

Introduction

De manière concomitante avec la modernisation de la société, l'exigence de réduction des nuisances sonores est de plus en plus importante. Elle concerne plusieurs domaines de l'industrie tels que le bâtiment, les transports (automobile, ferroviaire, aéronautique...). Dans ce domaine, les matériaux poreux sont connus pour leurs qualités d'absorption sonore et sont donc couramment utilisés dans l'industrie [1]. En effet, lorsque ces matériaux font obstacle à l'onde acoustique, celle-ci induit dans le milieu poreux des mouvements relatifs de l'air dans les pores du matériau, et une partie de son énergie est dissipée sous forme de chaleur par des pertes liées aux effets visqueux, thermiques ou élastiques [2].

La performance acoustique des matériaux isolants a fait l'objet de nombreuses études depuis plusieurs années, et il existe principalement deux approches pour modéliser le problème.

La première méthode plutôt empirique est d'ordre purement expérimental et repose sur les mesures acoustiques permettant de mesurer des paramètres acoustiques sur le plan macroscopique [3] [4] [5]. Cette méthode a permis pendant de nombreuses années d'améliorer les performances acoustiques d'un matériau, mais il est relativement difficile de l'utiliser pour optimiser ces matériaux car la physique de la dissipation interne n'est prise en compte que de façon qualitative [6] [7].

La deuxième méthode utilise justement une étude fine de la physique de la dissipation locale dans le matériau en cherchant à lier microstructure et comportement acoustique du milieu poreux. Il s'agit donc d'une approche multi-échelle, qui a pu être mise en œuvre progressivement grâce à l'existence de codes de calcul numérique efficaces [8] [9].

L'application de ce travail concerne l'environnement sonore à l'intérieur d'un bâtiment et plus précisément l'isolation acoustique. Ainsi, on demande comment réduire les bruits causés par les moteurs des automobiles, des avions, ...etc. En effet, les nuisances sonores préoccupent de plus en plus les riverains des aéroports et des bases militaires.

Cette thèse porte sur la propagation d'ondes acoustiques dans le domaine des grandes longueurs d'ondes dans un milieu poreux dont la structure apparaît comme homogène à l'échelle macroscopique. Les propriétés du milieu « effectif » représentant à l'échelle macroscopique la propagation de l'onde dans le milieu poreux dépendent alors de ses paramètres physiques ainsi que de la géométrie du réseau poreux [10] [11] [12] [13]. L'objectif de ce travail consiste donc à étudier analytiquement et numériquement la propagation des ondes acoustiques dans un milieu poreux continu diphasique. Un code de calcul permettant la simulation et l'analyse du comportement mécaniques est mis au point à cet effet.

Ainsi, ce mémoire se divise en deux parties comprenant chacune deux chapitres :

- ✓ Dans un premier temps, l'étude bibliographique et la modélisation analytique de la propagation des ondes acoustiques dans les milieux poreux multicouches sont entreprises. D'une part, le premier chapitre est consacré à la description de la propagation du son dans un milieu poreux. Nous présentons les différents paramètres caractéristiques de la propagation des ondes dans les matériaux poreux, ainsi que les différents modèles utilisés pour décrire ces phénomènes. La théorie de fluide équivalent traite le cas de la structure rigide et la théorie de Biot pour prendre en compte les mouvements du fluide et du solide. D'autre part, le deuxième chapitre est consacré aux modélisations analytiques des matériaux multicouches. Une méthode a été développée afin de décrire ce type de matériaux à l'aide d'une matrice de transfert résultant des propriétés de l'ensemble des couches. A l'heure actuelle, cette méthode fait toujours l'objet de travaux dans le but d'intégrer de nouvelles configurations.
- ✓ La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la propagation du son dans un milieu poreux flexible par éléments finis. En particulier le troisième chapitre est l'établissement du modèle décrivant la propagation d'ondes acoustiques dans un milieu poreux en utilisant la théorie de l'homogénéisation. En effet, elle permet d'établir les équations décrivant le comportement macroscopique d'un matériau homogénéisé à partir des équations écrites sur le matériau poreux dont la structure est microscopique. Le dernier chapitre est une illustration numérique du travail théorique obtenu par homogénéisation : la résolution des problèmes microscopiques et macroscopique.

