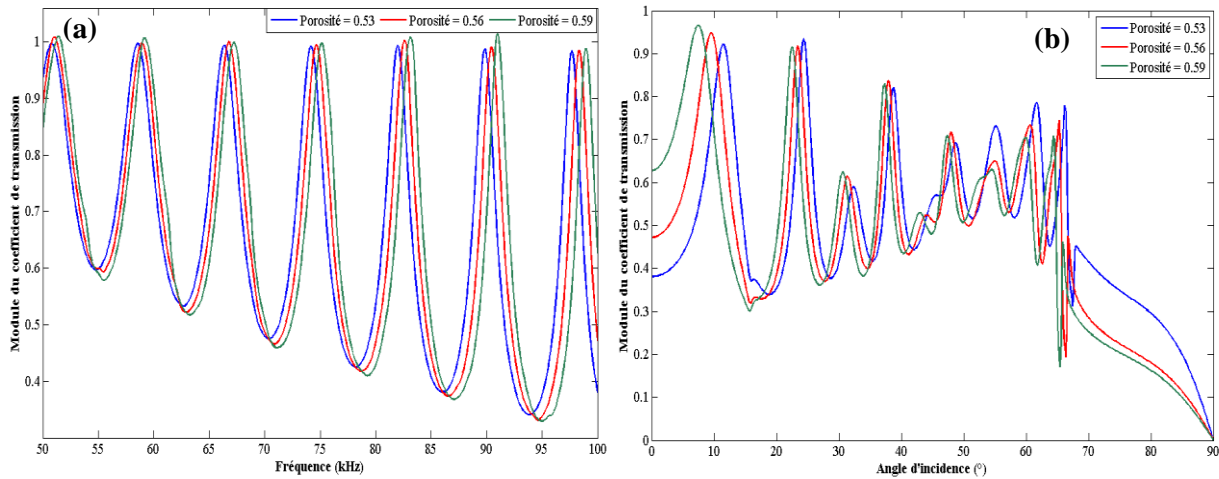
La figure (3) présente la variation des coefficients de transmission (a) et de réflexion (b) en fonction de l'angle d'incidence pour des fréquences données (50, 70 et 100 kHz). Aux angles d'incidence inférieurs à 65°, on observe de fortes variations d'amplitude du coefficient de transmission. Noter qu'à la fréquence de 100 kHz, on constate une transmission d'ondes moins importante (perte d'énergie en réflexion). La position des différents pics caractérise acoustiquement le matériau poreux et peut être utilisée pour extraire certains paramètres. A partir d'un angle d'incidence de 65°, nous nous approchons du cas d'une onde rasante, où l'ensemble de l'énergie émise se propage dans le milieu où l'onde incidente a eu lieu, ce qui explique une transmission nulle à travers le modèle.



**Figure 3 :** Variation angulaire des coefficients de transmission (a) et de réflexion (b) du milieu propre pour différentes fréquences

La figure (4) présente la variation fréquentielle en incidence normale ( $\theta = 0^\circ$ ) et angulaire à fréquence fixée ( $f = 100$  kHz) des coefficients de transmission pour différentes porosités ( $\beta = 0.59, 0.56$  et  $0.53$ ). La variation fréquentielle montre un décalage des signaux vers les hautes fréquences ainsi qu'une croissance légère de l'amplitude du coefficient de transmission avec l'augmentation de la porosité. Cette croissance est observée également dans la figure 4 (b) notamment pour de faibles angles d'incidence. En effet, ceci peut être expliqué par le fait que l'augmentation de la porosité engendre une diminution de la tortuosité, et donc la masse du fluide entraînée dans le mouvement

d'ensemble diminue. Par conséquent, les effets d'inertie diminuent les mouvements différentiels se créant entre le fluide et l'ensemble fluide-solide, et donc les dissipations d'énergie deviennent de moins en moins importantes, ce qui permet d'observer une transmission d'énergie plus importante pour des porosités plus élevées.



**Figure 4 :** Variation fréquentielle (a) et angulaire (b) des coefficients de transmission pour différentes porosités

## 5 Etude du colmatage

Le dépôt de particules fines dans les pores du milieu poreux engendre des modifications de certains paramètres du milieu à savoir la porosité, le module d'incompressibilité des grains et la perméabilité. Après dépôt, la taille des pores devient plus faible (diminution de la porosité), ce qui engendre une augmentation de la masse volumique du solide et donc le milieu devient plus dense (une partie du fluide saturant les pores est occupée par les particules) et par conséquent son module d'incompressibilité sec  $K$  augmente. Ces valeurs modifiées, obtenues expérimentalement à partir des signaux temporels mesurés pour une maquette remplie de ROBU pollué, sont utilisées lors du calcul théorique afin de simuler analytiquement le comportement acoustique après colmatage du milieu poreux par les particules fines.

