

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الجيلالي بونعامة خميس مليانة
Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences de la Matière



Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention d'un Master en physique Spécialité :
physique théorique

Thème :

Propagation des ondes acoustique dans des milieux poreux
bicouches à structure rigide : simulation numérique en
mode transmission haute fréquence.

Présentée par :

OUBADJI Roumaïssa

Devant le jury composé de :

- Sanaa Zaoui.....Présidente
- Mustapha Sadouki.....Encadreur
- Halima OuldArabExaminatrice

Année universitaire :2022 / 2023

Dédicace

C'est avec grand plaisir que je dédie ce travail :

Particulièrement à mes parents, mon père et ma mère, qui m'ont offert une éducation exemplaire dans ma vie et qui m'ont toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études, ainsi que pour leur amour inconditionnel.

À mes frères (Ayoub, Ilyes, Ahmed) et à mes sœurs (Soumia, Khawla) qui ont toujours été présents pour moi, qui m'ont soutenu et qui m'ont donné leur amour sans faille, ainsi qu'à mes nièces.

À mes amis, collègues, et tous ceux qui me sont proches.

À toute ma famille OUBADJI.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude à Dieu le tout puissant pour sa guidance et sa lumière qui ont illuminé mon chemin tout au long de cette aventure académique.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à mon encadreur, le Dr M. Sadouki, pour son soutien inestimable et ses précieux conseils tout au long de mon travail. Monsieur, je tiens à renouveler mes remerciements les plus sincères et mon profond respect à votre égard.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance envers le Docteur Sanaa Zaoui, qui a accepté d'être le président du jury et m'a honoré de sa présence.

Un remerciement spécial à l'enseignante Halima OuldArab pour avoir accepté d'examiner ce mémoire. Votre expertise et vos commentaires ont été d'une grande valeur pour moi.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers mes parents, mes frères et sœurs, ainsi que mes amis proches pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements tout au long de mon parcours. Leur présence et leur amour ont été des sources d'inspiration inépuisables.

Enfin, je tiens à remercier mes enseignants qui m'ont transmis leurs connaissances et m'ont guidé durant toutes ces années d'études.

Leur dévouement et leur passion pour l'enseignement ont joué un rôle essentiel dans ma formation académique.

Je suis profondément reconnaissant envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de recherche.

Veillez accepter mes remerciements les plus sincères.

ملخص تتناول هذه الدراسة حساسية المعلمات الصوتية عالية التردد في مادة مسامية ثنائية الطبقة ذات بنية صلبة مشبعة بالهواء ، في سياق نظرية السوائل المكافئة ، وهي حالة خاصة لنموذج Biot. يتم وصف التبادل اللزج بالقصور الذاتي والحراري بين المرحتين السائلة والصلبة للوسط المسامي بوظيفتين: التعرج الديناميكي $\alpha(\omega)$ بواسطة Johnson et al. والانضغاط الديناميكي $\beta(\omega)$ الذي قدمه Allard ، وصقله Sadouki لمجال التردد المنخفض للموجات فوق الصوتية. المتغيرات المدروسة هي المسامية ، والتعرج ، وطول الخاصية اللزجة ، والطول الحراري المميز ، وعامل الشكل اللزج والحراري. يتم النظر في اختلاف +20% من هذه المعلمات لتقييم تأثيرها على اتساع الموجات المرسله. تساهم نتائج هذه الدراسة في فهم أفضل لسلوك الموجات عالية التردد في المواد ثنائية الطبقة المسامية وتوفر رؤى قيمة لتصميم هذه المواد وتحسينها في مختلف التطبيقات.

الكلمات المفتاحية: المواد المسامية ، الموجات فوق الصوتية ، المعلمات الفيزيائية ، تحليل الحساسية ، نظرية السوائل المكافئة.

Abstract This study focuses on the sensitivity of high-frequency acoustic parameters in a porous bilayer material with a rigid air-saturated structure within the context of the equivalent fluid theory, which is a particular case of the Biot model. The visco-inertial and thermal exchange between the fluid and solid phases of the porous medium is described by two functions: the dynamic tortuosity $\alpha(\omega)$ given by Johnson et al. and the dynamic compressibility $\beta(\omega)$ given by Allard, refined by Sadouki for the low-frequency domain of ultrasound. The studied parameters include porosity, tortuosity, viscous characteristic length, thermal characteristic length, and viscous and thermal shape factors. A variation of +20% for these parameters is considered to evaluate their impact on the transmitted wave amplitudes. The results of this study contribute to a better understanding of high-frequency wave behavior in porous bilayer materials and provide valuable insights for the design and optimization of such materials in various applications.

Keywords: porous media, bilayer materials, ultrasound, sensitivity analysis, equivalent fluid theory, dynamic tortuosity.

Résumé Cette étude porte sur la sensibilité des paramètres acoustiques à haute fréquence dans un matériau poreux bicouche avec une structure rigide saturée en air, dans le contexte de la théorie des fluides équivalents, qui est un cas particulier du modèle de Biot. L'échange visco-inertiel et thermique entre les phases fluide et solide du milieu poreux est décrit par deux fonctions: la tortuosité dynamique $\alpha(\omega)$ de Johnson et al. et la compressibilité dynamique $\beta(\omega)$ donnée par Allard, affinées par Sadouki pour le domaine basse fréquence des ultrasons. Les paramètres étudiés sont la porosité, la tortuosité, la longueur caractéristique visqueuse, la longueur caractéristique thermique et le facteur de forme visqueux et thermique. Une variation de +20% de ces paramètres est considérée pour évaluer leur impact sur l'amplitude des ondes transmises. Les résultats de cette étude contribuent à une meilleure compréhension du comportement des ondes à haute fréquence dans les matériaux bicouches poreux et fournissent des indications précieuses pour la conception et l'optimisation de ces matériaux dans diverses applications.

Mots-clés : matériaux poreux, ultrason, paramètres physiques, analyse de sensibilité, théorie des fluides équivalents.

Notations utilisées :

- L'indice « ∞ » désigne la limite haute fréquence d'une variable : $\alpha_{\infty} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \alpha(\omega)$.
- Le symbole prime « ' » utilisées pour désigne les grandeurs liées aux effets thermiques par analogie à celles dues aux effets visqueux.
- L'indice « 0 » désigne la limite basse fréquence d'une variable : $\alpha_0 = \lim_{\omega \rightarrow 0} \alpha(\omega)$.

Symbole	Grandeur désigne	Unité SI
Φ	Porosité	
α_{∞}	Tortuosité haute fréquence	
α_0	Tortuosité basse fréquence	
Λ	Longueur caractéristique visqueuse	m
Λ'	Longueur caractéristique thermique	m
Coef Λ	Le rapporte entre la longueur thermique et visqueuse	
P	Paramètre inertiel de pride	
Σ	Résistivité au passage de fluide	$kg.m^{-3}.S^{-1}$
k_0	Perméabilité visqueuse statique	m^2
k'_0	Perméabilité thermique statique	m^2

Tableau a – Paramètres utilisées qui décrivant le comportement des matériaux.

Symb.	Grandeur désignée	Unités SI
i,j	Nombre complexe	$\sqrt{-1}$
C	Célérité de son	$m.s^{-1}$
V	Vitesse acoustique	$m.s^{-1}$
P	Pression acoustique	<i>pa</i>
Z	Impédance acoustique caractéristique	$kg.m^{-2}.S^{-1}$
ω	Pulsation	$rad.s^{-1}$
$k(\omega)$	Perméabilité dynamique	m^2
$k'(\omega)$	Perméabilité thermique	m^2
$\alpha(\omega)$	Tortuosité dynamique	
$\beta(\omega)$	Compressibilité dynamique	
γ	Rapport des chaleurs spécifiques	
δ	Couche limite visqueuse	<i>m</i>
δ'	Couche limite thermique	<i>m</i>
η	Viscosité dynamique	$kg.m^{-1}.S^{-1}$
ρ	Densité (masse volumique)	$kg.m^{-3}$

Tableaux b – symboles et notations utilisées

Symbole	Grandeur désignée	Valeur pour l'air	Unité SI
C_f	Célérité de dans le fluide saturé d'air	343	$m.s^{-1}$
C_p	Chaleur spécifique à pression constante	1006	$J.K.kg^{-1}$
C_v	Chaleur spécifique à volume constante	718	$J.K.kg^{-1}$
Γ	Rapport de chaleur spécifique (C_p/C_v)	1.40	
P_r	Nombre de Prandtl	0.710	
P_0	Pression ambiante	101325	Pa
k	Conductivité thermique	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$W.m^{-1}.K^{-1}$
η	Viscosité dynamique	$18.4 \cdot 10^{-6}$	$Kg.m^{-1}.s^{-1}$
ρ_f	Masse volumique	1.20	$kg.m^{-3}$
K_a	Module d'incompressibilité isotherme	$1.4 \cdot 10^5$	pa^{-1}

Tableaux c – propriétés du fluide saturant le milieu poreux (l'aire).

Table des Figures

Figure 1.1: Représentation schématique d'un milieu poreux, montrant la phase solide et la phase fluide.....	9
Figure 1.2- la porosité d'interstice et la porosité à fissure.....	10
Figure 1.3 - variation de norme de direction de la vitesse d'un fluide inclus dans un pore.....	14
Figure 1.4 - Dispositif pour mesurer la résistivité au passage de l'air.....	16
Figure 1.5 - Schéma représentant Λ et Λ'	18
Figure 2.1- Géométrie du problème en incidence normale.....	31
Figure 2.2- Géométrie du problème d'un milieu bicouche en incidence normale.....	34
Figure 3.1 - Le signal incident et le signal transmis simulé d'un milieu poreux bicouche construit en fréquentiel via l'expression (3.3) et en temporel via l'équation (3.4).....	42
Figure 3.2 - La sensibilité de la porosité $\phi^{(1)}$ et $\phi^{(2)}$ des deux couches sur le signal transmis à la fréquence 70kHz.....	43
Figure 3.3 - La sensibilité de la tortuosité $\alpha_{\infty}^{(1)}$ et $\alpha_{\infty}^{(2)}$ des deux couches sur le signal transmis à 70kHz.....	45
Figure 3.4 - La sensibilité de la longueur caractéristique visqueuse $\Lambda^{(1)}$ et $\Lambda^{(2)}$ des deux couches sur le signal transmis pour une fréquence de 70 kHz.....	46
Figure 3.5 - La sensibilité du rapport de la longueur caractéristique thermique $\Lambda'/\Lambda^{(1)}$ et $\Lambda'/\Lambda^{(2)}$ sur le signal transmis pour une fréquence de 70 kHz.....	48
Figure 3.6 - La sensibilité du facteur de forme visqueux $\xi^{(1)}$ et $\xi^{(2)}$ des deux couches sur le signal transmis pour une fréquence de 70 kHz.....	49
Figure 3.7 - La sensibilité du facteur de forme thermique $\xi'^{(1)}$ et $\xi'^{(2)}$ des deux couches sur le signal transmis pour une fréquence de 70 kHz.....	50

Table de matière

Introduction générale.....	3
Chapitre 1 : description d'un milieu poreux.	
1. Introduction.....	7
2. Le milieu poreux et ces hypothèses.....	8
2.1. Continuité.....	8
2.2. Homogénéité.....	9
2.3. Grande longueur d'onde.....	9
2.4. Isotropie.....	9
2.5. Structure rigide.....	9
3. Paramètre décrivant le milieu poreux.....	9
3.1. Porosité ϕ	10
3.2. Tortuosité.....	10
a. Tortuosité haut fréquence α_∞	12
b. Tortuosité basse fréquence.....	12
b. 1. Facteur d'inertie α_0	14
b. 2. Tortuosité thermique α'_0	14
3.3. Résistivité au passage du fluide σ	14
3.4. Perméabilité visqueuse k_0	14
3.5. Perméabilité thermique k'_0	14
3.6. Longueur caractéristique visqueuse Λ	15
3.7. Longueur caractéristique thermique Λ'	16

4. Mesure des paramètres d'un milieu poreux	16
5. Théorie du fluide équivalent.....	17
5.1. Susceptibilité dynamique $\alpha(\omega)$ et thermiques $\beta(\omega)$	17
5.2. Modélisation des effets inertiels et visqueuse.....	18
5.3. Modalisation des phénomènes thermiques.....	20
Conclusion.....	21
Chapitre 2 : Théorie du fluide équivalent.	22
1. Introduction	24
Problème direct.....	26
2.1. Monocouche en incidence normale.....	
3. Régime haut et basse fréquence des ultrasons.....	
Conclusion.....	28
	28
	29
	32
	33
Chapitre 3 :	
1. Introduction.....	

Introduction générale

Introduction générale

Les milieux poreux sont des matériaux qui possèdent des pores, de petits espaces vides à l'intérieur de leur structure. Ces pores peuvent avoir différentes tailles et formes, et ils peuvent être interconnectés pour former un réseau complexe [1].

Les milieux poreux sont présents dans de nombreux domaines tels que la géologie, la chimie, l'ingénierie des matériaux et la biologie. Ils sont étudiés en raison de leurs propriétés uniques et de leur importance dans de nombreux processus naturels et technologiques.

L'une des caractéristiques clés des milieux poreux est leur capacité à stocker et à transporter des fluides. En raison de la présence de pores, les milieux poreux peuvent absorber des liquides ou des gaz à l'intérieur de leur structure, ce qui a des implications importantes dans des applications telles que la filtration, l'adsorption, la séparation et le stockage de fluides.

La taille et la distribution des pores sont des paramètres importants qui influencent les propriétés des milieux poreux. Les pores peuvent varier en taille, allant de quelques nanomètres à plusieurs centaines de micromètres. La taille des pores peut avoir un impact sur la capacité d'absorption, la perméabilité et la réactivité chimique des milieux poreux.

De plus, la structure des milieux poreux peut être caractérisée par des paramètres tels que la porosité, qui représente la fraction de l'espace total occupée par les pores, et la tortuosité, qui mesure la complexité du réseau de pores [1-4].

Les milieux poreux peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur structure et de leurs propriétés. Par exemple, on distingue les milieux poreux isotropes, où les propriétés sont uniformes dans toutes les directions, des milieux poreux anisotropes, où les propriétés varient selon la direction.

Les milieux poreux sont largement utilisés en tant que milieux diphasiques dans divers domaines de l'ingénierie, ainsi que dans les industries du bâtiment, de l'automobile et de l'aéronautique, en raison de leurs propriétés d'insonorisation et d'isolation thermique. Ces matériaux possèdent plusieurs paramètres physiques et mécaniques qui décrivent leurs propriétés spécifiques [1-3]. Différents modèles théoriques et semi-phénoménologiques ont

été développés pour décrire le comportement acoustique de ces matériaux [1-9]. Parmi ces modèles, on peut citer le modèle semi-phénoménologique de Johnson et Allard [2,3], ainsi que le modèle de Pride [1], utilisé dans le cadre de la théorie des fluides équivalents lorsque la structure des milieux poreux est rigide. Dans le cas général, le modèle de Biot [5-7] est utilisé, prenant en compte le mouvement simultané des deux phases fluides et solides.

De nombreuses études ont été menées dans la littérature pour analyser l'effet des paramètres physiques et mécaniques qui décrivent les milieux poreux sur l'atténuation et la vitesse de propagation des ondes acoustiques à travers ces matériaux [10-15].

L'objectif de cette étude est d'analyser la propagation acoustique dans des milieux poreux bicouches à structure rigide en utilisant la théorie des fluides équivalents. Cette étude se compose de trois chapitres.

Le premier chapitre présente une description générale des milieux poreux, en décrivant les différents modèles, hypothèses et paramètres utilisés pour les caractériser. On aborde également les propriétés fondamentales des milieux poreux, telles que les différentes formes des pores, les hypothèses relatives à leur comportement, la continuité des phases et l'homogénéité du milieu. De plus, les différentes classifications des milieux poreux en fonction de leur structure et de leurs propriétés sont exposées, notamment la distinction entre les milieux poreux isotropes et anisotropes.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude analytique de la propagation acoustique dans les milieux poreux monocouches et bicouches. Des expressions analytiques des coefficients de réflexion et de transmission sont établies en régime fréquentiel, puis en régime temporel. Ces expressions dépendent des paramètres physiques décrivant ces environnements, ainsi que de la fréquence des ondes acoustiques. On explore en détail les relations entre les paramètres physiques des milieux poreux et les caractéristiques de la propagation acoustique.

