

Construction d'un tube de Kundt pour la mesure basse fréquence des coefficients d'absorption

Jean Fourcade <audio@volucres.fr>

13 juin 2020

Résumé

Ce papier décrit la conception et la réalisation d'un tube d'impédance (tube de Kundt). Ce tube est dimensionné pour fonctionner dans la bande de fréquence allant de 50 hz à 1000 hz et permet l'analyse de matériaux poreux jusqu'à 500 mm d'épaisseur. Le logiciel REW (Room EQ Wizard) [1] est utilisé pour mesurer la pression acoustique. Des scripts Scilab [2] permettent ensuite de calculer l'impédance spécifique, le coefficient de réflexion en pression et le coefficient d'absorption d'un échantillon placé dans le tube. Deux méthodes sont mises en œuvre pour identifier l'impédance caractéristique et le nombre d'onde du matériau. Ce résultat est utilisé pour tenter de prédire le coefficient d'absorption d'un matériau d'épaisseur supérieure à celle que permet le tube.

Nomenclature

α	coefficient d'absorption
β	facteur d'augmentation de compliance
ω	pulsation
ρ	densité de l'air
σ_m	coefficient de résistivité au passage de l'air
A	coefficient de pertes thermiques
c	vitesse du son
f	fréquence
f_c	fréquence de coupure d'un matériau poreux
F_l	limite inférieure de fréquence du tube
f_s	fréquence de résonance du HP
F_u	limite supérieure de fréquence du tube
H	hauteur intérieure du tube
H_{1i}	fonction de transfert microphone 1 vers i
j	nombre complexe $j^2 = -1$
k	nombre d'onde $= \omega/c$
k_m	nombre d'onde d'un matériau poreux
p^i	pression de l'air sur la surface i d'un matériau
Q_{es}	facteur de qualité électrique du HP
Q_{ms}	facteur de qualité mécanique du HP
Q_{tc}	facteur de qualité total de l'enceinte close
R	coefficient de réflexion en pression

R_e	résistance de la bobine mobile du HP
S_2	espacement entre le microphone 1 et 2
S_3	espacement entre le microphone 1 et 3
S_4	espacement entre le microphone 1 et 4
u^i	vitesse des particules de l'air sur la surface i d'un matériau
V_{as}	volume d'air équivalent à la suspension du HP
Z_c	impédance caractéristique de l'air $= \rho c$
Z_m	impédance caractéristique d'un matériau poreux

Introduction

Le traitement acoustique des salles d'écoute (auditorium, home-cinéma, home-studio ...) nécessite l'utilisation de mécanismes d'absorption des ondes sonores. Parmi ceux-ci, on trouve les matériaux poreux constitués de laines minérales (laines de verre, laines de roche, de coton, de bois, de chanvre ...) et les mousses à cellules ouvertes (en polyuréthane ou en mélamine).

La grande diversité de matériaux disponibles sur le marché et le nombre important de fournisseurs compliquent terriblement le choix de l'audiophile amateur qui désire traiter sa salle. Ce choix est d'autant plus complexe que les fournisseurs communiquent rarement les coefficients d'absorption de leurs produits (ceux-ci étant principalement dédiés à l'isolation thermique) et qu'il existe un grand écart de prix entre une simple laine de verre et un matériau acoustique dédié comme la mousse de mélamine.

Dans l'optique d'un traitement acoustique avec des matériaux poreux de fortes épaisseurs, il est primordial de connaître la fréquence la plus basse que le matériau peut absorber. Cette fréquence dépend certes de son épaisseur mais aussi beaucoup de la nature du matériau. L'objectif de ce papier est de mesurer cette fréquence pour différents matériaux.

Il existe plusieurs méthodes de mesure mais une méthode réalisable par un amateur et qui de plus est adaptée aux basses fréquences, est incontestablement un tube à impédance ou tube de Kundt, du nom de son inventeur.

Ce papier décrit en détail la réalisation d'un tube de Kundt et fournit les scripts Scilab de traitement du

signal associés.

Nous simulerons dans un premier temps l'absorption acoustique de matériaux poreux de différentes épaisseurs et caractéristiques.

Nous détaillerons ensuite plusieurs méthodes permettant d'identifier l'impédance caractéristique et le nombre d'onde d'un matériau poreux à partir de l'impédance spécifique de sa surface.

Nous décrirons alors la réalisation du tube à impédance et la méthode que nous avons utilisé pour le calibrer.

Nous utiliserons enfin ce tube pour caractériser différents matériaux poreux que l'on trouve couramment dans le commerce.

Nous terminerons par quelques considérations sur les épaisseurs de matériaux qu'il faut utiliser dans une salle d'écoute.

1 Logiciels de calcul

Le logiciel utilisé pour tous les calculs de ce projet est Scilab [2]. Scilab est un logiciel libre de calcul numérique multi-plateforme. Il est disponible pour Windows, Mac OS X, GNU/Linux et BSD.

Scilab peut exécuter des instructions en ligne de commande, ainsi que des fichiers de commande (scripts) contenant des instructions (format texte). Scilab fournit un éditeur de texte Scinotes pour éditer les scripts.

La liste des scripts de ce projet est la suivante :

- <Kundt.sci> : bibliothèque contenant les fonctions de base de tous les programmes de calcul. Ce script doit être exécuté préalablement à l'utilisation des autres scripts.
- <Multilayers_simulation.sce> : simulation d'un panneau multi-couche. Calcul du coefficient d'absorption en fonction de la fréquence et sauvegarde dans un fichier de l'impédance spécifique de la dernière couche.
- <Scanning_absorber_simulation.sce> : diagramme 2D iso-valeurs de l'absorption d'un matériau poreux soit en fonction de la fréquence et du coefficient de résistivité au passage de l'air, soit en fonction de la fréquence et de l'épaisseur du matériau.
- <Calibrate.sce> : calibration du tube de Kundt.
- <Test_impedance.sce> : comparaison de l'impédance mesurée d'une cavité de longueur donnée avec l'impédance théorique de cette même cavité.
- <Absorption_measurement.sce> : calcul du coefficient d'absorption d'un échantillon à partir des mesures des microphones. Sauvegarde dans un fichier de l'impédance spécifique de la surface mesurée.