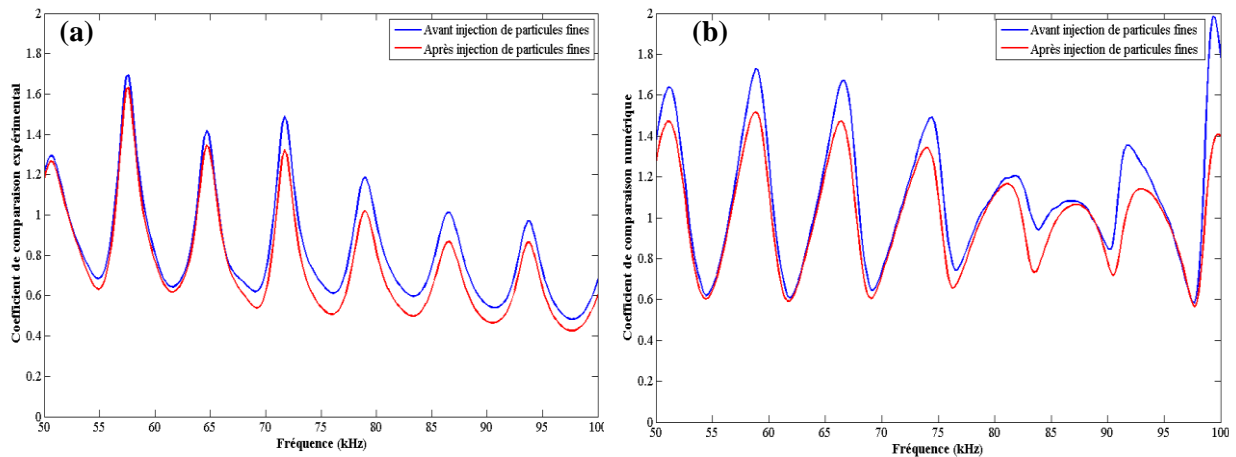
### 5.1 Coefficient de comparaison

Afin que les résultats numériques soient comparables aux résultats expérimentaux en termes du coefficient de transmission, nous avons défini un coefficient de comparaison, qui permet de se référer à une transmission à travers une maquette remplie d'eau ( $T_0$ ). Celui-ci est défini expérimentalement comme étant le rapport de la transformée de Fourier du signal temporel transmis à travers la maquette remplie du milieu poreux ( $S$ ) et de la transformée de Fourier du signal temporel transmis à travers la maquette remplie d'eau ( $S_0$ ). Numériquement, il se définit comme le rapport du coefficient de transmission d'ondes par le milieu poreux ( $T$ ) et du coefficient de transmission d'ondes par l'eau ( $T_0$ ) :

$$C_{\text{exp}} = \frac{S}{S_0} \qquad C_{\text{num}} = \frac{T}{T_0}$$

La figure 5 présente la variation du coefficient de comparaison expérimental (a) et numérique (b) avant et 3 heures après injection de particules fines dans le milieu à double porosité. On constate une diminution de l'amplitude après injection de particules fines (figure 5 (a)) qui est confirmé

numériquement (figure 5 (b)). Cette diminution est due à l'hétérogénéité du milieu en présence de particules. En plus de l'effet de la diminution de la porosité (cf. paragraphe 4), l'augmentation du module d'incompressibilité sec après injection de particules engendre ainsi un entraînement du fluide plus important dans le mouvement d'ensemble, ce qui accentue les différences de phase qui sont à l'origine de pertes d'énergie, et donc d'atténuations plus fortes. Par conséquent, la transmission devient de moins en moins importante au cours du temps (plus de réflexion à l'intérieur du matériau).



**Figure 5 :** Coefficients de comparaison expérimental (a) et numérique (b) du ROBU avant et après injection de particules.

## 6 Conclusion

Le modèle établi permet de suivre l'évolution du coefficient de réflexion et de transmission des ondes acoustiques par un milieu à double porosité particulier, le ROBU. Cette étude qui sera confirmée par des essais expérimentaux complémentaires, nous permettra d'étudier la sensibilité des propriétés acoustiques (réflexion et transmission) aux paramètres caractérisant le milieu à double porosité. L'effet de la porosité sur le coefficient de transmission est remarquable. Ce dernier a tendance à décaler les pics vers les hautes fréquences quand la porosité augmente.

Le colmatage est un phénomène qui peut affecter plusieurs ouvrages de rétention d'eau notamment les barrages. Son étude *via* les méthodes ultrasonores peut conduire à l'élaboration de méthodes non destructives de prédiction. En effet, on a constaté une certaine sensibilité au coefficient de transmission. L'amplitude de celui-ci a tendance à diminuer après injection de particules fines. Une méthode de minimisation, permettant de diminuer l'écart entre les coefficients de comparaison théoriques et ceux expérimentaux, a mis en évidence trois paramètres essentiellement affectés par le dépôt de particules fines : le module d'incompressibilité (et donc le module de cisaillement), la porosité et la perméabilité.

## Références

- [1] A. El Kawafi, (2010). Colmatage d'un milieu poreux saturé soumis à un écoulement chargé de particules. Thèse de doctorat de l'université du Havre.
- [2] J. G. Berryman, and H. F. Wang, 1995, The elastic coefficients of double-porosity models for fluid transport in jointed rock: *J. Geophys. Res.*, 100, 24611-24627.
- [3] J. G. Berryman, and H. F. Wang, Elastic wave propagation and attenuation in a double-porosity dual-permeability medium: Stanford Exploration Project, Report 100, April 20, 1999, pages 1-361.

- [4] M.A. Biot. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid (I. Low frequency range), J. Acoust. Soc. Am., Vol. 28, No. 2, pp. 168-178, March, 1956.
- [5] M. Kimura, (2013). Shear wave speed dispersion and attenuation in granular marine sediments. The Journal of the Acoustical Society of America, 134(1), 144-55.
- [6] Z.J. Dai, Z.B. Kuang, S.X. Zhao, (2006). Reflection and transmission of elastic waves at interface between an elastic waves at interface between an elastic solid and a double porosity medium. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43 (6), 961-971.