Le troisième chapitre se concentre sur une étude de simulation numérique visant à évaluer la sensibilité de l'amplitude de l'onde transmise dans un milieu bicouche, dans le régime basse fréquence des ultrasons, face à une variation de +20% des paramètres physiques. Cette analyse permet de comprendre l'influence de chaque paramètre sur le comportement acoustique du milieu bicouche et d'identifier les facteurs les plus significatifs.

En conclusion, cette étude vise à approfondir notre compréhension de la propagation acoustique dans les milieux poreux bicouches à structure rigide. Les résultats obtenus grâce à

l'analyse analytique et à la simulation numérique fournissent des informations précieuses sur les propriétés acoustiques de ces matériaux. Les perspectives pour de futures recherches sont également discutées, notamment l'extension de l'étude à des milieux poreux plus complexes et l'exploration de nouvelles méthodes d'analyse et de modélisation.

Chapitre 1:

Description générale des milieux poreux

1. Introduction :

Le premier chapitre de ce travail vise à fournir une description générale des milieux poreux en mettant l'accent sur les modèles, les hypothèses et les paramètres utilisés pour caractériser ces environnements complexes. Les milieux poreux sont des matériaux diphasiques composés d'une phase solide rigide et d'une phase fluide. En raison de leurs propriétés d'insonorisation et d'isolation thermique, ils sont largement utilisés dans divers domaines de l'ingénierie et des industries.

Dans un premier temps, nous abordons les différentes hypothèses et approximations couramment utilisées dans l'analyse des milieux poreux, telles que l'approximation des ondes planes, l'homogénéisation et l'hypothèse de fluide équivalent. Nous mettons en évidence les limites et les défis associés à ces modèles et hypothèses, ainsi que les domaines où ils sont applicables. Ensuite, nous présentons les différentes structures et configurations rencontrées dans les milieux poreux. Nous décrivons puis les principales propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux, telles que la porosité, la tortuosité, la perméabilité visqueuse et thermique, la densité et la viscosité. Ces paramètres jouent un rôle crucial dans la caractérisation et la compréhension du comportement acoustique des milieux poreux. Enfin, nous examinons les modèles théoriques utilisés pour décrire les milieux poreux. Nous introduisons le modèle de Biot, qui est le modèle de référence pour les milieux poreux généraux, prenant en compte les mouvements simultanés des phases solide et fluide. Ensuite, nous analysons en détail le modèle semi-phénoménologique de Johnson et Allard, largement utilisé pour les structures rigides. Nous présentons également le modèle de Pride et Lafarge, utilisé dans le cadre de la théorie des fluides équivalents pour les structures poreuses rigides. De plus, nous discutons de la correction de ce modèle dans le régime basse fréquence des ultrasons proposée par Sadouki.

Ce premier chapitre établit donc une base solide pour la compréhension des milieux poreux en fournissant une vue d'ensemble des structures, des propriétés physiques et mécaniques, ainsi que des modèles théoriques utilisés dans l'étude de la propagation acoustique. Il constitue ainsi une étape essentielle avant d'entrer dans les détails de l'étude analytique et numérique des milieux poreux bicouches dans les chapitres suivants.

2. Le milieu poreux :

Un milieu poreux est un matériau qui se compose de deux phases distinctes : une phase solide (le squelette) et une phase fluide (l'espace vide contenant les pores) [1-6]. Lorsqu'une onde acoustique se propage à travers ce milieu, elle interagit avec les deux phases, ce qui confère au milieu ses propriétés physiques particulières.

La Figure 1.1 présente une représentation schématique d'un milieu poreux, mettant en évidence la présence de la phase solide et de la phase fluide. Il est important de noter que les milieux poreux se trouvent à la fois dans la nature, tels que les roches, et dans des matériaux artificiels, tels que les céramiques.

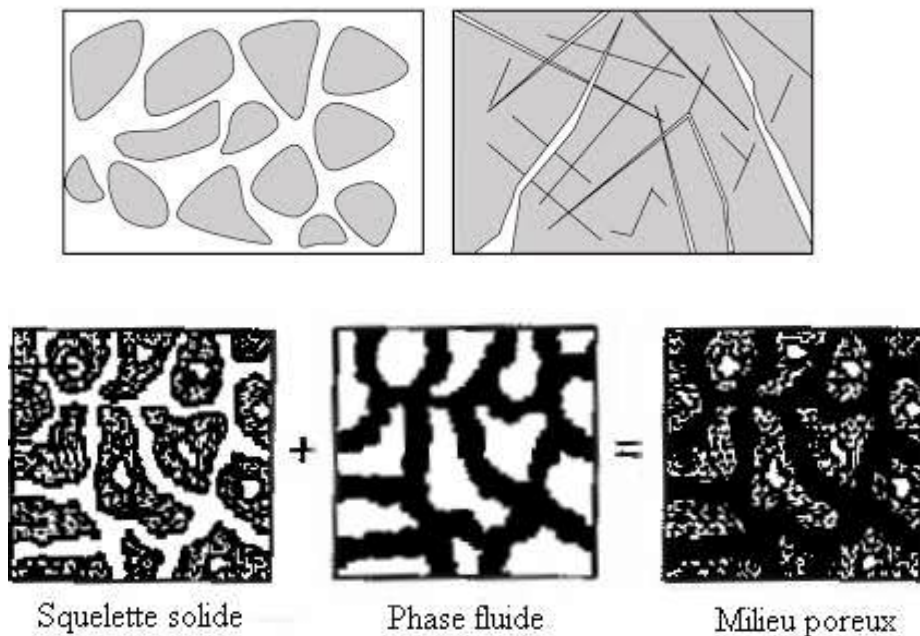


Figure 1.1: Représentation schématique d'un milieu poreux, montrant la phase solide et la phase fluide.

Les milieux poreux sont d'une grande importance dans de nombreux domaines de recherche et d'application. Leur capacité à stocker et à transporter des fluides joue un rôle essentiel dans des processus tels que la filtration, l'adsorption, la séparation et le stockage de fluides. C'est pourquoi ils sont largement étudiés dans des disciplines telles que la géologie, la chimie, l'ingénierie des matériaux et la biologie.

L'étude des milieux poreux vise à comprendre leurs propriétés physiques et à développer des modèles et des théories pour décrire leur comportement. En examinant les interactions entre la phase solide et la phase fluide, il est possible d'analyser les propriétés acoustiques, thermiques, mécaniques et de transport des milieux poreux.

Il convient également de souligner que les milieux poreux peuvent être classés en fonction de leur structure, de leurs propriétés et de leur origine. Cette classification permet une meilleure compréhension de la diversité des milieux poreux et permet d'adapter les approches d'étude et de modélisation en conséquence.

2.1 Les pores :

Les pores dans un milieu poreux peuvent être classés en deux types en fonction de leur forme :

a. Porosité d'interstice : Ce type de porosité se réfère à la présence de vides interstitiels remplis de fluide qui entourent la phase solide dans la matrice du milieu poreux. Ces pores d'interstice sont généralement présents entre les particules solides et peuvent varier en taille et en forme.

b. Porosité de fissure : Dans certains cas, des fissures se forment dans le matériau poreux ou les roches, ce qui donne lieu à une porosité de fissure. Ces fissures peuvent être le résultat de contraintes mécaniques, de mouvements tectoniques ou d'autres facteurs. La porosité de fissure peut être importante pour la perméabilité et la connectivité des pores dans le milieu poreux.

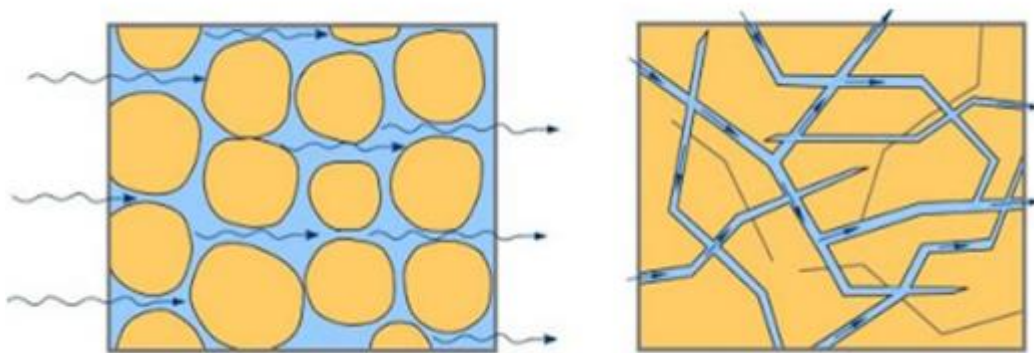


Figure 1.2- la porosité d'interstice et la porosité à fissure.

Il est essentiel de comprendre la nature et la distribution des pores dans un milieu poreux, car elles influencent directement les propriétés du matériau. La taille, la forme et la distribution des

pores peuvent affecter la capacité d'absorption, la perméabilité, la réactivité chimique et d'autres caractéristiques du milieu poreux.

Il convient de noter que la présence de différents types de pores peut varier selon le matériau poreux étudié et son origine. La caractérisation précise des pores est donc une étape cruciale pour comprendre les propriétés physiques et les comportements des milieux poreux.

3. Caractéristiques de milieux poreux :

Les milieux poreux possèdent certaines caractéristiques distinctives. Le calcul des paramètres des milieux poreux permet de déterminer les propriétés appropriées de ces milieux. Ces matériaux sont souvent utilisés pour leur capacité d'isolation thermique et acoustique. Ils sont caractérisés par plusieurs paramètres statistiques qui décrivent leur structure et leurs propriétés. Les milieux poreux trouvent des applications dans divers domaines tels que l'acoustique, la médecine, l'agronomie, et bien d'autres encore. En calculant les différents paramètres statistiques, il devient possible d'étudier les interactions entre le fluide et le solide lorsque les ondes acoustiques se propagent à travers les matériaux poreux. Un principe fondamental des milieux poreux repose sur la surface de contact entre les vides et la structure solide. Les paramètres caractéristiques peuvent être déterminés à partir des basses fréquences et des hautes fréquences.

4. Hypothèses sur le milieu poreux :

La compréhension des milieux poreux à l'échelle microscopique révèle une structure désordonnée qui ne possède pas une forme stable. Cependant, à l'échelle macroscopique, le milieu poreux est considéré comme homogène. C'est pourquoi l'étude du comportement d'un milieu poreux à l'échelle macroscopique se base sur les grandeurs microscopiques. On suppose que les déplacements des phases solides et fluides sont petits. Pour les phénomènes acoustiques, cette condition est toujours vérifiée. Les hypothèses de travail adoptées seront explicitées dans ce qui suit [1,7]:

4.1. Continuité des phases :

Le fluide présent dans les vides d'un matériau poreux est constitué d'environ 10^7 molécules. Le libre parcours moyen d'une molécule est beaucoup plus petit que la distance moyenne caractéristique de la variation d'état de la particule fluide. De même, le temps moyen entre deux collisions de molécules est bien inférieur au temps caractéristique d'une telle

variation d'état [1]. C'est pourquoi les phases d'un matériau poreux sont considérées comme continues.

4.2. Homogénéité :

Il a été précédemment établi que le milieu poreux est désordonné à l'échelle microscopique, mais à l'échelle macroscopique, le milieu poreux est bien ordonné et homogène. Cette définition nécessite la prise en compte de la microstructure en utilisant des techniques d'homogénéisation [1] au niveau du volume macroscopique.

4.3. Grande longueur d'onde :

Les ondes acoustiques se propagent à travers les matériaux poreux, comme l'air, et provoquent des vibrations mécaniques sous forme d'ondes. L'étude se concentre sur des fréquences élevées par rapport au volume d'homogénéisation. Les acoustiques macroscopiques sont négligées.

4.4. Isotropie :

L'isotropie est une hypothèse couramment utilisée pour simplifier l'étude des milieux poreux, supposant que leurs propriétés sont uniformes dans toutes les directions. Cependant, dans des situations réelles, il est important de prendre en compte l'anisotropie potentielle pour une compréhension plus précise du comportement des milieux poreux. L'identification et la caractérisation de l'anisotropie permettent de mieux modéliser et prédire les performances des milieux poreux dans divers domaines d'application.

5. Les paramètres décrivant les milieux poreux :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser les milieux poreux. Certains de ces paramètres dépendent de la forme de la partie solide, tels que la porosité et la tortuosité. Ils ne varient pas en fonction des changements de forme du solide. D'autres paramètres dépendent des échanges de matière, tels que la perméabilité visqueuse et thermique. Ils sont influencés par la surface si elle est dilatée. Lorsque les ondes acoustiques se propagent dans les milieux poreux, les parties solides et fluides de ce milieu entrent en vibration et en mouvement, interagissant les unes avec les autres. Ce phénomène dépend uniquement de la forme du solide poreux et ne varie pas lorsque le solide est dilaté ou que son échelle est modifiée [1].

5.1 Porosité ϕ :

La porosité est définie comme le rapport du volume des vides (V_f) au volume total (V_t) du corps considéré. Le volume du solide (V_s) est donné par $V_s = V_t - V_f$. Ainsi, il suffit de mesurer deux de ces trois paramètres pour calculer la porosité [1,3]. La porosité n'a pas d'unité et est généralement exprimée en pourcentage.

$$\phi = V_f / V_t \quad (1.1)$$

V_f : le volume de fluide occupé dans le vide de la partie solide.

V_t : le volume total occupé par le matériau.

D'après la relation de porosité, on remarque qu'elle est déterminée par trois paramètres volumiques : V_s , V_t et V_f .

Il existe des méthodes indirectes pour mesurer la porosité [16,17].

a. Les types de porosité :

La porosité est dite ouverte lorsque les pores sont connectés les uns aux autres. Lorsque le fluide qui constitue le milieu poreux est enfermé, la porosité est dite occluse. Ce type de porosité est très rare. Il existe également la porosité piégée, qui mesure les espaces semi-fermés où un fluide mouillant ne peut pas pénétrer facilement.

Dans la plupart des milieux poreux étudiés, nous négligeons toutes les parties fluides emprisonnées à l'intérieur du solide, car elles ne contribuent pas aux caractéristiques de la structure [1-4]. La porosité a une valeur comprise entre 0 (pour les matériaux solides) et 1 (pour les vides dans les matériaux libres). Les matériaux utilisés pour l'absorption acoustique ont généralement une porosité variant entre 0,85 et 0,99 [1].

5.2 La tortuosité :

La description de la géométrie des pores implique la notion de connectivité, qui correspond à la complexité du chemin continu à travers l'espace des pores [1-3]. La tortuosité est un paramètre important qui étudie les effets qui se produisent entre la partie fluide et la partie solide.

Certains pores peuvent être des cylindres droits, mais dans la plupart des cas, ils ont des sections inclinées et variables, ce qui oblige le fluide à suivre un chemin sinueux. La tortuosité décrit l'effet d'inertie qui se produit entre la partie fluide et solide d'un matériau poreux [1].

La vitesse macroscopique moyenne est différente de la vitesse microscopique, comme illustré dans la figure 1. La tortuosité prend sa plus faible valeur ($\alpha_\infty = 1$) dans le cas de matériaux poreux ayant des pores droits, et de plus grandes valeurs ($\alpha_\infty = 1,5$ à 2.) pour les matériaux les plus résistifs [1].

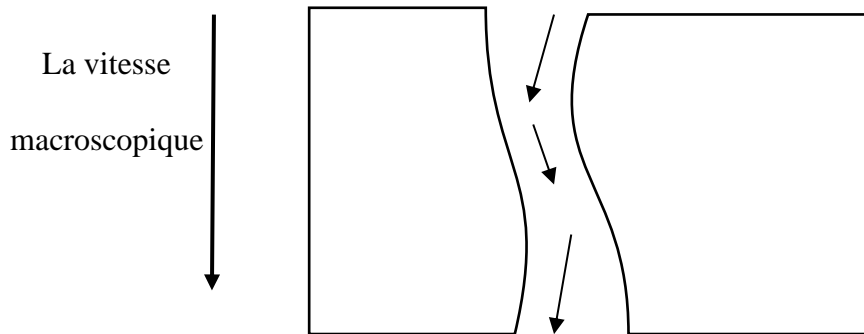


Figure 1.3 - variation de norme de direction de la vitesse d'un fluide inclus dans un pore.

Dans le cas où les milieux poreux sont parallèles à des pores cylindriques, la présence du squelette poreux entraîne des écoulements de fluide sinueux associés au passage d'une onde dans le milieu. Ce paramètre correspond au facteur k_s introduit par Zwikker et Kosten [3]. Dans le cas où les pores peuvent avoir n'importe quelle forme, Johnson et al. définissent la tortuosité α_∞ comme suit :

$$\alpha_\infty = \frac{\frac{1}{V_f} \int_{V_f} v_m^2 dV}{\left(\frac{1}{V_f} \int_{V_f} v_m dV \right)^2}. \quad (1.2)$$

Où v_m représente le champ des vitesses microscopiques d'écoulement dans les pores pour un fluide sans viscosité.

