

Titre en Français : Acoustique des milieux poreux autosimilaires (fractals).

Titre en Anglais : Acoustics of self-similar porous media (fractals).

Nom du directeur de thèse : Zine El Abiddine Fellah (HDR CR CNRS)

Email : Fellah@lma.cnrs-mrs.fr (IR CNRS)

Co-encadrant : Erick Ogam.

Introduction

Les matériaux poreux sont omniprésents dans notre environnement. Le sol et les roches en sont les exemples naturels les plus courants et dont la caractérisation présente un intérêt de premier ordre dans de multiples domaines (géologie, industrie pétrolière,...). Les matériaux de construction (comme les bétons et les revêtements routiers), les matériaux dits acoustiques et bien d'autres utilisés dans les transports, le bâtiment, les infrastructures, etc., trouvent aujourd'hui des applications dans le domaine de la réduction des nuisances sonores (au cours des vingt dernières années, les normes acoustiques devenues de plus en plus sévères font de la lutte contre les nuisances sonores un facteur économique clé). Les matériaux en usage sont aujourd'hui soumis à des contrôles non destructifs de plus en plus sévères et la demande de performances accrues de ces contrôles reste totalement à l'ordre du jour. Enfin, les tissus vivants, tissus osseux, poumons, etc., font l'objet d'analyses de plus en plus poussées en vue du diagnostic de certaines pathologies telles que l'ostéoporose, analyses qui nécessitent leur description précise en termes de matériaux. Ainsi, qu'il s'agisse d'études relevant de la sismique, de l'acoustique de l'environnement, du contrôle non destructif, du diagnostic médical, pour en rester à l'essentiel, les enjeux considérables (en termes d'application des techniques acoustiques appliquées aux matériaux) ouvrent largement la voie à des études fondamentales sur la propagation des ondes acoustiques dans les milieux poreux, la modélisation de leurs caractéristiques et de leurs défauts, les techniques expérimentales à mettre en œuvre pour les caractériser, les moyens à prévoir pour assurer le transfert vers les applications :

- Géophysique (pétrole, gaz, eau) ;
- Médecine (os, ostéoporose) ;
- Acoustique des bâtiments (confort, atténuation du bruit) ;
- Transport (aéronautique, train, voiture).

Situation actuelle de la recherche acoustique dans le domaine des matériaux poreux; ouverture sur des recherches futures

Plusieurs modèles ont été développés pour décrire la propagation acoustique dans les matériaux poreux, le modèle le plus général et le plus connu, proposé à l'origine par les géophysiciens, étant le modèle de Biot [1]. Ce modèle a été adapté pour la description des matériaux poreux saturés d'air [2] en développant le modèle du fluide équivalent. En particulier des nouveaux paramètres ont été introduits pour étendre la validité du modèle à un large domaine fréquentiel et pour l'élargir aux milieux poreux à micro-géométries très différentes (fibres, pores, grains) [3]. Le Modèle de Biot a été également adapté à la propagation ultrasonore dans les tissus osseux [4].

Malgré le succès dans la prédiction de l'existence de deux ondes longitudinales, la capacité de la théorie à prédire la propagation acoustique dans les milieux poreux naturels (tissus osseux, roches, sédiments marins...etc) reste limitée. En ajustant certains paramètres d'entrée du modèle de Biot, la prédiction des vitesses des ondes longitudinales est assez précise, cependant, ce modèle est mis en défaut pour la prédiction de leur atténuation. Les limitations de l'utilisation actuelle de la théorie de Biot sont souvent dues à une description incomplète de toutes les interactions physiques entre les ondes et le milieu poreux.

Cette lacune dans les méthodes d'investigation des matériaux poreux ouvre un vaste champ d'études, défi scientifique aux aspects théoriques et expérimentaux fondamentaux, et aux enjeux industriels de tout premier ordre dans de nombreux domaines d'activités.

Dans le travail proposé, on s'intéressera à ces différents aspects :

-Théorique : par l'amélioration des modèles existants de l'interaction fluide-solide qui devra prendre en compte la microstructure du milieu; développement de nouveaux modèles, on étudiera en particulier les effets induits par son autosimilarité [5,6] liée à sa fractalité.

-Expérimental : par la conception et la réalisation de montages pour la caractérisation des milieux poreux (matériaux calibrés imprimés en 3D, matériaux naturels, nouveaux matériaux...etc) aussi bien en ultrasons qu'en basses fréquences.