Première partie :
Etude bibliographique et modélisation analytique de la
propagation des ondes acoustiques dans les milieux poreux
multicouches

Chapitre I : Description de la propagation du son dans un milieu poreux

Introduction

Les milieux poreux naturels ont fait l'objet d'études très approfondies par les géophysiciens, notamment pour la recherche pétrolière. La connaissance de leurs propriétés acoustiques est un atout majeur tant pour l'étude de la propagation d'une onde sonore, que pour la description des éléments constituant la couche poreuse elle-même. La grande complexité de ces milieux tient au fait qu'ils sont constitués de plusieurs phases, solides, liquides ou gazeuses imbriqués les uns dans les autres.

Les matériaux poreux artificiels, tels que les céramiques, les mousses en plastiques..., sont couramment utilisés comme absorbant acoustiques pour le traitement des locaux bruyants. Nous nous intéressons tout particulièrement à leurs propriétés de réflexion et de transmission des ondes sonores. Avant de décrire la propagation de ces ondes dans les milieux poreux, nous nous proposons de présenter les grandeurs caractéristiques qui en font la complexité.

Un matériau ou une structure peut être qualifié de milieu poreux s'il contient des espaces vides appelés pores ou vides, noyés dans la matrice solide. Les matériaux que nous étudierons dans ce document peuvent être représentés par un squelette solide saturé d'un fluide. Ils sont donc le mélange de deux phases :

- une phase solide : constituée soit de fibres telles que les laines de verre ou de roche, soit d'une matrice telle que les mousses plastiques.
- une phase fluide : liquide, gaz (particulièrement l'air).

Ce sont les vides au sein du corps poreux qui induisent les grandes différences de comportements physiques que l'on observe entre les solides compacts et les milieux poreux. Ces deux phases interconnectées créent ainsi un ensemble très complexe pour lequel une description mathématique exacte à l'échelle microscopique est pratiquement impossible à réaliser.

Nous nous attacherons donc à décrire un milieu poreux à l'échelle macroscopique, à l'aide de grandeurs définies statistiquement comme en particulier :

- la porosité, représentant le volume relatif des espaces occupés par le fluide ;

- la perméabilité, représentant la capacité du matériau à permettre la circulation du fluide d'une face à l'autre de celui-ci.

I.1 Description d'un milieu poreux

Les matériaux poreux sont des milieux constitués d'une phase solide appelée squelette et d'une phase fluide appelée fluide saturant. Dans cette étude,

- le fluide saturant est l'air et peut librement circuler autour du squelette dit à porosité ouverte.
- le squelette est constitué d'un assemblage continu de poutres formées à base de polymères (Figure 1 à gauche) ou discontinu de fibres de type minérales ou textiles (Figure 1 à droite).