$\left(\frac{1}{V_f} \int_{V_f} v_m^2 dV \right)$ représente la vitesse macroscopique.

Dans notre étude, nous considérons une fréquence très élevée, et Allard et al. donnent:

$$\alpha_\infty = \sqrt{\frac{C_f}{C_\infty}}, \quad \text{Avec } C_f = \sqrt{K_a / \rho_f} \quad (1.3)$$

C_f représente la vitesse de l'onde dans le fluide.

ρ_f la densité de fluide.

K_a le module d'incompressibilité adiabatique de fluide.

C_∞ la vitesse à l'infini dans le matériau.

La valeur de la tortuosité est supérieure ou égale à 1. Cette valeur est pour les matériaux poreux ayant des pores droits. Dans le cas des mousses plastiques et des matériaux fibreux, la valeur de la tortuosité varie entre 1 et 2. La tortuosité est un paramètre géométrique qui décrit l'aspect sinusoidal des pores, cet aspect étant la cause principale du couplage inertiel entre le fluide et la structure, qui se manifeste comme une masse ajoutée au fluide [1-4]. Des méthodes indirectes existent dans la littérature permettant de mesurer ce paramètre [15,17,18]

5.3 Facteur d'inertie α_0 :

Le facteur d'inertie α_0 représente l'approximation à basse fréquence de la tortuosité dynamique, introduite par Norris [8].

$$\alpha_0 = \langle v(r)^2 \rangle / \langle v(r) \rangle^2 \quad (1.4)$$

$\langle v(r) \rangle$ est la vitesse moyenne du fluide visqueux pour un flux de courant continu dans un petit élément de volume par rapport à la longueur d'onde pertinente, mais suffisamment grand par rapport aux grains et pores individuels du solide. La tortuosité est un paramètre défini à haute fréquence. Ce paramètre se calcule par méthode indirecte en réflexion ou en transmission basse fréquence [16]

5.4 Tortuosité thermique α_0' :

La tortuosité thermique α_0' est la contrepartie thermique de la tortuosité α_0 pour les effets visqueux. Il s'agit d'un paramètre d'inertie thermique à basse fréquence [1,3] et est définie comme suit :

$$\alpha_0' = \langle \theta_0^2 \rangle / \langle \theta_0 \rangle^2, \quad (1.5)$$

où θ_0 représente le champ de réponse à l'excès de température dans la gamme des basses fréquences. Il convient de noter que ce paramètre n'a pas été mesuré expérimentalement jusqu'à présent.

5.5 Résistivité au passage de l'air σ :

La résistivité au passage de l'air σ est utilisée pour décrire la facilité avec laquelle le fluide traverse le milieu poreux. Elle est définie par le rapport entre le débit volumique d'air Q et la différence de pression ΔP d'un échantillon, conformément à la loi de Darcy :

$$\Delta P = R \cdot Q \quad (1.6)$$

où ΔP représente la différence de pression d'un échantillon, R désigne la résistance au passage du fluide, et Q correspond au débit volumique d'air. Il existe une relation proportionnelle entre ces quantités.

Dans le cas d'un matériau homogène d'épaisseur d et de section S , la résistivité de l'air σ est introduite par la relation (1.7) suivante [1,3] :

$$\sigma = R \cdot (S/d) \quad (1.7)$$

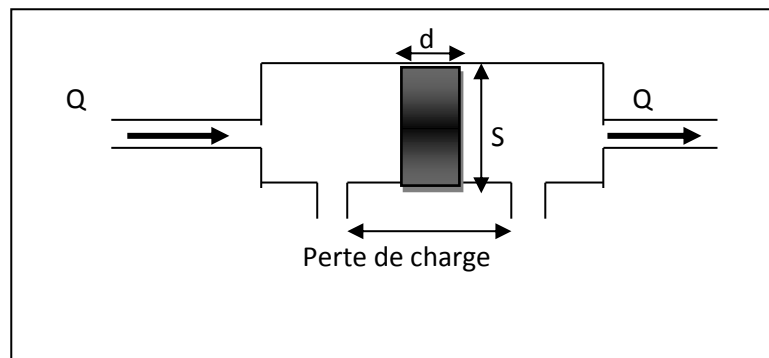


Figure 1.4 - Dispositif pour mesurer la résistivité au passage de l'air.

La résistivité au passage de l'air peut être calculée par le problème inverse via les ondes transmises dans le régime basse fréquence [14].

5.6 Perméabilité visqueuse k_0 :

La loi de Darcy s'applique au flux d'air dans une direction. La perméabilité est donnée par l'équation suivante :

$$v_e = -k_0/\eta (\partial P/\partial x) \quad (1.8)$$

où v_e représente la vitesse d'écoulement à l'extérieur du matériau ou le débit par unité de surface.

k_0 désigne la perméabilité visqueuse du matériau ou la perméabilité de Darcy.

η correspond à la viscosité dynamique du fluide. Pour l'air, $\eta = 1,84 \times 10^{-5}$ Pa.s.

$(\partial P/\partial x)$ représente le gradient de pression dans la direction de l'écoulement.

Darcy fournit une relation reliant la résistivité et la perméabilité, qui s'écrit comme suit :

$$k_0 = \eta/\sigma \quad (1.9)$$

Il existe des méthodes indirectes pour calculer ce paramètre [14, 19]

5.7 Perméabilité thermique k_0' :

La perméabilité thermique représente, tout comme la perméabilité k_0 pour les effets visqueux, une section efficace pour les échanges thermiques, elle est homogène à une surface [1]. La perméabilité est homogène.

La loi de Lafarge s'écrit comme suit :

$$T = k_0'/\chi (\partial P/\partial t) \quad (1.10)$$

où χ représente le coefficient de conduction thermique.

T La température, tout comme la vitesse v , est liée à la température.

Si on compare la perméabilité visqueuse et thermique, on remarque que la viscosité dynamique du fluide correspond au coefficient de conduction, ainsi que pour la valeur de $(\partial P/\partial t)$.

La perméabilité est définie comme suit :

$$k_0' = 1/\Gamma \quad (1.11)$$

où Γ représente la constante de piégeage.

5.8 Longueurs caractéristiques visqueuses Λ :

La longueur caractéristique visqueuse Λ est définie comme suit :

$$\frac{2}{\Lambda} = \frac{\int_{s_i} v_m^2 ds_i}{\int_{V_f} v_m^2 dV} \quad (1.12)$$

où v_m représente la vitesse microscopique d'un fluide incompressible.

V représente le volume d'homogénéisation.

s_i correspond à l'aire de la surface de contact fluide-solide dans ce volume.

V_f représente le domaine du fluide.

Le fluide à l'intérieur des pores est considéré comme un fluide parfait, à l'exception du fluide qui se sature près des parois des pores. L'interaction du fluide avec les parois des pores entraîne une diminution de la vitesse du fluide. C'est un paramètre à haute fréquence qui indique

les pores de petite taille, qui sont des lieux privilégiés d'échange de chaleur. Ainsi, les effets visqueux se manifestent à l'intérieur d'une certaine épaisseur, appelée longueur caractéristique Λ [1,2].

5.9 Longueurs caractéristiques thermiques Λ' :

Par analogie avec la modélisation de Johnson pour les effets visqueux, Allard et Champoux [1] définissent avec Λ , la longueur thermique Λ' par la relation suivante :

$$\frac{2}{\Lambda'} = \frac{\int S_i dS_i}{\int V_f dV'} \quad (1.13)$$

où S_i est la surface de l'interface fluide solide et V_f représente le domaine fluide. Dans le cas d'un matériau présentant des pores, Λ' correspond à un rayon moyen des pores.

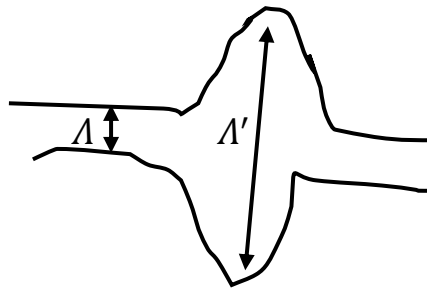


Figure 1.5 - Schéma représentant Λ et Λ'

6. Modèles théoriques:

La théorie de Biot et la théorie du fluide équivalent sont deux approches largement utilisées pour modéliser le comportement des matériaux poreux en présence d'ondes acoustiques. Ces théories permettent de comprendre et de prédire les propriétés acoustiques de la propagation dans les milieux poreux,

La théorie de Biot [5,6], développée par Maurice A. Biot dans les années 1950, considère le matériau poreux comme une combinaison de deux phases : la phase solide (squelette) et la phase fluide (les pores remplis de fluide). Selon cette théorie, les ondes acoustiques induisent des mouvements dans les deux phases, et les interactions visco-thermiques entre les phases solide et fluide sont prises en compte. La théorie de Biot permet

d'expliquer des phénomènes complexes tels que l'effet de relaxation visco-élastique et l'influence de la perméabilité et de la porosité sur les propriétés acoustiques.

D'autre part, la théorie du fluide équivalent [1-3] est une approche simplifiée où le matériau poreux est représenté par un milieu équivalent homogène avec des propriétés acoustiques déterminées uniquement par le fluide remplissant les pores. Dans cette approche, le squelette solide est considéré comme rigide et immobile, tandis que le fluide dans les pores est le seul responsable de la propagation des ondes acoustiques. Cette théorie est souvent utilisée lorsque les effets spécifiques de la phase solide peuvent être négligés ou lorsque des approximations simplificatrices sont nécessaires pour des raisons pratiques.

Les deux théories ont leurs avantages et leurs limites. La théorie de Biot permet une modélisation plus précise et réaliste du comportement des matériaux poreux, en prenant en compte les interactions entre les phases solide et fluide. Cependant, elle peut nécessiter des calculs plus complexes et des paramètres plus nombreux à déterminer expérimentalement. En revanche, la théorie du fluide équivalent offre une approche plus simplifiée et pratique, permettant des analyses plus rapides, mais au prix d'une modélisation moins détaillée.

6.1 Théorie de Biot :

Dans cette partie, nous abordons le modèle de Biot [5,6]. Maurice A. Biot a proposé ce modèle pour décrire la propagation des ondes acoustiques dans un matériau poreux. La théorie de Biot est l'un des modèles les plus réalistes pour décrire la propagation des ondes sonores dans un milieu poreux, car elle prend en compte les différents couplages entre le fluide et la structure solide. Cependant, cette théorie a été établie pour des milieux homogènes [1,5-7].

Dans un matériau poreux, les ondes se propagent à la fois dans la phase solide et dans la phase fluide (les vides). De plus, ce modèle tient compte des différents couplages entre le fluide et la structure solide [1,5-7]. On peut définir les déplacements de la phase solide \vec{u} et de la phase fluide \vec{U} séparément. Ces déplacements obéissent aux équations suivantes [5]:

$$\rho_{11} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} + \rho_{12} \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2} = P \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + Q \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{U}) - N \vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{u}), \quad (1.14)$$

$$\rho_{22} \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2} + \rho_{12} \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = R \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{U}) + Q \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}). \quad (1.15)$$

Les termes ρ_{ij} ont la dimension d'une densité. Le terme ρ_{12} traduit le couplage inertiel entre le fluide et la structure. Le paramètre Q traduit le couplage élastique entre solide et fluide.

P, Q, R sont les coefficients d'élasticité de Biot. Lorsqu'un matériau est le siège d'une perturbation mécanique, il répond aux contraintes qu'il subit en se déformant. Les composantes du tenseur des contraintes σ_{ij}^s de la phase solide et σ_{ij}^f de la phase fluide s'écrivent :

$$\sigma_{ij}^s = \left((P - 2N)\vec{\nabla} \cdot \vec{u} + Q\vec{\nabla} \cdot \vec{U} \right) \delta_{ij} + N(u_{ij} + u_{ji}) \quad (1.16)$$

$$\sigma_{ij}^f = (R\vec{\nabla} \cdot \vec{U} + Q\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \delta_{ij} \quad (1.17)$$

N est le module de cisaillement de la structure solide.

Les coefficients d'élasticité de Biot sont fonction des modules d'incompressibilité des phases fluide et solide, et de la porosité ϕ du milieu poreux :

$$P = \frac{(1-\phi)\left(1-\frac{K_b}{K_s}\right)K_s + \phi\frac{K_s}{K_f}K_b}{\left(1-\frac{K_b}{K_s}\right) - \phi\left(1-\frac{K_s}{K_f}\right)} \quad (1.18)$$

$$Q = \frac{\left(1-\phi-\frac{K_b}{K_s}\right)\phi K_s}{\left(1-\frac{K_b}{K_s}\right) - \phi\left(1-\frac{K_s}{K_f}\right)} \quad (1.19)$$

$$R = \frac{\phi^2 K_s}{\left(1-\frac{K_b}{K_s}\right) - \phi\left(1-\frac{K_s}{K_f}\right)} \quad (1.20)$$

K_f, K_s et K_b sont respectivement les modules d'incompressibilité de la phase fluide dans le matériau poreux, de la phase solide et de la structure dans le vide. Ils dépendent des paramètres mécaniques classiques : les modules d'Young et les coefficients de Poisson du solide E_s, ν_s et du squelette E_b, ν_b sont donnés par :

$$K_s = \frac{E_s}{3(1-2\nu_s)}, \quad K_b = \frac{E_b}{3(1-2\nu_b)} \text{ et } N = \frac{E_b}{2(1+2\nu_b)}. \quad (1.21)$$

6.2 Théorie du fluide équivalent:

Dans de nombreux cas, l'analyse des ondes acoustiques se fait dans des milieux poreux où la structure du matériau reste rigide et immobile [1-4]. Dans de tels milieux, il est nécessaire de prendre en compte les pertes d'énergie qui dépendent généralement de la fréquence des ondes acoustiques. Aux surfaces de contact entre le fluide et le solide dans le matériau poreux, la vitesse acoustique et la température acoustique s'annulent, ce qui crée d'importants gradients de vitesse et de température dans le fluide. Ces gradients engendrent une dissipation visqueuse et thermique qui affecte la propagation des ondes acoustiques.

Pour décrire la propagation des ondes acoustiques dans un fluide libre, on utilise les équations fondamentales suivantes [1-4]:

$$\rho_f \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\vec{\nabla} p \quad (1.22)$$

$$\frac{1}{K_a} \frac{\partial p}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{v} \quad (1.23)$$

Dans ces équations, ρ_f représente la masse volumique du fluide, \vec{v} est la vitesse acoustique du fluide en un point donné et p est la pression acoustique. Le paramètre K_a correspond au module d'incompressibilité adiabatique du fluide.

À partir de ces équations, on peut dériver l'équation de propagation des ondes acoustiques dans le fluide libre :

$$\Delta p - \frac{1}{c_f^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (1.24)$$

La célérité de l'onde, c_f , est définie par la relation $c_f = \sqrt{k_a/\rho_f}$. En utilisant cette relation, on peut exprimer les fonctions $k(\omega)$ et $Z_c(\omega)$ qui caractérisent la propagation des ondes acoustiques :

$$K(\omega) = \omega \sqrt{\rho(\omega)/k(\omega)}. \quad (1.25)$$

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\rho(\omega)k(\omega)}. \quad (1.26)$$

Les fonctions $\rho(\omega)$ et $k(\omega)$ dépendent de $\alpha(\omega)$ et $\beta(\omega)$, qui sont des fonctions adimensionnelles appelées tortuosité dynamique et compressibilité dynamique [1-3]. Ces fonctions $\alpha(\omega)$ et $\beta(\omega)$ décrivent les caractéristiques géométriques du milieu poreux et les propriétés physiques du fluide. Ainsi, on peut écrire la densité $\rho(\omega)$ et l'incompressibilité $K(\omega)$ du fluide en fonction de $\alpha(\omega)$ et $\beta(\omega)$:

$$\rho(\omega) = \rho_f \alpha(\omega). \quad K^{-1}(\omega) = K_a^{-1} \beta(\omega), \quad (1.27)$$

Dans le fluide limité par la structure poreuse, le mouvement du fluide obéit aux deux équations suivantes :

$$\rho(\omega) \frac{\partial}{\partial t} \langle \vec{v} \rangle = -\vec{\nabla} \langle p \rangle \quad (1.28)$$

$$\frac{1}{K(\omega)} \frac{\partial}{\partial t} \langle p \rangle = -\vec{\nabla} \cdot \langle \vec{v} \rangle, \quad (1.29)$$

Dans ces équations, $\langle v^{\vec{r}} \rangle$ et $\langle p \rangle$ représentent les moyennes macroscopiques des vitesses acoustiques microscopiques et des pressions acoustiques. Ces moyennes intègrent les variations locales des propriétés acoustiques à l'échelle microscopique.