- <Impedance_indent_Utsuno.sce> : identifie l'impédance caractéristique et le nombre d'onde d'un matériau poreux par la méthode de Utsuno, Takeshi et Fujikawa [10].
- <Impedance_indent_Larner_Davy.sce> : identifie l'impédance caractéristique et le nombre d'onde d'un matériau poreux par la méthode de Larner et Davy [12].
- <Impedance_indent_Dunn_Davern.sce> : identifie l'impédance caractéristique et le nombre d'onde d'un matériau poreux par la méthode de Dunn et Davern [11].

Les scripts de ce projet sont distribués sous licence CeCill [3] et peuvent être téléchargés à partir du lien [4].

Les scripts sont auto-documentés. Une brève description sera donnée dans ce papier au fur et à mesure de leurs utilisations.

2 Fichiers de mesures

Les fichiers de mesures (mdat du logiciel REW) et les fichiers textes extraits des fichiers mdat sont téléchargeables à partir du lien [5]. Ce lien contient toutes les mesures de tous les matériaux testés dans ce papier. Le volume est d'environ 117 Mo.

La nomenclature des fichiers de mesure se déduit de son nom qui comprend le type de matériau testé, son épaisseur et le numéro de microphone utilisé. Les fichiers d'impédance spécifiques et caractéristiques se réfère à un nom de matériau et pour ces derniers à la méthode utilisée pour leur calcul.

3 Modèle théorique de prédiction de l'absorption

Il existe différents modèles qui prédisent les caractéristiques acoustique d'un matériau poreux (voir [7], [8] et [9]). Nous nous contenterons d'utiliser le modèle de Delany-Bazley [7] dont l'avantage est de ne dépendre que d'un seul paramètre pour caractériser le matériau, qui est le coefficient de résistivité au passage de l'air, noté σ_m .

Le coefficient d'absorption d'un panneau multi-couches se calcule à partir de la matrice de transfert acoustique qui définit la relation entre la pression et la vitesse des particules d'air entre ces deux faces.

Le script Scilab <Multilayers_simulation.sce> calcule le coefficient d'absorption d'un ensemble composé de plusieurs couches qui peuvent être au choix : une lame d'air, un matériau poreux caractérisé par son coefficient σ_m ou un matériau poreux dont un fichier fournit l'impédance caractéristique et le nombre d'onde de ce matériau en fonction de la fréquence.

Soit un panneau constitué de n couches de différents matériaux (voir figure 1).

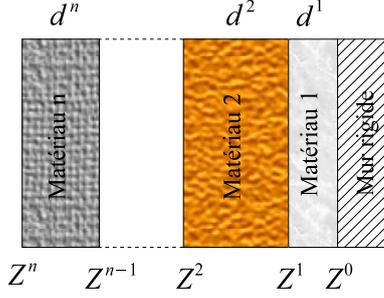


FIGURE 1 – Matériau d'absorption multi-couches

Le matériau de rang i de la figure 1 a une épaisseur d^i et les pressions et vitesses des particules d'air des surfaces i et $i - 1$ sont notés respectivement p^i, v^i et p^{i-1}, v^{i-1} . La matrice de transfert s'écrit alors (voir [6]) :

$$\begin{pmatrix} p^i \\ u^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos k_m^i d^i & jZ_m^i \sin k_m^i d^i \\ \frac{j}{Z_m^i} \sin k_m^i d^i & \cos k_m^i d^i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p^{i-1} \\ u^{i-1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

avec Z_m^i l'impédance caractéristique de la couche i et k_m^i le nombre d'onde.

L'impédance spécifique noté Z^i , rapport entre la pression et la vitesse, s'écrit :

$$Z^i = \frac{p^i}{u^i} \quad (2)$$

A partir de la matrice (1) on déduit la relation entre les deux impédances Z^i et Z^{i-1} :

$$Z^i = \frac{-jZ_m^i Z^{i-1} \cot k_m^i d^i + (Z_m^i)^2}{Z^{i-1} - jZ_m^i \cot k_m^i d^i} \quad (3)$$

Pour calculer l'impédance Z^n de la dernière couche, on part de l'impédance du mur rigide Z^0 par définition infinie. On en déduit l'impédance Z^1 en appliquant la relation (3). On obtient :

$$Z^2 = -jZ_m^1 \cot k_m^1 d^1 \quad (4)$$

Puis de proche en proche, en appliquant la relation (3), on obtient finalement l'impédance Z^n .

Connaissant l'impédance spécifique Z^n , on déduit enfin le coefficient de réflexion en pression par :

$$R = \frac{Z^n - Z_c}{Z^n + Z_c} \quad (5)$$

d'où l'on déduit le coefficient d'absorption par :

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (6)$$

Le script <Multilayers_simulation.sce> permet de traiter autant de couches que l'on veut. Le paramétrage du nombre de couche est saisi dans un fichier texte. La documentation de ce script décrit la syntaxe de ce fichier. Les fichiers utilisés pour cette étude sont fournis avec le script Scilab.

Chaque couche est caractérisée de trois manières différentes :

- Une lame d'air dont l'impédance caractéristique est $Z_m = Z_c = \rho c$ et le nombre d'onde $k_m = k = \omega/c$.
- Un matériau caractérisé par son coefficient de résistivité au passage de l'air, σ_m et dont l'impédance caractéristique et le nombre d'onde sont calculés en utilisant le modèle Delany-Bazley [7]. Ce modèle n'utilise que trois équations.