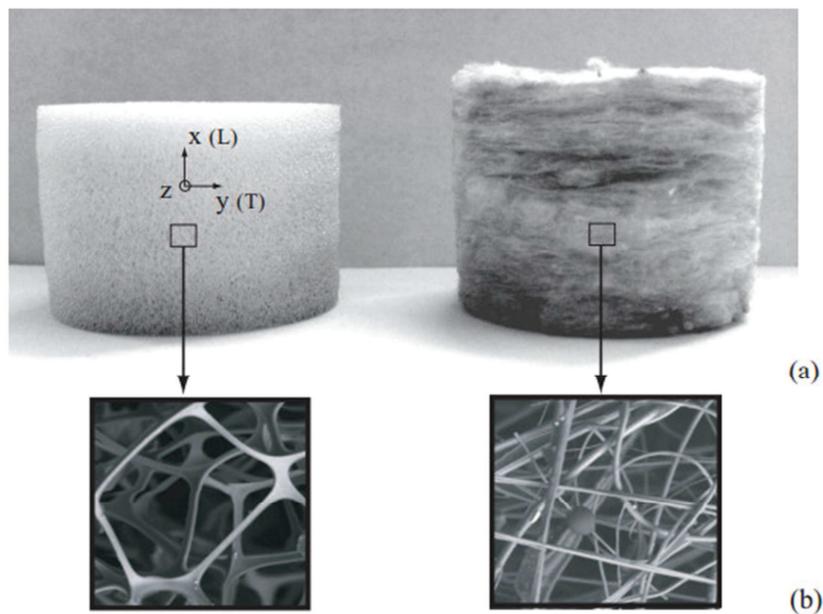


Figure 1 – Photographies d'un échantillon de mousse de polyuréthane et d'une laine de verre : (a) échelle macroscopique, (b) échelle microscopique [2].

Couramment employés dans divers secteurs industriels concernant le confort acoustique, les matériaux poreux permettent de réduire à la fois le niveau sonore mais aussi d'amortir les vibrations d'une structure comme dans les habitacles de véhicules (aviation, automobile). Les mécanismes de dissipation de l'énergie mécanique mis en jeu sont les suivants :

- Le premier de ces mécanismes est lié au comportement viscoélastique du squelette ;

- Le second est rattaché à la viscosité de l'air : lors du mouvement relatif entre les deux phases, les frottements visqueux entre les parois du squelette et fluide vont dissiper l'énergie acoustique ;
- Enfin, le dernier mécanisme est relié aux échanges thermiques entre l'air et le squelette lors du passage d'une onde acoustique.

I.2. Paramètres décrivant le milieu poreux

I.2.1. Paramètres géométriques

I.2.1.1. Porosité ϕ

La porosité d'un milieu poreux est le rapport entre le volume occupé par le fluide Ω_f et le volume total Ω du matériau [4] :

$$\phi = \frac{\Omega_f}{\Omega} \quad (1.1)$$

En notant Ω_s le volume de la phase solide, on a : $\Omega_s = \Omega - \Omega_f$.

I.2.1.2. Mesure de la résistivité σ_R spécifique au passage d'un fluide

La résistance au passage de l'air est définie comme étant le rapport entre la différence de pression ΔP de part et d'autre de l'échantillon teste et le débit Q volumique d'air le traversant. Il existe une relation de proportionnalité entre ΔP et Q donnée par la loi de Darcy [14] :

$$\Delta P = RQ \quad (1.2)$$

où R représente la résistance au passage du fluide. Nous introduisons pour un matériau homogène d'épaisseur d et de section S , la résistivité de passage de l'air σ_R par la relation suivante :

$$\sigma_R = \frac{\Delta P}{Q} \frac{S}{d} \quad (1.3)$$

I.2.1.3 Perméabilité visqueuse k_0

La perméabilité statique visqueuse est reliée à la résistivité au passage du fluide par la relation :

$$k_0 = \eta / \sigma_R \quad (1.4)$$

où η est la viscosité dynamique du fluide.

La perméabilité visqueuse est un paramètre géométrique, homogène à une surface. Elle est indépendante de la nature du fluide saturant et ne dépend que de la géométrie interne du matériau poreux.

I.2.1.4 Longueur caractéristique visqueuse Λ

Les travaux de Johnson et al en 1987 [15] sont la caractérisation des effets visqueux en haute fréquence en introduisant la longueur caractéristique visqueuse Λ donnée par :

$$\frac{2}{\Lambda} = \frac{\int_S v_m^2 dS}{\int_V v_m^2 dV} \quad (1.5)$$

où v_m est la vitesse microscopique d'un fluide parfait incompressible, S l'aire de l'interface entre les phases solide et fluide et V le volume du fluide. La longueur Λ est donc un paramètre géométrique. Cette définition vaut pour une surface solide fluide régulière et pour une épaisseur de couche limite faible devant le rayon de courbure caractéristique de l'interface. Lorsque la surface des pores présente des singularités (pointes), cette définition de la longueur caractéristique n'est plus valable. Le paramètre Λ est un indicateur de la taille des pores étroits, lieu privilégié des échanges visqueux.