Afin de décrire de manière précise le comportement des ondes acoustiques dans les matériaux poreux à structure rigide, il est nécessaire de déterminer les fonctions $\rho(\omega)$ et $K(\omega)$ qui dépendent de $\alpha(\omega)$ et $\beta(\omega)$. Ces fonctions décrivent les variations de densité et d'incompressibilité du fluide en fonction de la fréquence. En comprenant ces variations, on peut mieux caractériser les propriétés acoustiques du milieu poreux et prédire le comportement des ondes acoustiques.

6.3. Susceptibilités dynamiques $\alpha(\omega)$ et thermique $\beta(\omega)$:

La propagation des ondes acoustiques dans un milieu poreux est influencée par la compressibilité et l'inertie du milieu. Lorsqu'une onde acoustique rencontre un matériau poreux à structure rigide, les mouvements acoustiques du fluide environnant sont transmis au fluide qui sature les pores du milieu. Le gaz présent dans les pores subit des cycles de compression et d'expansion, ce qui entraîne des variations de sa température. En revanche, la structure solide du matériau, en raison de sa capacité thermique élevée, maintient une température constante tout au long de ces cycles.

Pour déterminer les régimes asymptotiques à haute et basse fréquence [1], il est nécessaire de comparer la taille caractéristique des pores "r" à l'épaisseur de la couche limite visqueuse δ . Si $(\delta / r \ll 1)$, nous sommes dans le régime haute fréquence. Dans ce cas, les effets visqueux se produisent uniquement dans une fine couche de fluide près des parois. Dans le reste du volume du fluide, le comportement est parfaitement fluide, sans effets visqueux significatifs.

De la même manière que pour les effets visqueux, le comportement du matériau poreux concernant les effets thermiques dépend du domaine fréquentiel considéré. On peut définir une épaisseur de couche limite thermique, notée δ' , qui est donnée par l'expression [1]:

$$\delta'(\omega) = \sqrt{2\eta/\omega\rho_f P_r} = \frac{\delta(\omega)}{\sqrt{P_r}}. \quad (1.30)$$

Où P_r est le paramètre de Prandtl.

En ce qui concerne les modèles de susceptibilités dynamique $\alpha(\omega)$ et thermique $\beta(\omega)$, ils permettent de décrire le comportement du milieu poreux vis-à-vis des variations de fréquence. Ces modèles dépendent des propriétés du fluide et de la géométrie du milieu poreux. La

susceptibilité dynamique $\alpha(\omega)$ et la compressibilité dynamique $\beta(\omega)$ sont des fonctions adimensionnelles qui caractérisent les variations de densité et d'incompressibilité du fluide en fonction de la fréquence.

6.4. Modélisation des effets inertiel et visqueux

a) Modèle de Johnson:

Le modèle proposé par Johnson et al [2] fournit une description simple de la fonction $\alpha(\omega)$, qui représente la tortuosité dynamique, lorsque la structure poreuse est saturée par un fluide visqueux. Ce modèle peut être appliqué aux structures poreuses saturées d'air. Deux paramètres du modèle, α_∞ (tortuosité à la limite de fréquence infinie) et Λ (longueur caractéristique visqueuse), interviennent dans la limite de haute fréquence :

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \alpha(\omega) = \alpha_\infty \left(1 + \frac{2}{\Lambda} \left(\frac{\eta}{j\omega\rho_f} \right)^{1/2} \right) \quad (1.31)$$

où j est l'unité imaginaire ($j^2 = -1$),

Aux basses fréquences, un troisième paramètre entre en jeu; la perméabilité visqueuse $k_0 = \eta/\sigma$, où σ est la résistivité spécifique au passage du fluide. Dans cette gamme de fréquences, la loi de Darcy [1] donne l'expression de la tortuosité dynamique :

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \alpha(\omega) = \frac{\eta\Phi}{\rho_f k_0 j\omega} \quad (1.32)$$

Johnson et al. [2] supposent que ces trois paramètres ($\alpha_\infty, \Lambda, k_0$) fournissent des informations sur la microgéométrie du matériau poreux. L'expression générale proposée pour $\alpha(\omega)$ est donnée analytiquement par :

$$\alpha(\omega) = \alpha_\infty \left(1 + \frac{1}{jx} \sqrt{1 + \frac{M}{2} jx} \right) \quad (1.33)$$

où x est une fréquence adimensionnelle définie comme $x = \frac{\omega\alpha_\infty\rho_0}{\sigma\Phi}$, Le facteur de forme des pores M est également un paramètre adimensionnel : $M = \frac{8k_0\alpha_\infty}{\Phi\Lambda^2}$.

b) Modèle de Pride et al:

Le modèle de Pride et al. [1] propose une correction de l'expression asymptotique à haute fréquence de Johnson et al en ajoutant un terme supplémentaire dans le terme $1/j\omega$:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \alpha(\omega) \approx \alpha_{\infty} \left(1 + \frac{2}{\Lambda} \sqrt{\frac{\eta}{j\omega\rho_f}} + \frac{\sigma\phi(1-p)}{j\omega\rho_f\alpha_{\infty}} \right) \quad (1.34)$$

Cette équation introduit un nouveau paramètre géométrique sans dimension "p". Il est lié à la grandeur notée α_0 qui apporte une correction de type inertielle aux basses fréquences :

$$p = \frac{M}{4(\frac{\alpha_0}{\alpha_{\infty}} - 1)} \quad (1.35)$$

La relation qui définit α_0 est :

$$\alpha_0 = \frac{\langle v_m^2 \rangle}{\langle v_m \rangle^2} \quad (1.36)$$

où $\langle v_m \rangle$ est le champ des vitesses microscopiques.

La tortuosité dynamique à basse fréquence est donnée par :

$$\alpha(\omega) = \alpha_0 + \frac{\eta\phi}{p_f k_0 j\omega} \quad (1.37)$$

L'expression analytique valable pour toutes les fréquences est :

$$\alpha(\omega) = \alpha_{\infty} \left(1 + \frac{1}{jx} \left(1 - p + p \sqrt{1 + \frac{M}{2p^2} jx} \right) \right) \quad (1.38)$$

Lorsque $p = 1$, on retrouve l'expression de Johnson.

Ces modèles fournissent une description des effets inertiels et visqueux dans les milieux poreux. Ils permettent de caractériser la tortuosité dynamique en fonction de la fréquence et des paramètres géométriques et fluidiques du matériau poreux. Les expressions proposées sont utiles pour comprendre le comportement des ondes acoustiques dans les milieux poreux et pour prédire les propriétés acoustiques de ces matériaux dans différentes gammes de fréquences. Ils sont largement utilisés dans la modélisation et la simulation des phénomènes acoustiques dans les matériaux poreux.

6.5. Modélisation des phénomènes thermiques (compressibilité thermique $\beta(\omega)$) :

a) Modèle de Champoux et Allard [1]:

Un modèle similaire à celui de la tortuosité dynamique $\alpha(\omega)$ a été développé pour décrire la dépendance en fréquence des échanges thermiques entre le fluide et la structure, lorsque la

capacité calorifique de la partie solide est élevée. Champoux et Allard ont proposé un modèle à deux paramètres, Λ' et k'_0 , qui jouent un rôle similaire à Λ et k_0 pour les effets visqueux. À haute fréquence, Allard et Champoux [1] ont montré le comportement suivant de $\beta(\omega)$:

$$\beta(\omega) \approx 1 + \frac{2(\gamma-1)}{\Lambda'} \left(\frac{\eta}{P_r \rho_f} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{j\omega} \right)^{1/2}, \quad \omega \rightarrow \infty \quad (1.39)$$

À très haute fréquence, $\beta(\omega)$ tend vers 1 tandis que $\alpha(\omega)$ tend vers la tortuosité α_∞

b) Modèle de Lafarge [4]:

Dans la limite des basses fréquences, Lafarge a proposé le comportement suivant :

$$\beta(\omega) \approx \gamma - \frac{(\gamma-1)P_r \rho_f k'_0}{\eta \Phi j\omega}, \quad \omega \rightarrow 0 \quad (1.40)$$

Ici, k'_0 est un paramètre similaire à k_0 mais adapté au problème thermique.

L'expression générale de la compressibilité fournie par Champoux et Allard, corrigée par Lafarge pour relier les basses et hautes fréquences, est donnée par la relation suivante :

$$\beta(\omega) = \gamma - \frac{(\gamma-1)}{1 + \frac{1}{jx'} \sqrt{1 + \frac{M'}{2} jx'}} \quad (1.41)$$

où x' est une fréquence adimensionnelle égale à ω/ω'_0 , avec $\omega'_0 = \frac{\eta \Phi}{k'_0 P_r \rho_f}$, et M' est un facteur de forme sans dimension donné par $M' = \frac{8k'_0}{\Phi \Lambda'^2}$.

Comme Pride l'a fait pour les effets visqueux, Lafarge propose une extension du modèle de Champoux et Allard en introduisant un nouveau paramètre p' . Ainsi, à haute fréquence, la nouvelle expression est donnée par :

$$\beta(\omega) \approx 1 + (\gamma - 1) \left[\frac{2}{\Lambda'} \sqrt{\frac{\eta}{P_r \rho_f}} \sqrt{\frac{1}{j\omega}} + \left(\frac{\eta}{P_r \rho_f j\omega} \right) \left(\frac{(1-p')\Phi}{k'_0} \right) \right] \quad \omega \rightarrow \infty \quad (1.42)$$

Ici, p' est un paramètre géométrique sans dimension lié à α'_0 , l'équivalent thermique du paramètre inertiel visqueux α_0 :

$$p' = \frac{M'}{4(\alpha'_0 - 1)}. \quad (1.43)$$

L'expression générale de la compressibilité thermique est donc donnée par :

$$\beta(\omega) = \gamma - \frac{\gamma-1}{1 + \frac{1}{jx'} \left(1 - p' + p' \sqrt{1 + \frac{M'}{2p'^2} jx'} \right)} \quad (1.44)$$

En prenant $p' = 1$, on retrouve l'expression de la compressibilité dynamique donnée par Champoux et Allard.

Ainsi, les modèles de Champoux et Allard [1] ainsi que celui de Lafarge [4] permettent de modéliser la dépendance en fréquence de la compressibilité thermique $\beta(\omega)$ dans les milieux poreux. Ces modèles prennent en compte la capacité calorifique de la partie solide et introduisent des paramètres tels que Λ' , k_0' , p' , et M' pour décrire les échanges thermiques entre le fluide et la structure dans différents régimes de fréquence. Ils fournissent des expressions analytiques qui permettent de mieux comprendre et prédire le comportement thermique des milieux poreux dans des conditions variées.

Il convient de noter que les modèles présentés ici sont des exemples parmi d'autres dans la littérature scientifique. Selon le contexte et les propriétés spécifiques du milieu poreux étudié, d'autres modèles et approches peuvent également être utilisés pour caractériser les phénomènes thermiques.

6.6. Correction a basse fréquence des ultrasons :

Les limites asymptotiques haute fréquence de $\alpha(\omega)$ et $\beta(\omega)$ sont représentées jusqu'aux termes δ , comme suit [1-3]:

$$\alpha_{\sim\delta}(\omega) = \alpha_{\infty} \left(1 + \frac{\delta(\omega)}{\Lambda} \left(\frac{2}{j} \right)^{\frac{1}{2}} + \dots \right) \quad (1.45)$$

$$\beta_{\sim\delta}(\omega) = 1 + (\gamma - 1) \left(\frac{\delta'(\omega)}{\Lambda'} \left(\frac{2}{j} \right)^{1/2} + \dots \right) \quad (1.46)$$

Les paramètres physiques pertinents sont la limite haute fréquence de la tortuosité du milieu α_{∞} , les longueurs caractéristiques visqueuses Λ et thermiques Λ' introduites par Johnson et Allard[1-3].

À basse fréquence d'ultrasons ($\omega \rightarrow^< \infty$), les épaisseurs de peau visqueuse et thermique ($\delta(\omega)$ et $\delta'(\omega)$) croient légèrement mais restent toujours petites par rapport au rayon de courbure r caractéristique du pore ($\delta(\omega) \ll r$). Pour prendre en compte cette croissance, M. Sadouki [15] propose une représentation jusqu'aux termes δ^2 de $\alpha(\omega)$ et $\beta(\omega)$:

$$\alpha_{\sim\delta^2}(\omega) = \alpha_{\infty} \left(1 + \frac{\delta(\omega)}{\Lambda} \left(\frac{2}{j} \right)^{\frac{1}{2}} + \xi \left(\frac{\delta(\omega)}{\Lambda} \right)^2 \left(\frac{2}{j} \right) + \dots \right) \quad (1.47)$$

$$\beta_{\sim\delta^2}(\omega) = 1 + (\gamma - 1) \left(\frac{\delta'(\omega)}{\Lambda'} \left(\frac{2}{j} \right)^{1/2} + (\xi' - 1) \left(\frac{\delta'(\omega)}{\Lambda'} \right)^2 \left(\frac{2}{j} \right) + \dots \right), \quad (1.48)$$

Les paramètres sans dimension ξ et ξ' sont des facteurs de forme liés à la correction visqueuse et thermique de l'épaisseur de peau de la couche d'air près de la surface du tube.

Dans la représentation jusqu'aux termes δ^2 , l'épaisseur totale de peau visqueuse $\delta(\omega)$ peut être écrite comme suit :

$$\delta(\omega) = \delta^{(1)} + \delta^{(2)} = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho_0\omega}} (1 + \sqrt{\xi}) \quad (1.49)$$

De même, l'épaisseur totale de peau thermique $\delta'(\omega)$ s'écrit :

$$\delta'(\omega) = \delta'^{(1)} + \delta'^{(2)} = \sqrt{\frac{2\eta}{P_r\rho_0\omega}} (1 + \sqrt{\xi' - 1}) \quad (1.50)$$

Dans le régime ultrasonore basse fréquence, la longueur caractéristique visqueuse est différente de celle du régime ultrasonore haute fréquence. La longueur caractéristique visqueuse λ donnée par la représentation jusqu'aux termes δ est plus petite que Λ .

Pour obtenir la valeur exacte de Λ via les ondes ultrasonores basse fréquence, il faut utiliser la représentation jusqu'aux termes δ^2 , qui tient compte de la profondeur de peau supplémentaire dans le régime fréquentiel considéré. Les résultats expérimentaux obtenus sont cohérents avec cette approche.

Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons exploré en détail la description générale des milieux poreux, en mettant l'accent sur les hypothèses, les paramètres et les modèles utilisés pour caractériser ces environnements complexes. Nous avons identifié les principales propriétés physiques et mécaniques de ces matériaux, telles que la porosité, la tortuosité, la perméabilité visqueuse et thermique, la densité et la compressibilité...etc.

Les discussions sur les hypothèses et approximations ont mis en évidence les simplifications souvent nécessaires pour analyser les milieux poreux, tout en soulignant les limites et les défis associés à ces modèles et hypothèses. Ces considérations critiques nous permettront d'interpréter de manière adéquate les résultats obtenus dans les chapitres suivants.

Nous avons souligné l'importance du modèle de Biot pour décrire les milieux poreux généraux, en prenant en compte les mouvements simultanés des phases solide et fluide. Nous avons également examiné les modèles semi-phénoménologiques de Johnson et Allard, ainsi que de Pride et Lafrage, qui sont couramment utilisés pour les structures rigides dans le cadre de la théorie des fluides équivalents.

En résumé, ce premier chapitre a jeté les bases nécessaires pour approfondir notre compréhension des milieux poreux et de leur comportement acoustique. Il a établi un cadre solide en fournissant une vue d'ensemble des structures, des propriétés physiques et mécaniques, ainsi que des modèles théoriques utilisés.

Chapitre 2

Étude analytique des coefficients de réflexion et de transmission

1. Introduction :

Le deuxième chapitre de ce travail est dédié à l'étude analytique des coefficients de réflexion et de transmission dans les milieux poreux monocouche et bicouche, en utilisant la théorie des fluides équivalents. Nous nous concentrons sur l'établissement des expressions analytiques de ces coefficients dans le domaine fréquentiel. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre le comportement acoustique de ces structures complexes.

Nous débutons en décrivant les équations de propagation acoustique dans les milieux poreux monocouche et bicouche, en considérant les hypothèses et les modèles associés à la théorie des fluides équivalents. Ces équations nous permettent de décrire les interactions entre les ondes acoustiques et les milieux poreux, en prenant en compte les propriétés physiques et les paramètres caractéristiques de ces structures.