On définit la quantité adimensionnelle X suivante :

$$X = \frac{\rho f}{\sigma_m} \quad (7)$$

On en déduit les valeurs de Z_m et k_m par les expressions :

$$Z_m = \rho c (1 + 0.0571X^{-0.754} - j0.087X^{-0.732}) \quad (8)$$

$$k_m = \frac{\omega}{c} (1 + 0.0978X^{-0.700} - j0.189X^{-0.595}) \quad (9)$$

Le domaine de validité du modèle Delany-Bazley porte sur les valeurs de σ_m et X . Le modèle est valide suivant les conditions suivantes :

$$1000 < \sigma_m < 50000 \text{ Pa.s/m}^2 \quad (10)$$

$$0.01 < X < 1.0 \quad (11)$$

- Un matériaux quelconque dont l'impédance caractéristique et le nombre d'onde sont définis par un fichier qui fournit ces valeurs complexe en fonction de la fréquence.

4 Identification de l'impédance caractéristique et du nombre d'onde d'un matériau poreux

Pour simuler le comportement d'un matériau poreux, il faut connaître les valeurs de son impédance caractéristique Z_m et son nombre d'onde k_m . Il existe plusieurs méthodes d'identification. Nous décrivons trois méthodes, celle de Utsuno, Takeshi et Fujikawa [10], une modification de cette dernière décrite par Lerner et Davy [12] et celle de Dunn et Davern [11].

La méthode [10] consiste à placer le matériaux devant deux cavités d'air de deux profondeurs différentes. Soit un matériau poreux donné, d'épaisseur d . Plaçons ce matériau dans un tube de Kundt de telle manière que l'impédance spécifique d'une de ses face soit imposée et vaille Z^0 . On en déduit l'impédance Z^1 de son autre face par la relation (3).

En utilisant les relations d'Euler qui transforment les expressions trigonométriques en exponentielle complexe, la relation (3) s'écrit :

$$\frac{Z^1}{Z_m} = \frac{Z^0(e^{jk_m d} + e^{-jk_m d}) + Z_m(e^{jk_m d} - e^{-jk_m d})}{Z^0(e^{jk_m d} - e^{-jk_m d}) + Z_m(e^{jk_m d} + e^{-jk_m d})} \quad (12)$$

d'où l'on déduit :

$$e^{2jk_m d} = \frac{(Z^1 + Z_m)(Z^0 - Z_m)}{(Z^1 - Z_m)(Z^0 + Z_m)} \quad (13)$$

Pour un matériau donné, le membre de gauche de cette équation est constant. En imposant maintenant une nouvelle impédance $Z^{0'}$ au matériau, on en déduit la nouvelle impédance de son autre face $Z^{1'}$ et on peut écrire :

$$\frac{(Z^1 + Z_m)(Z^0 - Z_m)}{(Z^1 - Z_m)(Z^0 + Z_m)} = \frac{(Z^{1'} + Z_m)(Z^{0'} - Z_m)}{(Z^{1'} - Z_m)(Z^{0'} + Z_m)} \quad (14)$$

Les deux équations (13) et (14) forment un système de deux équations à deux inconnues Z_m et k_m dont la solution est :

$$Z_m = \pm \left(\frac{(Z^1 - Z^{1'})Z^0 Z^{0'} - (Z^0 - Z^{0'})Z^1 Z^{1'}}{(Z^1 - Z^{1'}) - (Z^0 - Z^{0'})} \right)^{1/2} \quad (15)$$

$$k_m = \frac{1}{2jd} \ln \left(\frac{(Z^1 + Z_m)(Z^0 - Z_m)}{(Z^1 - Z_m)(Z^0 + Z_m)} \right) \quad (16)$$

Pour imposer les impédances Z_0 et $Z_{0'}$, on place le matériau devant des cavités de longueur respectivement L^0 et $L^{0'}$. Les impédances s'écrivent alors :

$$Z^0 = -jZ_c \cot kL^0 \quad (17)$$

$$Z^{0'} = -jZ_c \cot kL^{0'} \quad (18)$$

En mesurant les impédances Z^1 et $Z^{1'}$ on calcule Z_m et k_m à partir des équations (15) et (16). Le calcul de Z_m se fait en choisissant le signe de telle manière que la partie réelle de Z_m soit positive.

Il est possible de modifier la méthode [10], comme proposé dans [12], en plaçant le matériau devant un mur rigide au lieu d'une première cavité de longueur L^0 ce qui conduit à une impédance Z^0 infinie. Dans ces conditions l'équation (15) se simplifie et aboutit à :

$$Z_m = \sqrt{(Z^1 - Z^{1'})Z^{0'} + Z^1 Z^{1'}} \quad (19)$$

Le nombre d'onde se calcule alors avec la même équation (16).

La méthode [11] consiste à utiliser un même matériau de plusieurs épaisseurs. Soit un matériau poreux donné, d'épaisseur nd avec n un nombre entier. En plaçant une face de ce matériaux contre une paroi rigide, on déduit l'impédance de son autre face par l'équation (4) :

$$Z^n = -jZ_m \cot k_m n d \quad (20)$$

Ce qui peut s'écrire :

$$e^{2jk_m n d} = \frac{(Z^n + Z_m)}{(Z^n - Z_m)} \quad (21)$$

En plaçant deux même matériau, l'un d'épaisseur d , l'autre d'épaisseur nd , on déduit la relation :

$$\frac{(Z^1 + Z_m)^n}{(Z^1 - Z_m)^n} = \frac{(Z^n + Z_m)}{(Z^n - Z_m)} \quad (22)$$

Avec $n = 2$, cette équation se résout par :

$$Z_m = \sqrt{Z_1(2Z_1 - Z_n)} \quad (23)$$

Avec $n = 3$, cette équation se résout par :

$$Z_m = \frac{Z_1}{3Z_1 - Z_n} \sqrt{(Z_1 - 3Z_n)(Z_n - 3Z_1)} \quad (24)$$

Dans les deux cas le nombre d'onde k_m se calcule par :

$$k_m = \frac{1}{2jd} \ln \left(\frac{Z_1 + Z_m}{Z_1 - Z_m} \right) \quad (25)$$

Nous utiliserons les méthodes de Larner et Davy puis celle de Dunn, Davern pour calculer les impédances caractéristiques des matériaux en test. Cela nous permettra de comparer les différents résultats obtenus.

5 Calcul de la fonction de transfert entre deux microphones

La méthode utilisée pour calculer le coefficient d'absorption dans le tube est celle du calcul de la fonction de transfert H entre deux microphones placés à deux emplacements différents du tube (voir figure 5).