I.2.1.5. Longueur caractéristique thermique Λ'

En 1991, Champoux et Allard [15] ont introduit par analogie avec Johnson et al un paramètre géométrique appelé longueur caractéristique thermique donnée par :

$$\frac{2}{\Lambda'} = \frac{\int_S dS}{\int_V dV} \quad (1.6)$$

Dans le cas d'un matériau présentant des pores, Λ' correspond à un rayon moyen des pores. C'est évidemment un paramètre intrinsèque du matériau, ne dépendant que de la géométrie interne du poreux. Nous avons $\Lambda' > \Lambda$ par définition. C'est un paramètre associé aux échanges de chaleur entre le fluide et la structure à haute fréquence. Un schéma représentatif des longueurs caractéristiques visqueuses (1) et thermiques (2), est donné sur la figure 2.

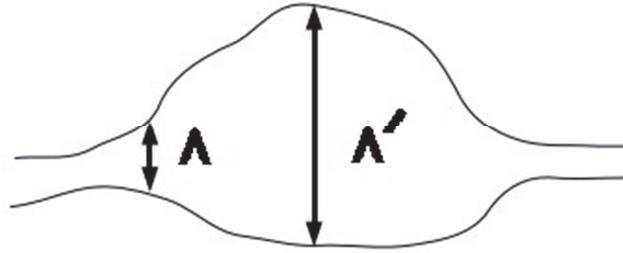


Figure 2 – Schéma représentatif de Λ et Λ' [5].

I.2.2. Paramètres dynamiques

I.2.2.1. La tortuosité α_∞

La tortuosité α_∞ est un paramètre important pour décrire les effets inertiels qui se produisent entre les parties fluide et solide d'un matériau poreux. L'inclinaison et les variations de section des pores obligent le fluide à suivre un chemin non rectiligne. Ainsi, la vitesse moyenne microscopique du fluide va être d'intensité et de direction différente de la vitesse macroscopique (Figure 3). Considérons un milieu poreux constitué de pores cylindriques parallèles, la tortuosité α_∞ correspond au facteur de forme k_s introduit par Zwicker et Kosten [3].

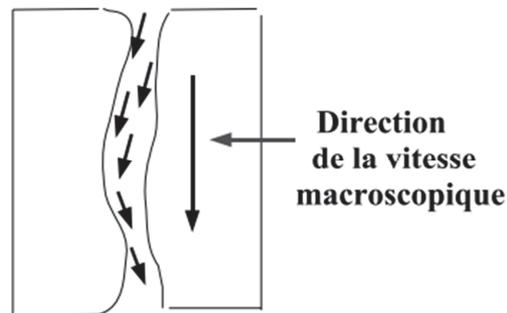


Figure 3 – Variations de l'intensité et de direction de la vitesse d'un fluide inclus dans un pore [5].

Pour des pores de forme quelconque, Johnson et Coll [4] définissent, la tortuosité par :

$$\alpha_\infty = \frac{\frac{1}{V} \int_{V_f} v_m^2 dV}{\left(\frac{1}{V} \int_V v_m dV \right)^2} \quad (1.7)$$

Dans cette expression, v_m est le champ des vitesses microscopiques d'un fluide parfait incompressible s'écoulant à travers la structure et le terme $\left(\frac{1}{V} \int_V v_m dV\right)$ s'interprète comme la vitesse macroscopique.