Ensuite, nous procédons à l'établissement des expressions analytiques des coefficients de réflexion et de transmission pour les milieux poreux monocouche. À partir des conditions aux limites appropriées, nous dérivons ces expressions en fonction des paramètres physiques qui décrivent ces milieux.

Nous poursuivons notre étude en nous intéressant aux milieux poreux bicouche. Nous décrivons les conditions aux limites spécifiques à ces structures et établissons les expressions analytiques des coefficients de réflexion et de transmission pour ces milieux. Ces expressions tiennent compte des propriétés des deux couches constituant la structure bicouche, nous permettant ainsi d'analyser l'influence de cette configuration sur la propagation acoustique.

En résumé, ce deuxième chapitre vise à établir les expressions analytiques des coefficients de réflexion et de transmission dans les milieux poreux monocouche et bicouche, en utilisant la théorie des fluides équivalents. Ces résultats constitueront une base importante pour l'analyse ultérieure de la propagation acoustique à travers ces structures complexes.

1. Monocouche en incidence normale [9]:

La modélisation de la propagation acoustique dans les milieux poreux rigides est importante pour comprendre le comportement des ondes sonores lorsqu'elles se propagent à travers des matériaux poreux. Dans le cas spécifique d'une monocouche poreuse en incidence normale, nous pouvons considérer la configuration suivante, illustrée dans la figure (2.1).

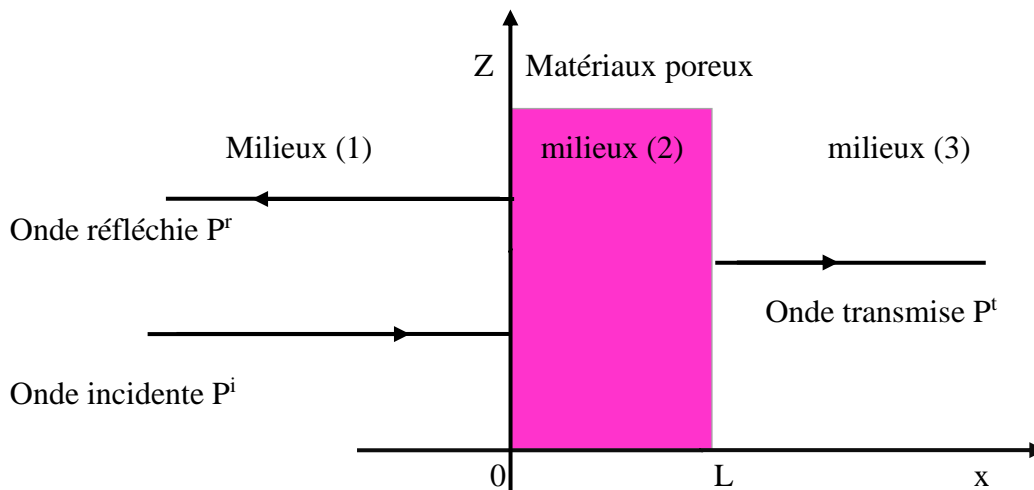


Figure 2.1- Géométrie du problème en incidence normale.

La monocouche poreuse est représentée par la partie (2) de la figure. Elle est caractérisée par sa finitude, sa rigidité et son homogénéité. Sa taille ou épaisseur est notée L , avec $0 \leq x \leq L$, où x est la coordonnée spatiale le long de la monocouche.

Au moment $t = 0$, une onde acoustique sonore est générée à l'interface $x = 0$ et se propage à travers la monocouche. Cette onde sonore est également appelée onde incidente, car elle est initialement générée à l'interface d'incidence.

Pour analyser le comportement de cette onde incidente, il est courant d'utiliser des modèles mathématiques tels que l'équation de propagation acoustique ou l'équation de Helmholtz. Ces modèles décrivent l'évolution de la pression acoustique dans le milieu poreux en fonction du temps et de l'emplacement spatial.

L'étude de la propagation de l'onde incidente P^i à travers la monocouche poreuse révèle la présence d'une onde réfléchie P^r qui se propage dans la direction inverse de l'axe (ox), ainsi qu'une onde transmise P^t qui se propage à travers le matériau poreux.

L'expression mathématique de l'onde incidente normale, P^i , peut être décrite par l'équation suivante :

$$P^i(x, \omega) = e^{-j(kx - \omega t)} \quad (2.1)$$

Dans cette équation, k représente le nombre d'onde, défini comme :

$$k = \frac{\omega}{c_f} = \omega \sqrt{\frac{\rho_f}{K_a}} \quad (2.2)$$

Ici, c_f est la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans le fluide libre (milieux 1 et 3), ρ_f est la masse volumique du fluide, et K_a est le module d'incompressibilité adiabatique du fluide.

En utilisant l'expression (2.1), nous pouvons établir l'expression de la pression acoustique pour chaque milieu.

* **Dans le milieu (1)** ($x < 0$), la pression acoustique $P^1(x, t)$ peut être obtenue en superposant l'onde incidente et l'onde réfléchie :

$$P^1(x, t) = e^{-j(kx - \omega t)} + R e^{-j(-kx - \omega t)}, \quad (2.3)$$

Dans cette équation, R représente le coefficient de réflexion du matériau poreux.

En appliquant les équations d'Euler (Eq. (1.27) et (1.28)), le champ de vitesse $v^{(1)}(x, \omega)$ dans le milieu (1) peut être exprimé comme suit :

$$v^{(1)}(x, \omega) = \frac{1}{Z_f} (e^{-j(kx - \omega t)} - R e^{-j(-kx - \omega t)}), \quad (2.4)$$

où Z_f représente l'impédance caractéristique définie par

$$Z_f = \sqrt{\frac{\rho_f}{K_a}} \quad (2.5).$$

* **Dans le milieu (2)** ($0 \leq x \leq L$), la pression acoustique $p^{(2)}(x, \omega)$ et le champ de vitesse $v^{(2)}(x, \omega)$ sont donnés par :

$$p^{(2)}(x, \omega) = A e^{-j(k_m x - \omega t)} + B e^{-j(-k_m x - \omega t)} \quad (2.6)$$

$$v^{(2)}(x, \omega) = \frac{1}{Z_m} (A e^{-j(k_m x - \omega t)} - B e^{-j(-k_m x - \omega t)}) \quad (2.7)$$

Dans ces équations, A et B sont des constantes, et Z_m et k_m sont des quantités complexes représentant respectivement l'impédance caractéristique et le nombre d'onde de l'onde acoustique dans le milieu poreux. Ces quantités sont définies comme suit :

$$k_m = \omega \sqrt{\frac{\rho_f \alpha(\omega) \beta(\omega)}{K_a}}, \quad Z_m = \sqrt{\frac{\rho_f K_a \alpha(\omega)}{\beta(\omega)}} \quad (2.8)$$

où $\alpha(\omega)$ et $\beta(\omega)$ représentent respectivement la tortuosité dynamique et la compressibilité dynamique du matériau poreux.

* **Dans le milieu 3** ($x > L$), la pression acoustique $p^{(3)}(x, \omega)$ et le champ de vitesse $v^{(3)}(x, \omega)$ de l'onde transmise P^t sont donnés par :

$$p^{(3)}(x, \omega) = T e^{-j(k(x-L) - \omega t)} \quad (2.9)$$

$$v^{(3)}(x, \omega) = \frac{1}{Z_f} T e^{-j(k(x-L) - \omega t)} \quad (2.10)$$

Dans ces équations, T représente le coefficient de transmission.

Aux interfaces $x = 0$ et $x = L$, nous avons la continuité des pressions :

$$P^{(1)}(0^-) = P^{(2)}(0^+) \quad (2.11)$$

$$P^{(2)}(L^-) = P^{(3)}(L^+) \quad (2.12)$$

et la conservation des débits :

$$V^{(1)}(0^-) = \phi V^{(2)}(0^+) \quad (2.13)$$

$$\phi V^{(2)}(L^-) = V^{(3)}(L^+) \quad (2.14)$$

En substituant les expressions des champs de vitesses et des pressions des différents milieux dans les relations (2.11) - (2.14), nous obtenons un système de quatre équations à quatre inconnues : A , B , R et T . La résolution de ce système permet de déterminer les coefficients de réflexion et de transmission, ainsi que les coefficients A et B :

$$\begin{cases} 1+R=A+B \\ T=Ae^{-jk_m L}+Be^{jk_m L} \\ 1-R=\phi \frac{Z_f}{Z_m}(A-B) \\ T=\phi \frac{Z_f}{Z_m}(Ae^{-jk_m L}-Be^{jk_m L}) \end{cases} \quad (2.15)$$

La solution de ce système permet d'obtenir les coefficients recherchés, qui caractérisent le comportement acoustique de la propagation dans le matériau poreux monocouche en incidence normale.

$$A = \frac{(1+D) \exp(j\omega fL)}{2D \cosh(j\omega fL) + (1+D^2) \sinh(j\omega fL)} \quad (2.16)$$

$$B = \frac{(D-1) \exp(-j\omega fL)}{2D \cosh(j\omega fL) + (1+D^2) \sinh(j\omega fL)} \quad (2.17)$$

$$T = \frac{2D}{2D \cosh(j\omega fL) + (1+D^2) \sinh(j\omega fL)} \quad (2.18)$$

$$R = \frac{(1-D^2) \sinh(j\omega fL)}{2D \cosh(j\omega fL) + (1+D^2) \sinh(j\omega fL)} \quad (2.19)$$

Avec :

$$D = \phi \frac{Z_f}{Z_m} = \phi \sqrt{\frac{\beta(\omega)}{\alpha(\omega)}}, \quad f = \sqrt{\frac{\rho_f}{K_a} \alpha(\omega) \beta(\omega)} \quad (2.20)$$

2. Bicouche en incidence normale[9] :

Cette section traite du cas d'un matériau poreux bicouche à structure rigide et homogène. Le matériau se compose de deux parties : la tranche B₁ d'épaisseur L₁ et la tranche B₂ d'épaisseur L₂. La figure (2.2) illustre la géométrie du problème d'un milieu bicouche en incidence normale.

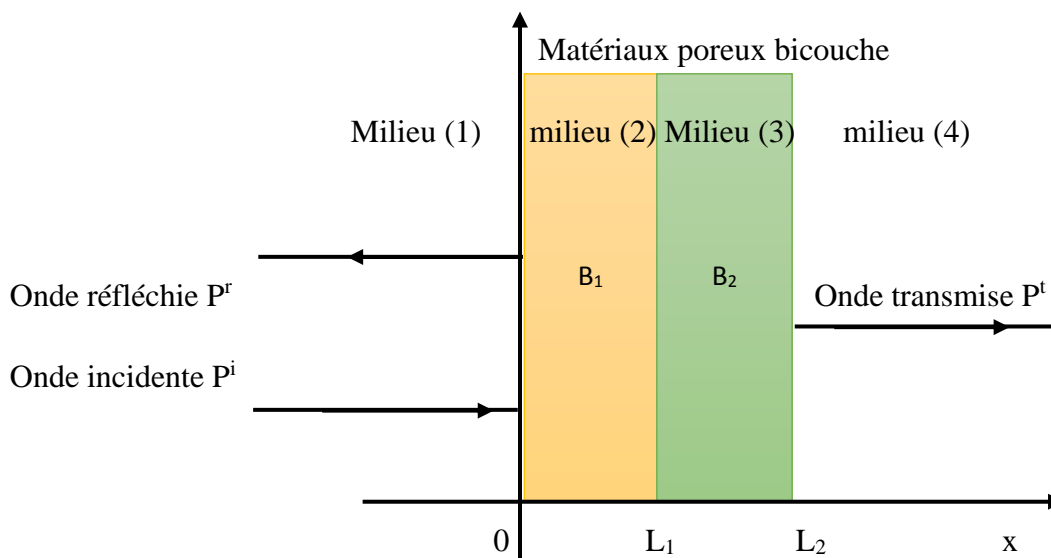


Figure 2.2- Géométrie du problème d'un milieu bicouche en incidence normale.

Lorsqu'une onde incidente Pⁱ se propage vers le matériau poreux bicouche le long de l'axe (ox), dans le milieu (1), on observe une superposition de l'onde incidente Pⁱ se propageant dans la

direction de l'axe (ox) et de l'onde réfléchie P^r se propageant dans le sens inverse de l'axe (ox). Dans le milieu (4), une onde transmise est présente. Les équations des champs de pression et de vitesse sont formulées pour chaque milieu :

*** Dans le milieu (1) ($x < 0$):**

Les expressions de la pression $P^{(1)}(x, \omega)$ et de la vitesse $v^{(1)}(x, \omega)$ sont données par :

$$P^{(1)}(x, \omega) = e^{-jk_f x} + R e^{jk_f x} \quad (2.21)$$

$$v^{(1)}(x, \omega) = \frac{1}{Z_f} (e^{-jk_f x} - R e^{jk_f x}) \quad (2.22)$$

où R est le coefficient de réflexion et k_f est le nombre d'onde de l'onde acoustique. Z_f représente l'impédance caractéristique de l'air.

*** Dans les milieux (2) ($0 < x < L_1$) et milieu (3) ($L_1 < x < L_2$):**

Dans ce cas, les expressions de pression et de vitesse correspondant aux milieux (2) et (3) sont les suivantes :

$$P^{(i+1)}(x, \omega) = A_i e^{-jk_i x} + B_i e^{jk_i x} \quad (2.23)$$

$$v^{(i+1)}(x, \omega) = \frac{1}{Z_i} (A_i e^{-jk_i x} - B_i e^{jk_i x}) \quad (2.24)$$

où A_i et B_i sont deux constantes. Z_i et k_i sont des quantités complexes représentant respectivement l'impédance caractéristique et le nombre d'onde de l'onde acoustique dans le milieu poreux i ($i = 1, 2$). Les expressions de Z_i et k_i sont données par :

$$k_i = \omega \sqrt{\frac{\rho_f \alpha_i(\omega) \beta_i(\omega)}{K_a}}, \quad Z_i = \sqrt{\frac{\rho_f K_a \alpha_i(\omega)}{\beta_i(\omega)}} \quad (2.25)$$

*** Dans le milieu (4) ($x > L_2$):**

Les expressions de la pression $P^{(4)}(x, \omega)$ et de la vitesse $v^{(4)}(x, \omega)$ sont les suivantes :

$$P^{(4)}(x, \omega) = T e^{-jk_f(x-L)} \quad (2.26)$$

$$v^{(4)}(x, \omega) = \frac{1}{Z_f} T e^{-jk_f(x-L)} \quad (2.27)$$

où T est le coefficient de transmission du matériau poreux.

Aux points ($x = 0$), ($x = L_1$) et ($x = L$), la continuité des pressions est assurée par les équations suivantes :

$$P^{(1)}(0^-) = P^{(2)}(0^+) \quad (2.28)$$

$$P^{(2)}(L_1^-) = P^{(3)}(L_1^+) \quad (2.29)$$

$$P^{(3)}(L^-) = P^{(4)}(L^+) \quad (2.30)$$

Quant à la continuité des vitesses :

$$v^{(1)}(0^-) = \phi_1 v^{(2)}(0^+) \quad (2.31)$$

$$\phi_1 v^{(2)}(L_1^-) = \phi_2 v^{(3)}(L_1^+) \quad (2.32)$$

$$\phi_2 v^{(3)}(L^-) = v^{(4)}(L^+) \quad (2.33)$$

En substituant les expressions des champs de vitesses et de pressions des différents milieux dans les relations (2.28) - (2.33), on obtient un système de six équations à six inconnues : A_1 , B_1 , A_2 , B_2 , R et T .