Le calcul de cette fonction de transfert conduit à décomposer l'onde sonore en une onde incidente et une onde réfléchie. Cette décomposition permet le calcul du coefficient de réflexion en pression d'où est évalué le coefficient d'absorption.

Le microphone le plus proche de l'échantillon porte le numéro 1.

La pression sonore mesurée par le microphone i s'écrit :

$$p_i = A[e^{jkL_i} + Re^{-jkL_i}] \quad (26)$$

La fonction de transfert $H_{1j}(\omega)$ entre le microphone 1 et i est donc :

$$H_{1i} = \frac{p_i}{p_1} \quad (27)$$

A partir de la fonction de transfert on peut calculer le coefficient de réflexion en pression :

$$R = \frac{H_{1i}e^{jkL_1} - e^{jkL_i}}{e^{-jkL_i} - H_{1i}e^{-jkL_1}} \quad (28)$$

A partir du coefficient de réflexion en pression, le coefficient d'absorption est donné par la relation (6).

Les ondes planes qui se propagent dans le tube sont atténuées par la viscosité de l'air et les pertes thermique [15]. Pour prendre en compte cette atténuation, on introduit un terme complexe dans le nombre d'onde :

$$k'' = k - jk'' \quad (29)$$

k'' est une constante qui caractérise l'atténuation. Les standards donnent la relation empirique suivante pour calculer l'atténuation :

$$k'' = A \frac{\sqrt{f}}{cH} \quad (30)$$

6 Simulations de l'absorption

Le script <Scanning_absorber_simulation.sce> trace une surface 2D dont la couleur représente le coefficient d'absorption avec les courbes de niveau associés. Le modèle Delany-Bazley est utilisé. Les axes X et Y sont respectivement la fréquence et le coefficient de résistivité au passage de l'air.

L'objectif est de déterminer quel est le coefficient de résistivité au passage de l'air qui procure l'absorption la plus importante dans les basses fréquences. On définit pour cela la fréquence de coupure du matériau $f_c^{0.9}$ comme la fréquence la plus basse telle que le coefficient d'absorption vaille 0.9 et $f_c^{0.6}$ celle pour une valeur d'absorption de 0.6 (voir la section 12 qui explique le choix de ces valeurs).

Nous étudierons trois épaisseurs : 100 mm, 200 mm et 400 mm.

6.1 Épaisseur de 100mm

Le coefficient d'absorption est représenté sur le diagramme de la figure 2. Les courbes de niveau sont calculées au pas de 0.1 allant de 0.1 à 0.9.

On obtient $f_c^{0.9} = 434$ hz pour $\sigma_m = 9450$ Pa.s/m². On remarque que la valeur de σ_m pour obtenir cette fréquence de coupure est assez large. Elle s'étend de 5500 Pa.s/m² à 15000 Pa.s/m². La fréquence $f_c^{0.6}$ vaut 225 hz pour $\sigma_m = 14900$ Pa.s/m².

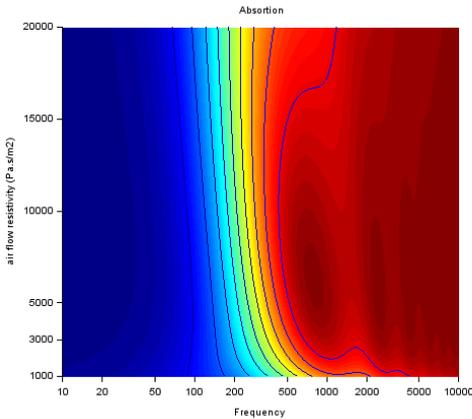


FIGURE 2 – Absorption pour une épaisseur de 100 mm

6.2 Épaisseur de 200mm

Le diagramme est représenté figure 3.

La fréquence de coupure $f_c^{0.9}$ est obtenue pour $\sigma_m = 4350$ Pa.s/m². Elle vaut 219 hz. La plage du coefficient de résistivité au passage de l'air est plus réduite que dans le cas précédent et les valeurs sont plus faibles. Elle s'étend de 3000 Pa.s/m² à 7000 Pa.s/m². La fréquence $f_c^{0.6}$ vaut 114 hz pour $\sigma_m = 6250$ Pa.s/m².

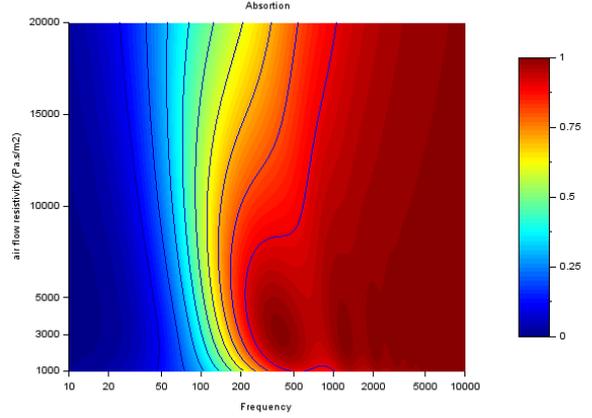


FIGURE 3 – Absorption pour une épaisseur de 200 mm

6.3 Épaisseur de 400mm

Le dernier diagramme est représenté figure 4. La fréquence de coupure est $f_c = 110$ hz obtenue pour $\sigma_m = 2180$ Pa.s/m². La plage utilise du coefficient σ_m est très réduite et va de 1500 Pa.s/m² à 3600 Pa.s/m². La fréquence $f_c^{0.6}$ vaut 59 hz pour $\sigma_m = 2675$ Pa.s/m².