I.4 Fonctions acoustiques

Pour une paroi, la fonction acoustique d'absorption, capacité à ne pas réfléchir une onde acoustique incidente, est à distinguer de la fonction d'isolation, capacité à ne pas transmettre d'onde incidente à son travers. Ces deux notions peuvent parfois s'opposer : une paroi parfaitement réfléchissante est également parfaitement isolante. Un matériau poreux utilisé seul présente généralement des caractéristiques d'isolation médiocres alors qu'il peut posséder de bonnes propriétés d'absorption.

Les matériaux absorbants sont cependant systématiquement utilisés dans les complexes d'isolations. Tout d'abord, il peut y avoir un effet direct d'isolation sur une onde traversant un milieu absorbant dans la mesure où celui-ci dissipe de l'énergie ; l'amplitude des ondes décroît dans la direction de propagation. Cet effet est directement lié à l'épaisseur du matériau et devient relativement intéressant pour des parois épaisses.

Une autre raison pour laquelle les matériaux absorbants sont utilisés, même pour des parois de faible épaisseur, provient de la conception de double-parois. Ce dispositif est une solution isolante très efficace et un matériau absorbant intercalé entre les deux parois permet, outre d'éviter d'éventuels phénomènes de résonance dans l'épaisseur, d'empêcher tout phénomène de guide d'onde et de transmissions latérales. Dans le cas de doubles parois de faible épaisseur, il peut même s'agir de la principale fonction du poreux [16].

I.5 Modélisation

Les milieux utilisés en isolation acoustique sont généralement des mousses, des laines minérales ou de verre, matériaux que l'on classe dans la catégorie des matériaux poreux à forte porosité et porosité ouverte. Il s'agit de milieux bi-phasiques solide-fluide où les deux phases sont connectées dans l'ensemble du matériau. Il existe principalement deux approches pour les modéliser :

- Modèles de type fluide équivalent ;
- Modèle de Biot Allard.

I.5.1 Modèle de fluide équivalent

Dans le cas du modèle fluide équivalent, on suppose que la présence de la phase solide se traduit par une modification des caractéristiques du fluide dans lequel elle baigne. Les effets sont principalement une modification de la vitesse de propagation et surtout l'introduction de termes dissipatifs dans le comportement du matériau : masse volumique et module équivalent complexes.

Les caractéristiques du fluide équivalent peuvent être obtenues en utilisant des formules empiriques (Delany et Bazley [3]) ou déduites de considérations théoriques provenant généralement de calculs d'homogénéisation de cellules élémentaires de géométrie simple. Nous utilisons ici le modèle de Champoux-Allard [1]. Ce modèle tient compte des effets de couplage visqueux et thermiques entre squelette et air. Il donne pour la masse volumique et le module équivalent les expressions suivantes :

$$\rho(\omega) = \rho_0 \alpha_\infty \left(1 + \frac{\sigma_R \phi}{i\omega \alpha_\infty \rho_0} \sqrt{1 + \frac{4i\alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma_R \Lambda^2 \phi^2}} \right) \quad (1.8)$$

$$K(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \frac{1}{1 + \frac{8\eta}{i\Lambda^2 \text{Pr} \omega \rho_0} \sqrt{1 + i\rho_0 \frac{\omega \text{Pr} \Lambda^2}{16\eta}}}} \quad (1.9)$$

avec $\rho(\omega)$ la masse volumique effective, ω la fréquence, ρ_0 la masse volumique du fluide interstitiel, α_∞ la tortuosité, ϕ la porosité, $K(\omega)$ le module de compressibilité dynamique, σ_R la résistivité de l'air, P_0 la pression atmosphérique, Pr le nombre de

Prandtl, Λ la longueur caractéristique visqueuse, Λ' la longueur caractéristique thermique, γ le rapport des chaleurs spécifiques et η la viscosité cinématique du fluide.

I.5.2 Modèle de Biot Allard

Le modèle de Biot est un modèle décrivant la mécanique de deux phases couplées. La cellule élémentaire possède des variables (déplacement, pression, ...) qui sont des moyennes des mêmes grandeurs à une échelle inférieure. Ainsi, pour chaque cellule, il existe des composantes fluide et solide. L'équilibre se traduit par deux équations couplées, une pour chaque phase.