-Numérique : Par la production de codes de calculs (matlab, python,...etc) : i) permettant la comparaison théorie/expériences et l'inversion des données expérimentales, ii) simulation sur des systèmes réels.

Une collaboration scientifique pourrait être envisagée avec R. Roncen de l'ONERA Toulouse dans le cadre d'une collaboration de recherche LMA-ONERA.

Résumé en Anglais :

Porous materials are omnipresent in our environment. Soil and rocks are the most common natural examples and their characterization is of great interest in many fields (geology, oil industry,...). Construction materials (such as concrete and road surfaces), so-called acoustic materials and many others used in transport, building, infrastructure, etc., are now finding applications in the field of noise reduction (over the last twenty years, increasingly stringent acoustic standards have made the fight against noise pollution a key economic factor). The materials are now subject to increasingly stringent non-destructive testing and the demand for improved performance of these tests remains fully on the agenda. Finally, living tissues, bone tissue, lungs, etc., are the subject of increasingly advanced analyses for the diagnosis of certain pathologies such as osteoporosis, analyses that require their precise description in terms of materials. Thus, whether it is a question of studies related to seismic, environmental acoustics, non-destructive testing, medical diagnostics, to stay with the essentials, the considerable stakes (in terms of application of acoustic techniques applied to materials) largely open the way to fundamental studies on the propagation of acoustic waves in porous media, the modelling of their characteristics and defects, the experimental techniques to be implemented to characterise them, the means to be provided to ensure the transfer to applications.

Current situation of acoustic research in the field of porous materials; opening on future research

Several models have been developed to describe acoustic propagation in porous materials, the most general and best known model, originally proposed by geophysicists, being the Biot model [1]. This model has been adapted to describe air-saturated porous materials [2] by developing the equivalent fluid model. In particular, new parameters have been introduced to extend the validity of the model to a large frequency domain and to extend it to porous media with very different microgeometries (fibers, pores, grains) [3]. The Biot Model has also been adapted to ultrasound propagation in bone tissue [4]. Despite the success in predicting the existence of two longitudinal waves, the ability of the theory to predict acoustic propagation in natural porous media (bone tissue, rocks, marine sediments...etc) remains limited. By adjusting some of the input parameters of the Biot model, the prediction of longitudinal wave velocities is quite accurate, however, this model is flawed in the prediction of their attenuation. The limitations of the current use of Biot theory are often due to an incomplete description of all the physical interactions between the waves and the porous medium.

This gap in the methods of investigation of porous materials opens a vast field of studies, a scientific challenge with fundamental theoretical and the realization of experimental setups, and with industrial stakes of the highest order in many fields of activity.

In the proposed work, we will focus on these different aspects:

-Theoretical: by the improvement of the existing models of the fluid-solid interaction which will have to take into account the microstructure of the medium: Development of new models, one will study in particular the effects induced by its self-similarity [5,6] related to its fractality.

-Experimental: by the design and the realization of assemblies for the characterization of porous media in ultrasound as well as in low frequencies.

-Numerical : by the production of calculation codes (matlab, python,...etc): i) allowing the comparison theory/experiments and the inversion of the experimental data, ii) simulation on real systems.

A scientific collaboration is envisaged with R. Roncen from ONERA Toulouse in the framework of a LMA-ONERA research collaboration

Références

- [1] M. A. Biot, The theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. Higher frequency range, *J. Acoust. Soc. Am.* 28, 179-191, (1956).
- [2] J.F. Allard, *Propagation of Sound in Porous Media: Modeling Sound Absorbing Materials*, Chapman and Hall, London, (1993).
- [3] E. Ogam, Z.E.A. Fellah, N. Sebaa, J.P. Groby, Non-ambiguous recovery of Biot poroelastic parameters of cellular panel using ultrasonic waves, *J. Sound and Vib.* 330, 1074-1090 (2011).
- [4] R. Roncen, Z.E.A. Fellah, E. Piot et E. Ogam, Bayesian inference of a human bone and biomaterials using ultrasonic transmitted signals. *J. Acoust. Soc. Am.* 146, 1629-1640, (2019).
- [5] Z.E.A. Fellah, M. Fellah, E. Ogam, A. Berbiche and C. Depollier, Reflection and transmission of transient ultrasonic wave in fractal porous material : Application of fractional calculus, *Wave Motion*, 106, 102804, (2021).
- [6] Z.E.A. Fellah, M. Fellah, N.O. Ongwen, E. Ogam and C. Depollier, Acoustics of fractal porous material and fractional calculus, *Mathematics* 9 (15) 1774, (2021).