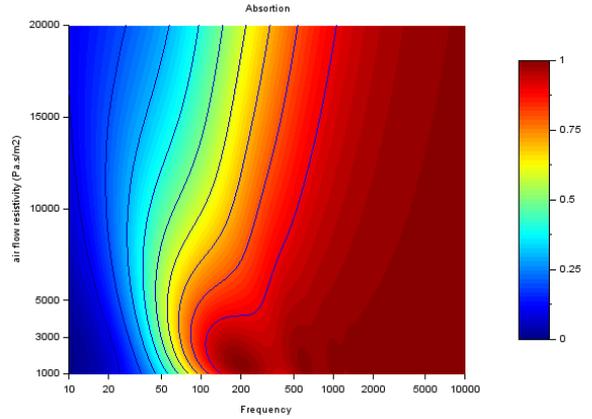


FIGURE 4 – Absorption pour une épaisseur de 400 mm

On remarque dans ce cas qu'une valeur importante de σ_m est très préjudiciable. Pour $\sigma_m = 20000$ Pa.s/m², la fréquence de coupure $f_c^{0.9}$ est de 1000 hz, soit 10 fois plus que le cas le plus favorable.

7 Dimensionnement du tube

La méthode utilisée dans ce papier pour calculer le coefficient d'absorption acoustique consiste, comme nous l'avons dit, à employer un tube d'impédance. Un haut-parleur est placé à une extrémité du tube et l'échantillon à analyser à l'autre extrémité. Le schéma du tube est donné figure 5.

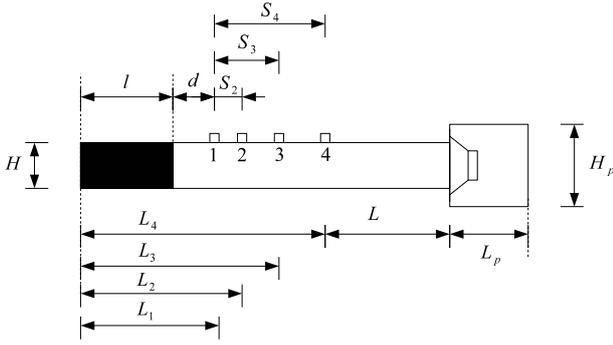


FIGURE 5 – Schéma du tube d'impédance

La bande de fréquence de fonctionnement du tube est limité dans la partie supérieure par la présence de modes transversaux. D'après [6], la limite supérieure F_u pour un tube de section carrée de côté H est :

$$F_u = \frac{c}{2H} \quad (31)$$

Nous choisirons de prendre $H = 0.16$ m. Cette valeur permettra de tester ultérieurement l'absorption de petits haut-parleurs de dimension hors tout de 0.15 m. La limite supérieure de fréquence avec $c = 340$ m/s est donc $F_u = 1062.5$ hz.

Le premier mode transversal a son maximum de pression sur les murs du tube et un nœud au centre du tube. Ainsi, si le microphone est placé au centre du tube, le premier mode n'a pas d'influence et la limite supérieure de fréquence est doublée (voir [13]). Cette limite supérieure devient donc $F_u = 2125$ hz.

Il y a d'autre part quelques contraintes sur l'espacement des microphones. Selon [6] la limite inférieure de fréquence est donnée par la relation :

$$F_l = \frac{c}{20S} \quad (32)$$

et la limite supérieure de fréquence est donnée par :

$$F'_u = \frac{0.45c}{S} \quad (33)$$

Nous utiliserons quatre microphones pour couvrir toute la bande de fréquence. Pour atteindre la fréquence $F_u = 2125$ hz, on espacera deux microphones de $S_2 = 0.07$ m. On obtient alors $F'_u = 2185$ hz soit une valeur très légèrement supérieure à F_u . Cet espacement donne une limite inférieure de 242 hz.

Avec un espacement des microphones de $S_4 = 0.5$ m la limite inférieure de fréquence est $L_l = 34$ hz et celle supérieure de $F'_u = 306$ hz.

Nous prendrons enfin un dernier couple espacé de $S_4 = 0.25$ ce qui donne une plage de mesure allant de 68 hz à 612 hz.

Les amplitudes de fréquences couvertes par les microphones sont finalement :

Microphones	F_l (hz)	F'_u (hz)
1 and 2	242	2185
1 and 3	68	612
1 and 4	34	306

Le tube doit être suffisamment long pour qu'une onde plane stable soit établie au niveau du microphone le plus proche du haut-parleur.

Comme toute source produit une onde sphérique, il est recommandé de placer le haut-parleur au moins à une distance égale à trois à cinq fois la largeur du tube. Nous avons pris $L = 6H$ arrondi à $L = 1$ m.

La distance d entre l'échantillon à mesurer et le microphone qui lui est au plus près doit être supérieure à deux fois la largeur du tube. Nous avons pris $d = 2.5H$ soit 0.4 m.

Le tube est dimensionné pour pouvoir mesurer des matériaux d'une épaisseur allant jusqu'à 50 cm, d'où la valeur $l = 0.5$ m.

La source sonore est un haut-parleur dont la bande passante doit être supérieure à celle du tube, c'est-à-dire comprise entre 30 hz à 2125 hz.

Nous avons choisi le haut-parleur Beyma 8WOOFER/P-V2 [16]. Les paramètres Thiele-Small de ce haut-parleur sont :

R_e (Ω)	f_s (hz)	Q_{es}	Q_{ms}	V_{as} (l)
5.8	35	0.62	2.7	59

Le haut-parleur est monté dans une enceinte close totalement remplie d'un matériau poreux absorbant. La valeur de Q_{tc} visée est 0.707, ce qui procure la réponse en fréquence la plus plate avant la fréquence de coupure.

Avec un volume du haut-parleur estimé à 1.4 l et un coefficient β de 1.2, la fréquence de coupure est de 55 hz et le volume net de l'enceinte de 39.4 l. Ce volume est obtenu avec une enceinte se section carrée de côté $H_p = 0.31$ m et une profondeur $L_p = 0.41$ m (voir la figure 5).

La figure 6 montre le haut-parleur dans son enceinte.