Comme dans le modèle de Biot, le modèle de Biot-Allard a pour objectif de décrire le comportement d'un matériau poreux. Un matériau est totalement décrit d'un point de vue physique lorsque l'on connaît ses coefficients de Biot.

Le modèle de Biot-Allard (BA) que nous étudions comporte deux lois de mouvement formulées au moyen d'une équation scalaire et d'une équation vectorielle d'inconnues la pression fluide (p) et le déplacement solide (U). Cette formulation dite (U, p) est présentée par la relation (1.10) [13] :

$$\begin{cases} \nabla \cdot \tilde{\sigma} + \omega^2 \rho_s U + \tilde{\gamma} \nabla p = 0 \\ \frac{\phi^2}{\omega^2 \tilde{\rho}_{22}} \Delta p + \frac{\phi^2}{\tilde{R}} p = \tilde{\gamma} \nabla \cdot U \end{cases} \quad (1.10)$$

où les coefficients notés avec le symbole $\tilde{\cdot}$ dépendent de ω .

avec $\tilde{\sigma}$ la relation contrainte-déformation ;

\tilde{R} le module d'incompressibilité du poreux ;

$\tilde{\rho}_{22}$ la masse volumique apparente de Biot ;

ρ_s la masse volumique du solide ;

Les expressions des diverses coefficients utilisés dans le modèle de Biot sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1 –Définition des coefficients intervenant dans le modèle de Biot [13].

Coefficient	Valeur
$\tilde{\sigma}$	$\tilde{\sigma} = \sigma^s(u) + (1 - \phi) pId$
$\tilde{\rho}_s$	$\tilde{\rho}_s = \tilde{\rho}_{11} - \frac{\tilde{\rho}_{12}^2}{\tilde{\rho}_{22}}$
$\tilde{\rho}_{11}$	$\tilde{\rho}_{11} = \rho_s + \phi \rho_f (\alpha_\infty - 1) - i \frac{\tilde{b}}{\omega}$
$\tilde{\rho}_{12}$	$\tilde{\rho}_{12} = -\phi \rho_f (\alpha_\infty - 1) + i \frac{\tilde{b}}{\omega}$
$\tilde{\rho}_{22}$	$\tilde{\rho}_{22} = \phi \rho_f \alpha_\infty - i \frac{\tilde{b}}{\omega}$
\tilde{b}	$\tilde{b} = \sigma_R \phi^2 \sqrt{1 + i \frac{4\alpha_\infty^2 \eta \rho_0 \omega}{\sigma_R \Lambda^2 \phi^2}}$
$\tilde{\gamma}$	$\tilde{\gamma} = \phi \left(\frac{\tilde{\rho}_{12}}{\tilde{\rho}_{22}} - \frac{1 - \phi}{\phi} \right)$
$\frac{\phi^2}{\tilde{R}}$	$\frac{\phi^2}{\tilde{R}} = \frac{\phi \gamma \beta \sqrt{1 + \frac{1}{2\beta} + \phi}}{\gamma P \left(\beta \sqrt{1 + \frac{1}{2\beta} + 1} \right)}$
β	$\beta = -i \frac{8\eta}{\omega \Lambda'^2 \text{Pr} \rho_f}$

$$\text{avec } \Lambda' = \pm \sqrt{-i \frac{8\eta}{\omega \text{Pr} \rho_f \beta}} \quad (1.11)$$

où $\tilde{\rho}_{kk}$ ($\tilde{\rho}_{11}, \tilde{\rho}_{12}$) sont des masses équivalentes complexes tenant comptes de dissipations dont l'origine est la couche limite visqueuse entre le fluide et la phase solide. Le coefficient $\tilde{\rho}_{12}$ introduit les couplages inertiels et visqueux entre les deux phases.