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 + R = A_1 + B_1 \\ A_1 e^{-jk_1 L_1} + B_1 e^{jk_1 L_1} = A_2 e^{-jk_2 L_2} + B_2 e^{jk_2 L_2} \\ T = A_2 e^{-jk_2 L_2} + B_2 e^{jk_2 L_2} \\ 1 - R = \phi_1 \frac{Z_f}{Z_1} (A_1 - B_1) \\ \phi_1 \frac{1}{Z_1} (A_1 e^{-jk_1 L_1} - B_1 e^{jk_1 L_1}) = \phi_2 \frac{1}{Z_2} (A_2 e^{-jk_2 L_2} - B_2 e^{jk_2 L_2}) \\ T = \phi_2 \frac{Z_f}{Z_2} (A_2 e^{-jk_2 L_2} - B_2 e^{jk_2 L_2}) \end{array} \right. \quad (2.34)$$

La résolution de ce système permet, dans le domaine fréquentiel, de déterminer les expressions des coefficients de transmission et de réflexion [3]:

$$T = \frac{8}{\Delta_1 + \Delta_2}, \quad R = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\Delta_1 + \Delta_2} \quad (2.35)$$

avec :

$$\Delta_1 = 2 \left(\frac{1}{D_2} + \frac{1}{D_1} \right) [(1 + D_1 D_2) \sinh(j\omega(f_1 L_1 + f_2 L_2)) + (D_1 + D_2) \cosh(j\omega(f_1 L_1 + f_2 L_2))] \quad (2.36)$$

$$\Delta_2 = 2 \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \left[(1 - D_1 D_2) \sinh(j\omega(f_1 L_1 - f_2 L_2)) + (D_1 - D_2) \cosh(j\omega(f_1 L_1 - f_2 L_2)) \right] \quad (2.37)$$

$$\delta_1 = 2 \left(\frac{1}{D_2} + \frac{1}{D_1} \right) \left[(1 - D_1 D_2) \sinh(j\omega(f_1 L_1 + f_2 L_2)) - (D_1 - D_2) \cosh(j\omega(f_1 L_1 + f_2 L_2)) \right] \quad (2.38)$$

$$\delta_2 = 2 \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right) \left[(1 + D_1 D_2) \sinh(j\omega(f_1 L_1 - f_2 L_2)) - (D_1 + D_2) \cosh(j\omega(f_1 L_1 - f_2 L_2)) \right] \quad (2.39)$$

Conclusion :

En conclusion de ce deuxième chapitre, nous avons mené une étude analytique approfondie des coefficients de réflexion et de transmission dans les milieux poreux monocouche et bicouche, en utilisant la théorie des fluides équivalents. Nous avons déterminé des expressions analytiques de ces coefficients dans le domaine fréquentiel.

L'analyse des milieux poreux monocouche nous a permis de mieux comprendre comment les propriétés physiques du matériau affectent l'atténuation et la propagation des ondes acoustiques à travers ces structures. Nous avons également examiné les conditions aux limites appropriées et identifié les paramètres clés qui caractérisent ces milieux, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de leur comportement acoustique.

Concernant les milieux poreux bicouche, nous avons établi des expressions analytiques des coefficients de réflexion et de transmission en tenant compte des propriétés spécifiques des deux couches constituant la structure. Cette approche nous a permis de mieux appréhender l'influence de la configuration bicouche sur la propagation acoustique et l'interaction avec les ondes.

En résumé, ce deuxième chapitre revêt une importance capitale dans notre étude, car il fournit des expressions analytiques précieuses des coefficients de réflexion et de transmission pour les milieux poreux monocouche et bicouche. Ces résultats nous permettront d'approfondir notre compréhension du comportement acoustique de ces structures complexes et de poursuivre notre analyse dans le chapitre suivant.

Le prochain chapitre se concentrera sur l'étude de la sensibilité des paramètres physiques des milieux poreux bicouche, ce qui complétera notre analyse en examinant les variations de ces paramètres et leur impact sur la propagation des ondes acoustiques. Cette étude enrichira notre compréhension des milieux poreux et nous permettra de mieux évaluer leur performance dans différentes applications pratiques.

Chapitre 3 :

Étude de la sensibilité des paramètres physiques dans les milieux poreux bicouche

1. Introduction :

Le troisième chapitre de cette étude est dédié à l'étude de la sensibilité des paramètres physiques dans les milieux poreux bicouche. Après avoir établi les expressions analytiques des coefficients de réflexion et de transmission dans le chapitre précédent, notre attention se porte désormais sur l'exploration de la variation de ces paramètres et de leur impact sur la propagation des ondes acoustiques.

Les milieux poreux bicouche présentent une configuration complexe avec deux couches distinctes, chacune possédant ses propres propriétés physiques. Nous nous concentrons tout particulièrement sur l'influence de la variation de ces propriétés sur le comportement acoustique global de la structure. Dans cette optique, nous examinons plusieurs paramètres clés tels que la porosité, la tortuosité, les longueurs caractéristiques visqueuse et thermique, ainsi que les facteurs de forme visqueux et thermique constituant le milieu bicouche.

L'objectif principal de ce chapitre est de quantifier l'effet de la variation de ces paramètres sur l'amplitude des ondes transmises à travers le milieu bicouche, notamment dans le régime basse fréquence des ultrasons. Pour cela, nous procédons à une variation de +20% de chaque paramètre, tout en maintenant les autres paramètres fixes, et évaluons l'impact de cette variation sur l'amplitude de l'onde transmise. Cette analyse nous permettra de classer ces paramètres selon leur ordre d'influence sur les ondes transmises.

En réalisant cette étude de sensibilité, notre objectif est d'améliorer notre compréhension de la manière dont les propriétés physiques des milieux poreux bicouche influent sur la propagation des ondes acoustiques. Les résultats obtenus seront précieux pour l'optimisation des performances de ces structures dans diverses applications telles que l'insonorisation, l'isolation thermique et l'absorption acoustique.

Ce chapitre approfondira donc notre analyse des milieux poreux bicouche en tenant compte de la variabilité des paramètres physiques. Les conclusions tirées de cette étude fourniront une base solide pour une compréhension et une caractérisation plus précises de ces structures, ouvrant ainsi la voie à des applications plus efficaces et adaptées à leurs performances acoustiques spécifiques.

2. L'expression de coefficient de transmission dans le régime basse fréquence des ultrasons :

La tortuosité dynamique $\alpha(\omega)$ et la compressibilité dynamique $\beta(\omega)$ aux basses fréquences ultrasonores données par Johnson et Allard [1-5] et corrigées par Sadouki [17] sont exprimées par les deux expressions :

$$\alpha_{\sim\delta^2}(\omega) = \alpha_{\infty} \left(1 + \frac{\delta(\omega)}{\Lambda} \left(\frac{2}{j}\right)^{\frac{1}{2}} + \xi \left(\frac{\delta(\omega)}{\Lambda}\right)^2 \left(\frac{2}{j}\right) + \dots \right) \quad (3.1)$$

$$\beta_{\sim\delta^2}(\omega) = 1 + (\gamma - 1) \left(\frac{\delta'(\omega)}{\Lambda'}\right) \left(\frac{2}{j}\right)^{1/2} + (\xi' - 1) \left(\frac{\delta'(\omega)}{\Lambda'}\right)^2 \left(\frac{2}{j}\right) + \dots, \quad (3.2)$$

On substitue les deux expressions de $\alpha(\omega)$ et $\beta(\omega)$ dans la relation du coefficient de transmission (Eq.(2.17)) d'un milieu bicouche établie au chapitre 2.

Le spectre du signal transmis $P^t(x, \omega)$ simulé est obtenu par le produit du coefficient de transmission et le spectre du signal incident $P^i(x, \omega)$:

$$P^t(x, \omega) = T P^i(x, \omega) \quad (3.3)$$

Dans le domaine temporel, le signal transmis $\mathcal{P}^t(x, t)$ est dérivé en prenant la transformée de Fourier inverse \mathcal{F}^{-1} de $P^t(x, \omega)$:

$$P^t(x, t) = \mathcal{F}^{-1} \left(T P^i(x, \omega) \right) \quad (3.4)$$

Les signaux incidents et transmis simulés d'un milieu poreux bicouche sont représentés sur la figure (3.1). Ils sont construits en fréquentiel via l'expression (3.3) et en temporel via l'équation (3.4). Les paramètres caractéristiques de chaque tranche du milieu bicouche sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	L (cm)	ϕ	α_{∞}	Λ (μm)	Λ'/Λ	ξ	ξ/ξ'
Couche (1)	1.0	0.90	1.2	250	3.	10.	4.
Couche (2)	1.5	0.85	1.3	200	2.	12.	5.

Table1. Paramètres physiques décrivant les deux tranches de milieu poreux bicouche

Ces signaux sont construits à la fréquence centrale dont le pic est de 70 kHz.

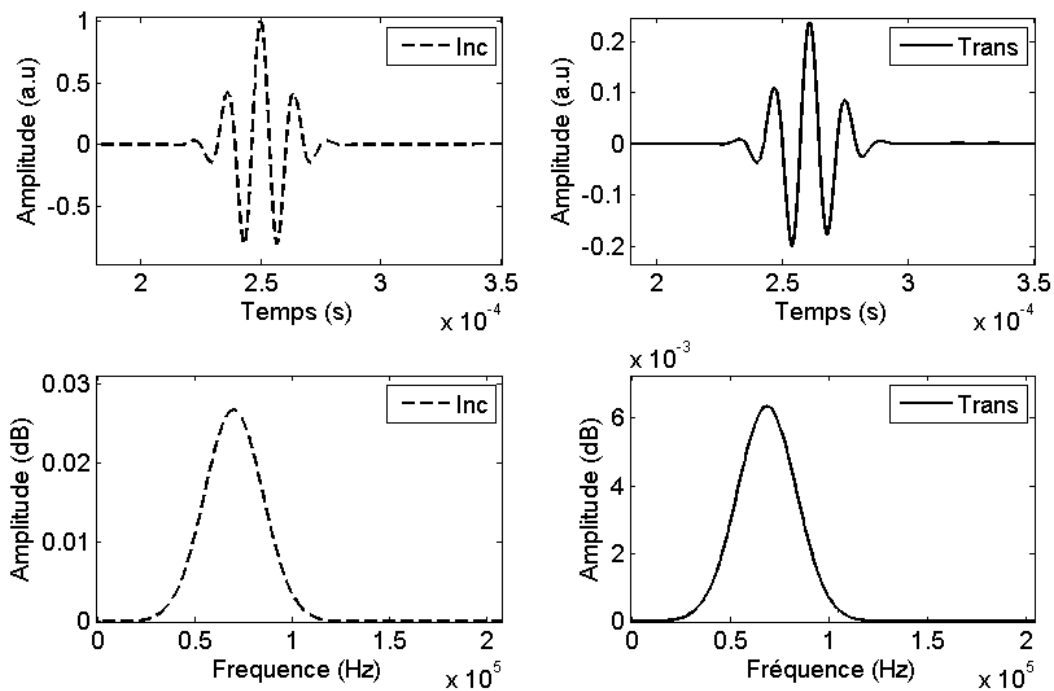


Figure 3.1 - Le signal incident et le signal transmis simulé d'un milieu poreux bicouche construit en fréquentiel via l'expression (3.3) et en temporel via l'équation (3.4).

Pour étudier l'influence des paramètres physiques, notamment la porosité, la tortuosité, la longueur caractéristique visqueuse et thermique et les nouveaux facteurs de forme de la première et la deuxième couches sur les ondes transmises, on observe l'effet de la variation de +20% d'un paramètre, les autres restants fixes, sur le signal transmis donné par l'expression (3.4). La simulation est faite dans le domaine temporel.

2.1 Effet de la porosité des deux couches sur le signal transmis :

La Figure 3.2 présente l'impact de la variation de la porosité $\phi^{(1)}$ de la première couche et de la porosité $\phi^{(2)}$ de la deuxième couche sur l'amplitude du signal transmis, en maintenant les autres paramètres constants. Selon le Tableau 3.1, pour une fréquence de 70 kHz, on observe une influence minimale des porosités $\phi^{(1)}$ et $\phi^{(2)}$ des deux couches sur le signal transmis. Lorsque la porosité $\phi^{(1)}$ de la première couche augmente de 20%, la variation relative du signal transmis varie de -0,32% à +1,03% pour la même variation de la porosité $\phi^{(2)}$ de la deuxième couche. Ces observations suggèrent que la deuxième couche a un impact plus significatif sur la transmission du signal par rapport à la première couche.

Il est également important de souligner que la porosité des deux couches a un effet inverse sur l'amplitude de l'onde transmise, et cet effet reste presque constant avec l'augmentation de la fréquence, comme indiqué dans le Tableau 3.2.

Il est pertinent de noter que l'influence de la porosité sur l'amplitude du signal transmis reste relativement constante à mesure que la fréquence augmente. Cela signifie que même si la fréquence des ondes ultrasonores varie, l'effet de la porosité des deux couches sur le signal transmis reste similaire. Ces résultats mettent en évidence l'importance de prendre en compte la porosité des matériaux lors de la conception de systèmes utilisant des ondes ultrasonores à basse fréquence pour la transmission à travers des matériaux poreux rigides à double couche.

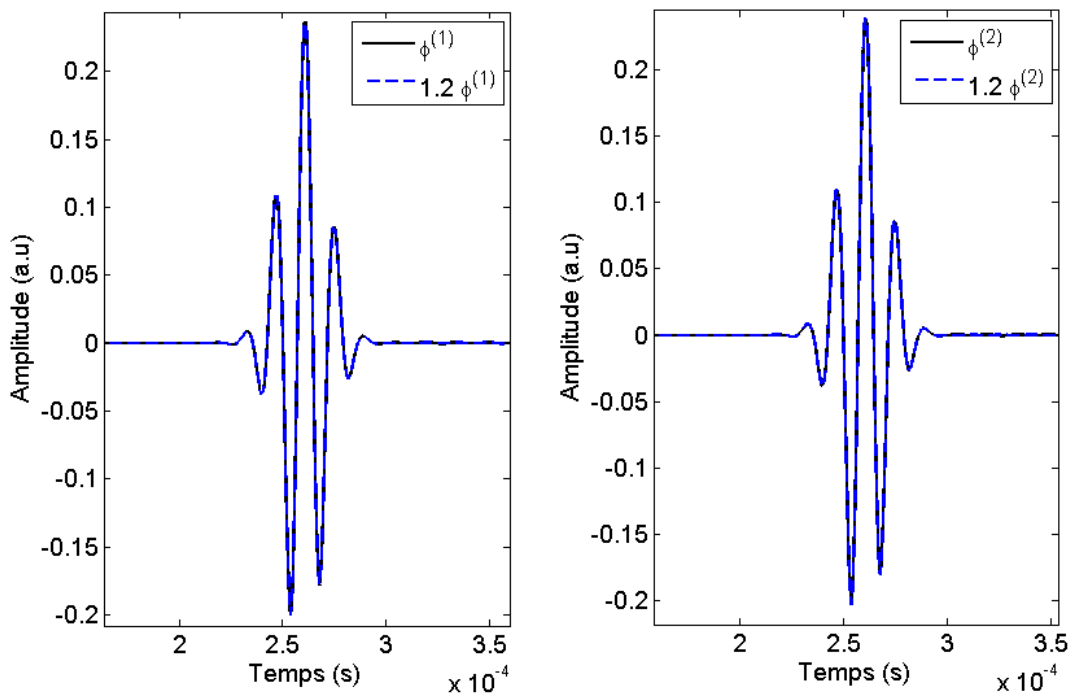


Figure 3.2 - La sensibilité de la porosité $\phi^{(1)}$ et $\phi^{(2)}$ des deux couches sur le signal transmis à la fréquence 70kHz.

2.2 Effet de la tortuosité des deux couches sur le signal transmis :

La sensibilité de la tortuosité $\alpha_{\infty}^{(1)}$ de la première tranche et $\alpha_{\infty}^{(2)}$ de la deuxième tranche du milieu bicouche sur le signal transmis est présentée dans la Figure 3.3. Ces résultats sont obtenus pour une fréquence d'excitation de 70 kHz. Une variation de +20% de la valeur initiale de la tortuosité $\alpha_{\infty}^{(1)}$ entraîne une diminution de l'amplitude du signal transmis

de -4,37%, tandis que pour la même variation de la tortuosité $\alpha_{\infty}^{(2)}$, l'amplitude du signal transmis diminue de -10,17%. Ces observations indiquent que la tortuosité des deux couches a une influence significative sur le signal transmis, et cette influence suit la même tendance pour les deux couches.

Ces résultats démontrent clairement que la tortuosité des couches du milieu bicouche joue un rôle crucial dans la transmission du signal. Une augmentation de la tortuosité entraîne une diminution de l'amplitude du signal transmis, ce qui suggère que la tortuosité affecte la propagation des ondes ultrasonores à basse fréquence à travers le matériau poreux. De plus, il est intéressant de noter que cette influence est plus prononcée pour la deuxième couche, ce qui implique que cette couche a un impact plus important sur la transmission du signal.

De plus, il est crucial de souligner que cette influence de la tortuosité sur le signal transmis augmente avec la fréquence. Cela signifie que plus la fréquence d'excitation est élevée, plus l'effet de la tortuosité sur le signal transmis est marqué. Cette relation entre la fréquence et l'influence de la tortuosité doit être prise en compte lors de la conception de systèmes utilisant des ondes ultrasonores à basse fréquence à travers des milieux bicouches poreux.