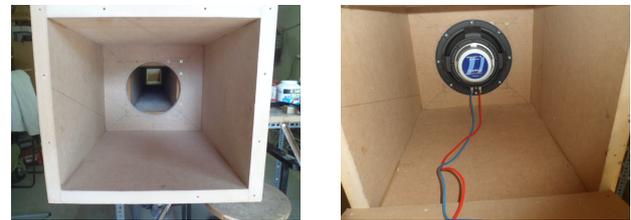


FIGURE 6 – Haut-parleur dans son enceinte

L'ensemble des paramètres qui définissent le tube de Kundt sont finalement :

H (m)	S_2 (m)	S_3 (m)	S_4 (m)
0.16	0.07	0.25	0.5
l (m)	L (m)	L_p (m)	H_p (m)
0.50	1.00	0.41	0.31

Dans la plupart des tubes d'impédance du commerce, l'échantillon est placé de telle manière que sa face avant soit toujours à la même distance du premier microphone. Pour cela un fond rigide coulissant vient plaquer l'échantillon.

La réalisation d'un fond rigide devant parfaitement s'ajuster dans le tube ayant été jugé difficile à réaliser, les échantillons à mesurer seront plaqués contre l'extrémité du tube de telle manière que c'est la face arrière du matériau qui est toujours à la même distance des microphones. Il conviendra donc lors du calcul de l'impédance caractéristique de saisir l'épaisseur du matériau afin de calculer les distances entre sa face avant et les microphones.

Il y a deux méthodes pour mesurer la fonction de transfert. Un multiple analyseur peut être utilisé avec l'ensemble des microphones et une source de bruit blanc. Dans ce cas, les microphones doivent être calibrés pour compenser leur réponse en fréquence différentes. Une attention particulière doit être portée sur la phase car le calcul de la fonction de transfert est très sensible aux erreurs de phases.

La méthode que nous utiliserons consiste à n'utiliser qu'un microphone qui est physiquement déplacé de la première position à la dernière. Cette méthode est plus lente que la première puisqu'il faut réaliser quatre mesures pour tester un échantillon. Cependant cette méthode à l'avantage de ne pas avoir à calibrer les microphones ni en amplitude ni en phase puisque le même microphone est utilisé.

8 Construction du tube

Le tube doit être massif et rigide. Les standards recommandent que son épaisseur soit supérieure à 5 pour cent de sa largeur. Pour faciliter sa réalisation, le tube est de section carrée et construit en bois MDF haute densité. L'épaisseur des parois est de 25 mm.

Lors de la construction, il faut s'assurer que le tube possède bien une section constante, particulièrement à l'emplacement des microphones et sur toute la longueur de l'échantillon.

Il ne doit pas y avoir la moindre fuite. Pour cela toutes les parois du tubes sont vissées et collées.

Le tube est entouré de sable sur toute la longueur pour amortir les vibrations. L'épaisseur du sable est de 5 cm et la doublure est réalisée en MDF haute densité de 15 mm.

Quatre tubes en aluminium de 50 mm de long sont placés dans la partie supérieure du tube aux emplacements des microphones préalablement définis. Ils effleurent la face interne de la paroi et leur diamètre intérieur est de 0.5 pouces.

Ce montage permet d'utiliser deux types de microphones :

- Des microphones de 1/2" qui seront positionnés préférentiellement de manière à effleurer le haut du

tube. Dans ce cas la fréquence maximale de mesure sera de 1062.5 hz.

- Des microphones de 1/4" montés sur une perche d'environ 15 cm et positionnés au centre du tube pour obtenir des mesures valides jusqu'à 2185 hz. Le tube de 1/4" sera emmanché dans le tube de 1/2" par l'intermédiaire d'une bague en caoutchouc pour amortir les vibrations.

Les tubes qui ne sont pas utilisés lors de la mesure sont obturés avec un bouchon en aluminium recouvert d'un matériau souple et légèrement emmanchés en force pour assurer l'étanchéité.

La partie supérieure du tube de Kundt qui reçoit l'échantillon est ouvert sur 500 mm pour permettre son introduction. Huit verrous à bascule maintiennent le couvercle. Une mousse de 5 mm d'épaisseur est utilisée pour supprimer toute fuite d'air (voir la photo 8).

La photo 7 montre une vue d'ensemble du tube lors de l'opération de sablage.



FIGURE 7 – Vue d'ensemble du tube

Le tube pèse environ 40 kg auquel a été ajouté 120 kg de sable. La photo 8 montre l'échantillon de laine Metisse en cours de test dans le tube.



FIGURE 8 – Test d'un échantillon

9 Réalisation des mesures

Les mesures ont été réalisées avec un microphone calibrée Dayton EMM-6 [17]. Ce microphone de 1/2" sera monté effleurant la paroi du tube limitant la fréquence supérieure de mesure à 1062.5 hz (voir section 7).

Le logiciel REW [1] est utilisé pour la mesure de la pression sonore. On programmera un sweep de 25hz à 1200 hz sur la durée maximum de 1 Mo. La fenêtre de calcul de la FFT doit être très large : de -100 ms à + 2s.

Il est impératif de réaliser la mesure en rebouclant la sortie de la carte son sur l'entrée non utilisée pour que les références de temps soient identiques pour chaque microphones.

Il est conseillé de réaliser les mesures à une température constante dont on saisira la valeur dans les scripts Scilab.

Lors des mesures successives, il faut veiller à replacer les microphones exactement de la même manière. On évitera par exemple de les faire tourner en repérant leur position angulaire.

On réglera le niveau sonore de sorte à disposer d'une dynamique minimum de 60 db. On cherchera d'autre part à ne pas trop forcer le volume pour minimiser les résonances propres du tube. Il est donc primordial de réaliser les mesures dans un environnement silencieux.

Bien que le placement des microphones permette de mesurer l'absorption jusqu'à 34 hz, les mesures présentées seront limité à 50 hz. En effet, il n'est guère possible de descendre plus bas en fréquence à cause de deux raisons :

- La première vient de la limitation de la source de bruit. La fréquence de coupure basse du système de haut-parleur utilisé s'est révélée être trop haute (55 hz).

- La deuxième est le niveau de bruit ambiant élevé dans la bande 30hz - 50hz qui se superpose à la mesure et qui rend pratiquement impossible une mesure précise en utilisant deux mesures séparées dans le temps. Il serait préférable en effet de réaliser des mesures simultanées des microphones. Cependant cette méthode nécessite des microphones dont les phases ont été calibrées ce qui complique nettement la chaîne de mesures.

10 Calibration du tube

La calibration du tube d'impédance consiste à calculer la position des centre acoustique des microphone L_1, L_2, L_3, L_4 et la constante d'atténuation A .

Pour cela, la mesure de la fonction de transfert H_{1i} est réalisée dans le cas d'une réflexion totale de l'onde incidente. Cette mesure est faite avec un tube sans échantillon. La fonction de transfert théorique dans ce cas se calcule à partir de l'équation (27) avec $R = 1$. On on obtient :

$$H_{1i} = \frac{\cos k' L_i}{\cos k' L_1} \quad (34)$$

Nous avons utilisé la méthode des moindres carrés pour calculer les paramètres de calibration. Ceux-ci sont calculés pour minimiser les résidus de l'amplitude (en dB) entre la fonction de transfert théorique et la fonction de transfert mesurée.

Le script Scilab <Calibrate.sce> réalise cette tâche. La calibration est réalisée dans un premier temps entre le microphone 1 et 2, puis entre le microphone 1 et 3 et enfin entre le microphone 1 et 4. Les fichiers de mesures sont <Calibrate_mic1.mdat> à <Calibrate_mic4.mdat>. Les plages de fréquences sur lesquelles portent l'ajustement dépendent du couple de microphones. Nous avons utilisé les plages suivantes :

Microphones	F_1 (hz)	F_2 (hz)
1 et 2	400	700
1 et 3	150	500
1 et 4	150	300

On obtient les résultats suivants :

Pour les microphones 1 et 2 :

L_1 (m)	L_2 (m)	A
0.9020237	0.9737583	0.1064050

Pour les microphones 1 et 3 :

L_1 (m)	L_3 (m)	A
0.9027928	1.1562481	0.0851792

Pour les microphones 1 et 4 :

L_1 (m)	L_4 (m)	A
0.9022807	1.408604	0.0765499

De ces valeurs, on déduit $S_2 = 0.0717$ m, $S_3 = 0.2535$ m et $S_4 = 0.5063$. On peut remarquer quelques écarts sur les valeurs de L_1 pour les différents couples de microphones : 0.77 mm entre le couple 1 - 2 et le

couple 1 - 3 et 0.26 mm entre le couple 1 - 2 et le couple 1 - 4.

La figure 9 trace les courbes superposées de l'amplitude et de la phase théoriques et mesurées ainsi que les résidus entre ces deux valeurs pour l'ajustement avec le couple de microphone 1 - 3. Bien que l'ajustement ne porte que sur l'amplitude des signaux, on constate que les écarts sur la phase sont également très faibles. Comme nous l'avons déjà fait remarqué, une mesure précise de la phase est obligatoire pour obtenir de bons résultats.

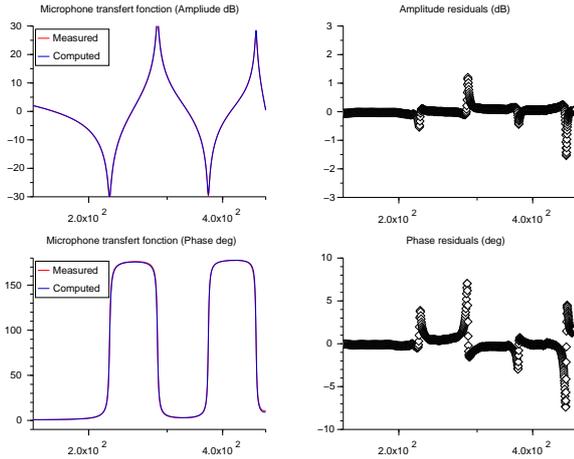


FIGURE 9 – Microphones couple 1 et 3 fonction de transfert

Pour vérifier le système de mesure, on peut mesurer la partie imaginaire de l'impédance d'un tube clos de longueur donnée choisie à 0.5 m. Cette impédance est donnée par la relation (4).

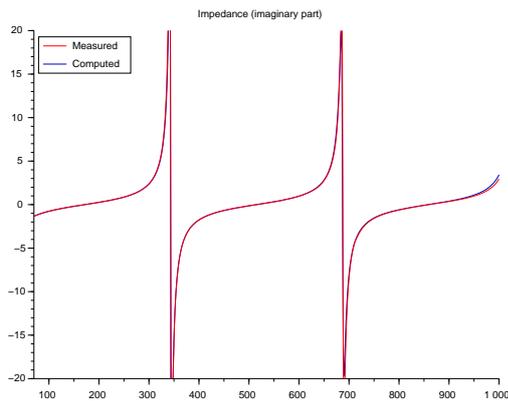


FIGURE 10 – Partie imaginaire de l'impédance d'une cavité

La figure 10 est obtenue avec le script Scilab <Test_impedance.sce> avec une mesure effec-

tuée avec le couple de microphone 1 et 2 en utilisant les fichiers <Calibrate_mic1.dat> et <Calibrate_mic2.dat>. Cette figure superpose les parties imaginaires de l'impédance théorique à celle mesurée. Les deux courbes se surimposent parfaitement.

On peut enfin calculer le coefficient d'absorption obtenu avec les quatre fichiers de calibrations. La valeur doit être nulle puisque aucun matériau n'est placé dans le tube. Le script <Absorption_measurement.sce> est utilisé à cette fin. On obtient le graphe de la figure 11.

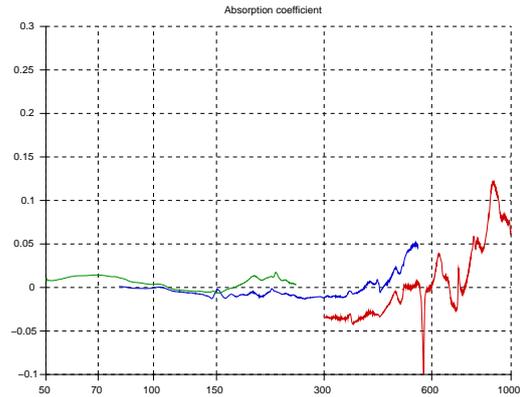


FIGURE 11 – Absorption d'une paroi rigide

On remarque que la valeur du coefficient d'absorption remonte dans les hautes fréquences. De même il y a un léger biais entre les mesures du couple de microphone 1 - 2 et 1 - 3. Cet écart provient du fait que les valeurs du coefficient d'atténuation varient en fonction de la fréquence comme le montre les trois valeurs identifiées.