En outre, il est également important de noter un déphasage du signal transmis beaucoup plus important dû à la tortuosité de la deuxième couche par rapport à celle de la première couche lorsque les deux tortuosités varient de +20%. Ce déphasage peut être observé dans la Figure 3.3, où l'amplitude du signal transmis diminue plus significativement en présence d'une variation de la tortuosité de la deuxième couche. Ce déphasage accru peut être attribué aux propriétés spécifiques de chaque couche et à leur interaction avec les ondes ultrasonores. Il se peut que la deuxième couche présente une structure ou des caractéristiques qui amplifient davantage l'effet de la tortuosité sur la propagation des ondes, conduisant ainsi à un déphasage plus important du signal transmis. Il convient de souligner que ce déphasage accru peut avoir des implications importantes dans certaines applications où la précision de la phase du signal transmis est cruciale.

En résumé, en plus de l'influence sur l'amplitude du signal transmis, la tortuosité de la deuxième couche présente un déphasage beaucoup plus important par rapport à celle de la première couche lorsque les deux tortuosités varient de +20%. Cette observation souligne l'importance de considérer à la fois l'amplitude et la phase du signal transmis lors de l'analyse

et de la conception de systèmes utilisant des ondes ultrasonores à travers des milieux bicouches poreux.

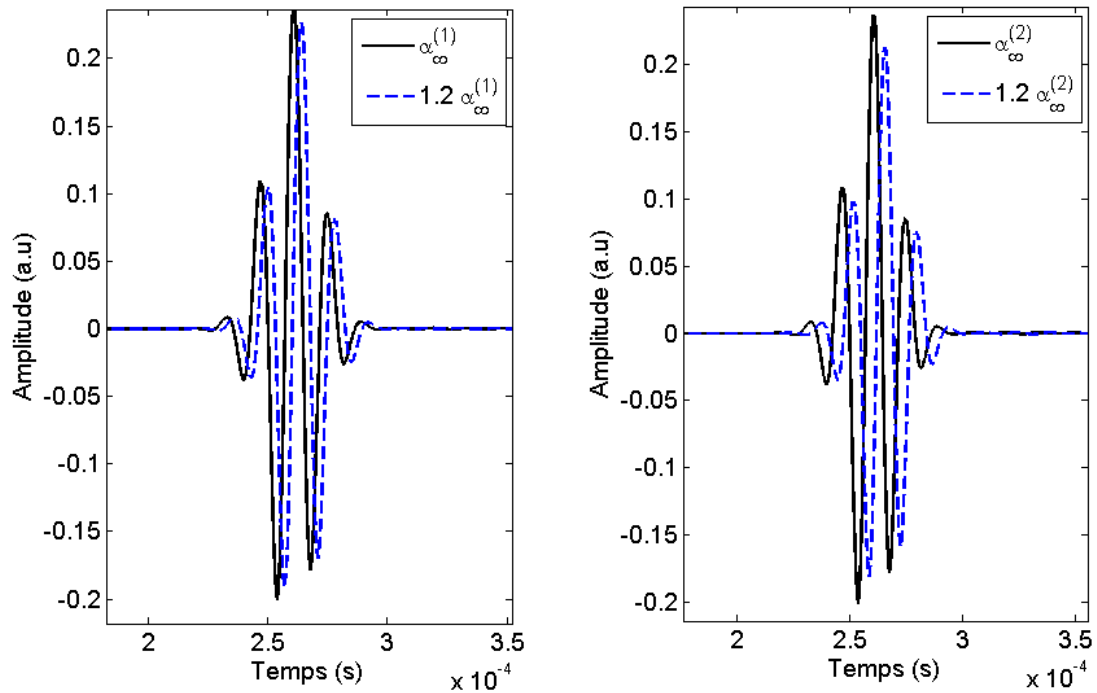


Figure 3.3 - La sensibilité de la tortuosité $\alpha_{\infty}^{(1)}$ et $\alpha_{\infty}^{(2)}$ des deux couches sur le signal transmis à 70kHz

2.3 Effet de la longueur caractéristique visqueuse Λ des deux couches sur le signal transmis :

L'effet de la variation de la longueur caractéristique visqueuse des deux couches, $\Lambda^{(1)}$ et $\Lambda^{(2)}$, sur le signal transmis à basse fréquence des ultrasons est illustré dans la Figure 3.4. Pour une fréquence d'excitation de 70 kHz, une augmentation de +20% de la longueur caractéristique visqueuse de la première couche, $\Lambda^{(1)}$, entraîne une augmentation de +9,47% de l'amplitude du signal transmis. De même, une augmentation de +20% de la longueur caractéristique visqueuse de la deuxième couche, $\Lambda^{(2)}$, entraîne une augmentation encore plus importante de +25,69% de l'amplitude du signal transmis (Tableau 3.1).

Ces résultats mettent en évidence une influence appréciable de la longueur caractéristique visqueuse à basse fréquence des ultrasons sur le signal transmis. De plus, il est intéressant de noter que l'influence de la longueur caractéristique visqueuse de la deuxième

couche est beaucoup plus importante que celle de la première couche, qui elle-même est plus importante que l'influence de la tortuosité sur le signal transmis.

Il est important de souligner que cette influence de la longueur caractéristique visqueuse augmente avec la fréquence. Cela signifie que plus la fréquence des ultrasons augmente, plus l'impact de la longueur caractéristique visqueuse sur le signal transmis est significatif.

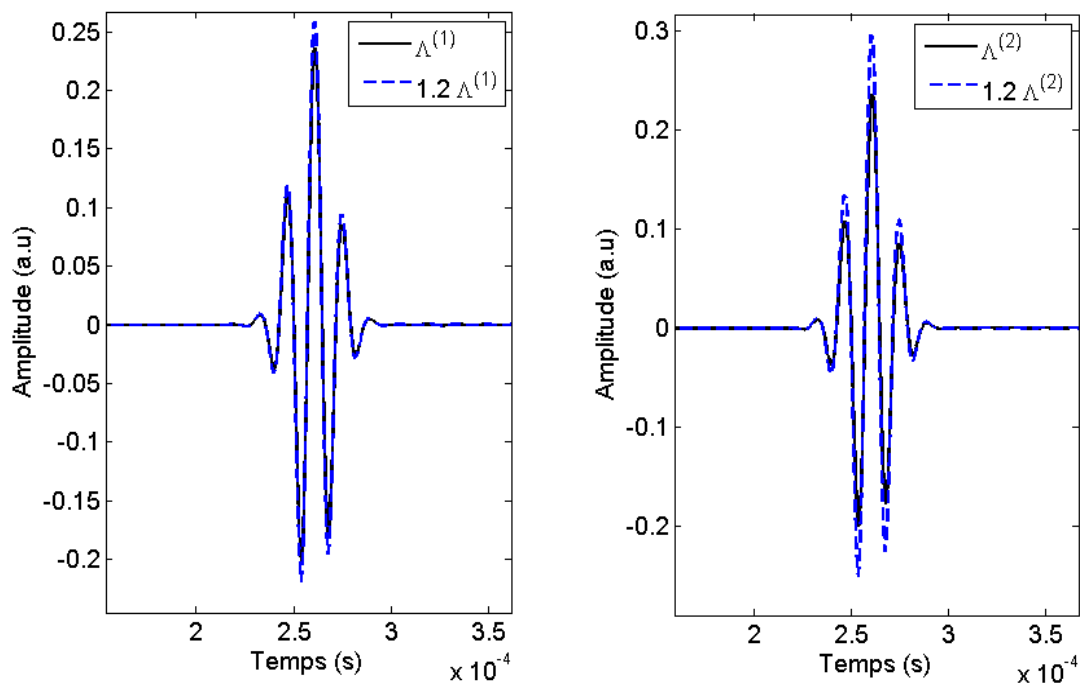


Figure 3.4 - La sensibilité de la longueur caractéristique visqueuse $\Lambda^{(1)}$ et $\Lambda^{(2)}$ des deux couches sur le signal transmis pour une fréquence de 70 kHz.

En conclusion, les résultats de cette étude montrent que la longueur caractéristique visqueuse des deux couches a un effet notable sur l'amplitude du signal transmis à basse fréquence des ultrasons. L'influence de la longueur caractéristique visqueuse de la deuxième couche est plus importante que celle de la première couche, et cette influence augmente avec la fréquence. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte la longueur caractéristique visqueuse lors de la conception de systèmes utilisant des ultrasons à basse fréquence pour la transmission à travers des matériaux poreux bicouches.

2.4 Effet de la longueur caractéristique thermique des deux couches sur le signal transmis :

La Figure 3.5 présente la sensibilité de la longueur caractéristique thermique de la première $\Lambda^{(1)}$ et de la deuxième couche $\Lambda^{(2)}$ du milieu bicouche sur le signal transmis à basse fréquence ultrasonore, en considérant une variation de +20% de leurs valeurs initiales respectives. Les résultats montrent qu'à une fréquence de 70 kHz, la longueur caractéristique thermique de la première couche présente une influence très faible sur le signal transmis, avec une variation de seulement 0,69%. En revanche, la deuxième couche présente une variation remarquable de 2,13% sur le signal transmis.

Ces observations indiquent que la longueur caractéristique thermique a une influence relativement faible sur le signal transmis à basse fréquence ultrasonore. Cependant, il est important de noter que la deuxième couche présente une sensibilité plus marquée que la première couche, ce qui suggère que les propriétés spécifiques de la deuxième couche ont un impact plus significatif sur la transmission du signal.

En ce qui concerne l'effet de la fréquence, le Tableau 3.1 indique que la sensibilité de la longueur caractéristique thermique augmente légèrement avec la fréquence. Cela suggère que l'impact de la longueur caractéristique thermique sur le signal transmis peut varier en fonction de la fréquence des ultrasons.

En résumé, les résultats de cette étude mettent en évidence une faible influence de la longueur caractéristique thermique sur le signal transmis à basse fréquence ultrasonore, avec une sensibilité plus prononcée pour la deuxième couche. De plus, la sensibilité de la longueur caractéristique thermique semble augmenter légèrement avec la fréquence. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte la longueur caractéristique thermique lors de la conception de systèmes utilisant des ultrasons à basse fréquence pour la transmission à travers des milieux bicouches poreux.

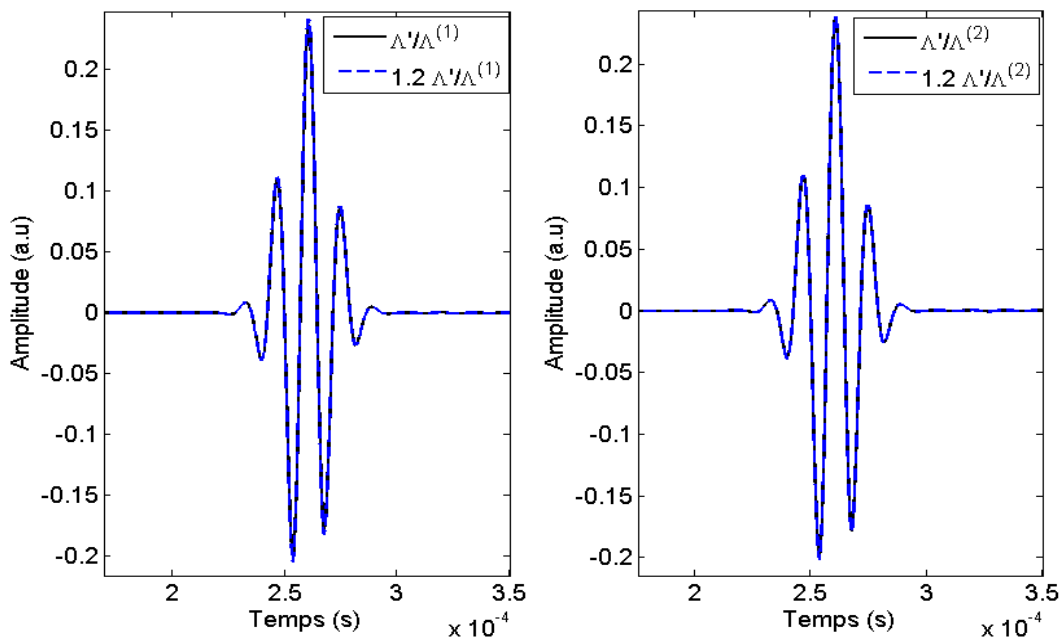


Figure 3.5 - La sensibilité du rapport de la longueur caractéristique thermique $\Lambda'/\Lambda^{(1)}$ et $\Lambda'/\Lambda^{(2)}$ sur le signal transmis pour une fréquence de 70 kHz.

2.5 Effet de facteur de forme visqueux des deux couches sur le signal transmis :

La Figure 3.6 présente la sensibilité du facteur de forme $\xi^{(1)}$ et $\xi^{(2)}$ de la première et de la deuxième couche du milieu bicouche sur le signal transmis dans le régime basse fréquence des ultrasons. Les résultats de cette figure indiquent qu'une variation de +20% du facteur de forme $\xi^{(1)}$ entraîne une régression de -3,04% de l'amplitude du signal transmis, tandis qu'une variation de +20% du facteur de forme $\xi^{(2)}$ entraîne une régression plus importante de -8,71% de l'amplitude de l'onde transmise.

Ces observations démontrent que les facteurs de forme $\xi^{(1)}$ et $\xi^{(2)}$ ont une influence remarquable sur le signal transmis, en particulier $\xi^{(2)}$, dans la gamme des basses fréquences des ultrasons. En d'autres termes, les propriétés spécifiques de la deuxième couche ont un impact significatif sur la transmission du signal, ce qui suggère que la géométrie et la forme de cette couche jouent un rôle crucial dans la propagation des ultrasons à basse fréquence à travers le milieu bicouche.

Il est également important de noter que cette variation de l'amplitude du signal transmis reste presque constante lorsque la fréquence augmente. Cela signifie que, même avec une augmentation de la fréquence des ultrasons, l'effet des facteurs de forme $\xi^{(1)}$ et $\xi^{(2)}$ sur le signal transmis reste stable.

En conclusion, les résultats de cette étude mettent en évidence l'influence remarquable des facteurs de forme $\xi^{(1)}$ et $\xi^{(2)}$ sur le signal transmis dans la gamme des basses fréquences des ultrasons, en accordant une attention particulière à $\xi^{(2)}$. De plus, cette influence reste constante avec l'augmentation de la fréquence. Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les facteurs de forme lors de la conception de systèmes utilisant des ultrasons à basse fréquence pour la transmission à travers des milieux bicouches poreux.

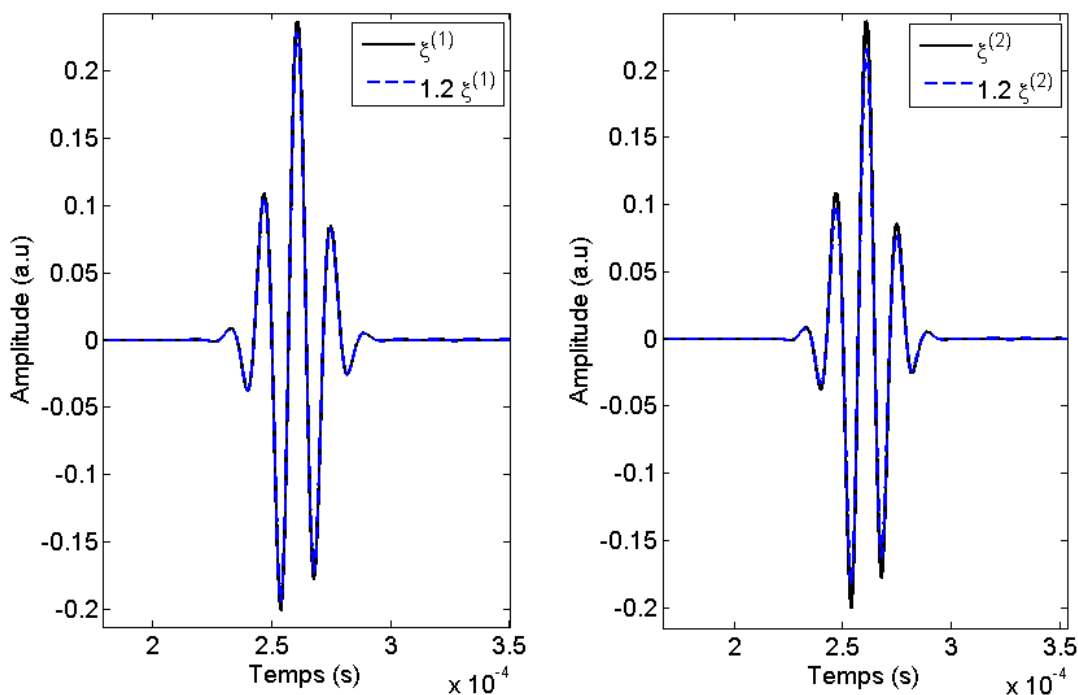


Figure 3.6 - La sensibilité du facteur de forme visqueux $\xi^{(1)}$ et $\xi^{(2)}$ des deux couches sur le signal transmis pour une fréquence de 70 kHz.

2.6 Effet de facteur de forme thermique des deux couches sur le signal transmis :

L'impact de la variation du facteur de forme thermique des deux couches $\xi^{(1)}$ et $\xi^{(2)}$ sur le signal transmis à basse fréquence des ultrasons est illustré dans la Figure 3.7. À

une fréquence d'excitation de 70 kHz, une variation de +20% du facteur de forme $\xi/\xi^{(1)}$ entraîne une augmentation de +0,22% de l'amplitude du signal transmis, tandis qu'une variation de +20% du facteur de forme $\xi/\xi^{(2)}$ entraîne une augmentation de +0,21% de l'amplitude du signal transmis.

Ces résultats démontrent que le facteur de forme thermique a une influence très faible sur le signal transmis dans le régime basse fréquence des ultrasons. En d'autres termes, les variations du facteur de forme n'ont qu'un impact minimal sur l'amplitude du signal transmis. De plus, cette influence reste presque constante lorsque la fréquence augmente.

En résumé, les résultats de cette étude mettent en évidence une très faible influence du facteur de forme thermique sur le signal transmis à basse fréquence des ultrasons. Cette observation souligne que les variations du facteur de forme n'ont qu'un impact négligeable sur l'amplitude du signal transmis, indépendamment de l'augmentation de la fréquence.

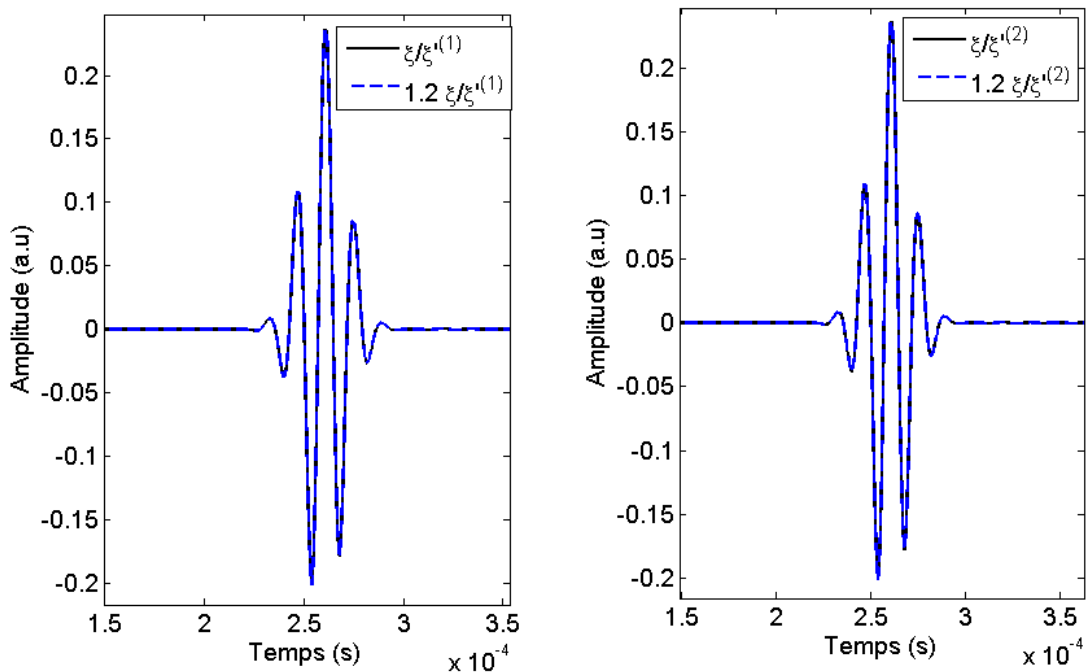


Figure 3.7 - La sensibilité du facteur de forme thermique $\xi^{(1)}$ et $\xi^{(2)}$ des deux couches sur le signal transmis pour une fréquence de 70 kHz.

Cette étude a examiné l'impact de plusieurs paramètres sur le signal transmis à travers un milieu poreux bicouche, notamment la porosité, la tortuosité, les longueurs caractéristiques

visqueuses et thermiques, et les facteurs de forme visqueux et thermiques des deux couches. Les résultats de cette étude permettent de tirer les tendances suivantes:

1. Porosité : Les variations de la porosité des deux couches ont montré une influence minime sur le signal transmis, avec des variations de l'amplitude relativement faibles observées. Il est important de noter que cette influence reste indépendante de l'augmentation de la fréquence des ultrasons.

2. Tortuosité : La tortuosité de la deuxième couche a un impact plus significatif sur le signal transmis par rapport à la première couche. Une augmentation de la tortuosité de la deuxième couche a conduit à une diminution plus importante de l'amplitude du signal transmis. Cette influence augmente avec l'augmentation de la fréquence.

3. Longueurs caractéristiques visqueuse et thermique : Les longueurs caractéristiques visqueuse et thermique ont montré une influence appréciable sur le signal transmis à basse fréquence des ultrasons. Une augmentation de ces longueurs caractéristiques a entraîné une augmentation de l'amplitude du signal transmis. Cette influence augmente également avec la fréquence des ultrasons.

4. Facteurs de forme visqueuse et thermique : Le facteur de forme visqueux de la deuxième couche a montré une influence remarquable sur le signal transmis par rapport au facteur de forme visqueux de la première couche. En revanche, les facteurs de forme thermiques des deux couches ont montré une influence relativement faible sur l'amplitude du signal transmis, et cette influence reste constante avec l'augmentation de la fréquence.

Paramètre	$\frac{\Delta T}{T}$ (%)	
	70kHz	100kHz
$\phi^{(1)}$	-0.32	-0.33
$\phi^{(2)}$	+1.03	1.02
$\alpha_{\infty}^{(1)}$	-4.37	-4.84
$\alpha_{\infty}^{(2)}$	-10.17	-11.09
$\Lambda^{(1)}$ (μm)	9.47	10.43
$\Lambda^{(2)}$ (μm)	25.69	28.03
$\Lambda'/\Lambda^{(1)}$	0.69	0.80
$\Lambda'/\Lambda^{(2)}$	2.13	2.48
$\xi^{(1)}$	-3.04	-3.04
$\xi^{(2)}$	-8.71	-8.74
$\xi/\xi'^{(1)}$	0.04	0.04
$\xi/\xi'^{(2)}$	0.22	0.21

Table 3.1 - Variation relative du coefficient de reflexion $\frac{\Delta T}{T}$ % correspondant à une variation de 20% de chaque paramètre physique pour des fréquences d'excitations de 70kHz et 100 kHz

Conclusion :

En conclusion de ce dernier chapitre, consacré à l'étude de la sensibilité des paramètres physiques dans les milieux poreux bicouche, nous avons réalisé une analyse approfondie en utilisant des simulations numériques. Notre objectif était de quantifier l'effet de la variation des paramètres sur l'amplitude de l'onde transmise à travers la structure.

Les résultats de nos simulations numériques ont confirmé nos observations précédentes et mis en évidence des résultats intéressants. Nous avons constaté que les paramètres visqueux, tels que la tortuosité, la longueur caractéristique visqueuse et le facteur de forme visqueux des deux couches, ont une influence significative sur l'amplitude de l'onde

transmise. Des variations de ces paramètres ont entraîné des variations importantes dans le comportement acoustique global de la structure bicouche.

En revanche, les paramètres thermiques ont montré des effets relativement faibles sur l'amplitude de l'onde transmise, confirmant ainsi nos observations précédentes. De plus, la porosité a été identifiée comme ayant une influence limitée sur les ondes transmises, corroborant les résultats antérieurs.

Cette étude de sensibilité, basée sur des simulations numériques, nous a permis de mieux comprendre comment les paramètres physiques des milieux poreux bicouche affectent la propagation des ondes acoustiques. Ces informations sont précieuses pour l'optimisation et la conception de structures poreuses bicouche dans des domaines tels que l'insonorisation, l'isolation thermique et l'absorption acoustique.

Dans l'ensemble, ce dernier chapitre a fourni des résultats importants pour la compréhension et la caractérisation des milieux poreux bicouche. Il conclut notre étude en élargissant notre analyse pour prendre en compte la variabilité des paramètres physiques et en soulignant l'importance des paramètres visqueux par rapport aux paramètres thermiques dans l'amplitude des ondes transmises.

Ces résultats constituent une base solide pour des recherches futures et ouvrent la voie à une utilisation plus efficace des milieux poreux bicouche dans diverses applications nécessitant des performances acoustiques spécifiques.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Ce mémoire a permis une exploration détaillée des milieux poreux et de leur comportement acoustique à travers trois chapitres distincts. Le premier chapitre a établi une description générale des milieux poreux en mettant l'accent sur les modèles, les hypothèses et les paramètres utilisés pour caractériser ces environnements complexes. En particulier, les modèles théoriques décrivant les interactions visqueux-inertiels entre la structure solide et la partie fluide dans les milieux poreux ont été présentés.

Le deuxième chapitre s'est concentré sur une étude analytique approfondie des coefficients de réflexion et de transmission dans les milieux poreux monocouche et bicouche en utilisant la théorie des fluides équivalents. Des expressions analytiques ont été développées pour mieux comprendre l'influence des propriétés physiques du matériau sur la propagation des ondes acoustiques.

Le troisième chapitre a complété cette analyse en réalisant une étude de sensibilité des paramètres physiques dans les milieux poreux bicouche à l'aide de simulations numériques. Les résultats ont démontré que les paramètres visqueux tels que la tortuosité, la longueur caractéristique visqueuse et le facteur de forme visqueux des deux couches ont une influence significative sur l'amplitude de l'onde transmise, tandis que les paramètres thermiques ont des effets relativement faibles. La porosité a été identifiée comme ayant une influence limitée sur les ondes transmises.

Dans l'ensemble, cette étude a contribué à une meilleure compréhension des milieux poreux et de leur comportement acoustique. Les modèles théoriques, les expressions analytiques et les simulations numériques réalisées ont permis d'analyser l'impact des paramètres physiques sur la propagation des ondes acoustiques. Ces connaissances sont précieuses pour optimiser la conception et les performances des structures poreuses dans des domaines tels que l'insonorisation, l'isolation thermique et l'absorption acoustique.

Ce travail de recherche ouvre également la voie à de futures études et améliorations dans le domaine des milieux poreux. Les résultats obtenus serviront de base solide pour de nouvelles recherches visant à affiner la compréhension et la caractérisation de ces structures, avec des applications plus efficaces et adaptées à leurs performances acoustiques spécifiques.

Perspectives

Au vu des résultats obtenus et des connaissances acquises au cours de ce mémoire, plusieurs perspectives de recherche intéressantes peuvent être envisagées :

1. Étude expérimentale : Compléter les analyses théoriques et numériques par des études expérimentales pour valider les résultats obtenus. Cela permettrait de confronter les prédictions théoriques et les simulations numériques avec des mesures réelles, renforçant ainsi la fiabilité des modèles développés.
2. Optimisation des performances acoustiques : Utiliser les résultats de cette étude pour optimiser les performances des structures poreuses dans des applications spécifiques telles que l'insonorisation, l'isolation thermique et l'absorption acoustique. En ajustant les paramètres physiques des milieux poreux, il serait possible de concevoir des matériaux plus performants et plus adaptés aux besoins spécifiques de chaque application.
2. Étude des milieux poreux complexes : Étendre cette recherche aux milieux poreux complexes qui présentent des géométries plus variées et des propriétés physiques non uniformes. Les structures poreuses réelles peuvent être plus complexes que les modèles simplifiés étudiés jusqu'à présent, et une analyse approfondie de ces milieux complexes permettrait de mieux comprendre leur comportement acoustique.
4. Modélisation avancée : Développer des modèles plus avancés pour décrire les interactions visqueux-inertiels dans les milieux poreux. Les modèles utilisés jusqu'à présent peuvent présenter certaines limitations, et l'exploration de modèles plus sophistiqués permettrait une meilleure précision et une meilleure représentation du comportement réel des milieux poreux.
5. Applications industrielles : Transposer les résultats de cette étude dans des applications industrielles concrètes, telles que l'amélioration des matériaux d'insonorisation dans l'automobile, l'aéronautique ou le bâtiment, ou encore le développement de nouveaux matériaux absorbants dans l'industrie de l'audio et du son.

En poursuivant ces perspectives de recherche, il serait possible d'approfondir notre compréhension des milieux poreux, d'améliorer la modélisation et de développer des applications plus performantes dans divers domaines. Les milieux poreux continuent d'être un domaine de recherche prometteur et offrent de nombreuses opportunités pour des avancées scientifiques et technologiques significatives.

Références

- [1] Allard, J. F. (1993). Propagation of sound in porous media. Elsevier Applied Science Publishers LTD.
- [2] Johnson, D. L., Koplik, D., & Daschen, R. (1987). Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, 176, 379.
- [3] Zwikker, C., & Kosten, C. W. (1949). Sound-absorbing materials. Elsevier.
- [4] Lafarge, D., Lemarinier, P., Allard, J. F., & Tarnow, V. (1997). Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102(4), 1995.
- [5] Biot, M. A. (1956). The theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid: Higher frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28, 179.
- [6] Biot, M. A. (1956). The theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid: Low-frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28, 168.
- [7] Sadouki, M., Fellah, M., Fellah, Z. E. A., Ogam, E., & Depollier, C. (2015). Ultrasonic propagation of reflected waves in cancellous bone: Application of Biot theory. In ESUCB 2015, 6th European Symposium on Ultrasonic Characterization of Bone, 1-4. doi:10.1109/ESUCB.2015.7169900
- [8] Norris, A. N. (1986). On the viscodynamic operator in Biot's equations of poroelasticity. *Journal of Wave Materials Interaction*, 1, 365.
- [9] Sadouki, M. (2014). Modélisation théorique de la propagation acoustique dans un milieu poreux inhomogène [Doctoral dissertation, USTHB].
- [10] Sadouki, M., Mahiou, A., & Souna, N. (2022). Effect of acoustic low-frequency ultrasound parameters on the reflected signal from a rigid porous medium. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 50, 045002. doi:10.1121/2.0001717
- [11] Mahiou, A., Sellami, I., & Sadouki, M. (2021). Sensitivity of transmitted low-frequency ultrasound physical parameters describing a rigid porous material. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 45, 045004. doi:10.1121/2.0001535

- [12] Sadouki, M., Rahmoun, N., & Boudani, K. (2020). Sensitivity study of the acoustic parameters on the wave transmitted through a bilayer porous medium at very low frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 148, 2458. doi:10.1121/1.5146783
- [13] Sadouki, M., Rahmoun, N., & Boudani, K. (2020). Low-frequency sensitivity study of physical parameters on the transmitted wave through a bilayer porous medium. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 42, 045005. doi:10.1121/2.0001349
- [14] Sadouki, M., Ait Kaid, N., & Hasine, H. (2020). Inverse resistivity measurement of an air-saturated porous medium via transmitted waves at Darcy's regime - Frequency approach. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 42, 045006. doi:10.1121/2.0001372
- [15] Sadouki, M. (2021). Experimental characterization of air-saturated porous material via low-frequency ultrasonic transmitted waves. *Physics of Fluids*, 33, 037102. doi:10.1063/5.0038273
- [16] Sadouki, M. (2018). Experimental measurement of the porosity and the viscous tortuosity of rigid porous material in low frequency. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*. doi:10.1177/1461348418756016
- [17] Sadouki, M. (2017). Experimental characterization of rigid porous material via the first ultrasonic reflected waves at oblique incidence. *Journal of Applied Acoustics*, 133, 64-72. doi:10.1016/J.APACOUST.2017.12.010
- [18] Sadouki, M. (2018). Experimental measurement of tortuosity, viscous, and thermal characteristic lengths of rigid porous material via ultrasonic transmitted waves. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, 35, 045005. doi:10.1121/2.0000991
- [19] Berbiche, A., Sadouki, M., Fellah, Z. E. A., Mitri, F. G., Ogam, E., & Depollier, C. (2016). Experimental determination of the viscous flow permeability of porous materials by measuring reflected low-frequency acoustic waves. *Journal of Applied Physics*, 119, 014906. doi:10.1063/1.4939073