Ce point signalé dans [14] provient du fait que le coefficient d'atténuation A employé selon l'équation (30) est sous évalué au fur et à mesure que la fréquence augmente.

Les matériaux que nous mesureront dans notre application ayant tous une forte absorption au-dessus de 600 hz, cette faible erreur n'est pas gênante. Le coefficient d'absorption pour le couple de microphone 1-2 sera légèrement augmenté pour assurer une continuité de mesure entre le couple 1-2 et 1-3. On prendra $A_{12} = 0.088$.

11 Mesures de différents matériaux poreux

La figure 12 montre les quatre matériaux testés. On trouve de gauche à droite, la laine de roche Rockwool Rockfaçade [21], la laine de coton Metisse m+ [18], la laine de verre Isover IBR [20] et la mousse de mélanine Basotect [19].



FIGURE 12 – Matériaux testés

Le script `<Absorption_measurement.sce>` est utilisé pour calculer et tracer le coefficient d'absorption à partir des mesures des quatre microphones. Ce script calcule également l'impédance spécifique de la surface du matériau et sauve ces valeurs dans un fichier.

Les matériaux sont découpés à la dimension intérieure du tube. Cette découpe doit être soignée et l'ajustement le plus précis possible. Il ne faut surtout pas que le matériau soit emmanché en force dans le tube. Cela conduirait pour des matériaux rigides (comme la mousse Basotect) à un effet membrane qui fausserait le résultat. Il est préférable que la taille du matériau soit très légèrement inférieure à celle du tube.

Les mesures portent sur des épaisseurs allant de 100 mm à 400 mm. Pour obtenir ces épaisseurs, on empile plusieurs épaisseurs de 50 mm à 100 mm selon les matériaux. Ce n'est que dans le cas de la laine de verre IBR que l'échantillon de départ fait 400 mm et que celui-ci après être mesuré est découpé deux fois en deux.

Il est évident que l'empilement de plusieurs couche n'est pas idéal, ces couches pouvant vibrer entre elles. Afin d'éviter ce désagrément, des agrafes ont été placées entre les couches de la mousse de mélanine, matériau relativement rigide. Elles sont visibles sur la figure 12.

11.1 Laine de coton Metisse m+

Les figures 13 et 14 montrent l'absorption de la laine Metisse pour des épaisseurs de 100 mm, 200 mm, 300 mm et 400 mm. Les courbes rouges représentent les valeurs mesurées dans le tube et les courbes bleues la simulation avec le modèle Delany-Bazley pour un coefficient de résistivité au passage de l'air de $7000 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ qui a été choisit pour s'approcher au plus près des mesures.

La figure 15 montre, à titre d'exemple, l'impédance spécifique de la laine d'épaisseur 100 mm avec en bleu la résistance et en rouge la réactance.

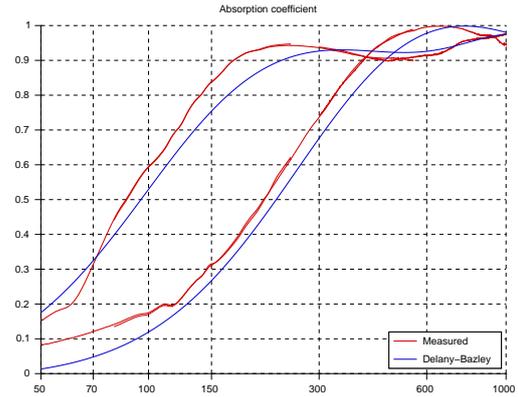


FIGURE 13 – Metisse 100 mm et 200 mm

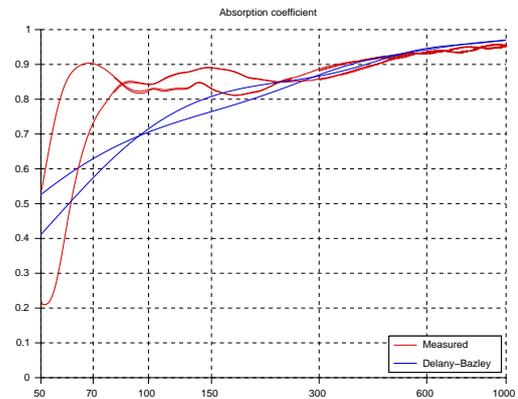


FIGURE 14 – Metisse 300 mm et 400 mm

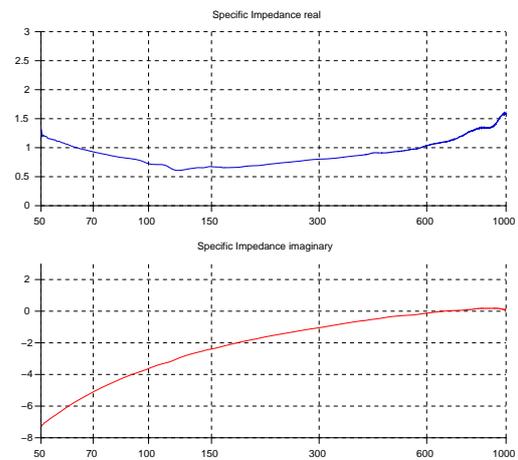


FIGURE 15 – Metisse impédance spécifique 100 mm

Le modèle théorique suit bien les mesures pour les

épaisseurs de 100 mm et 200 mm mais diverge dans la bande 50 hz - 200 hz pour les épaisseurs de 300 mm et 400 mm. A noter que la limite inférieure en fréquence du modèle Delany-Bazley pour une valeur $\sigma_m = 7000$ Pa.s/m² est de 60 hz.

La figure 16 trace le nombre d'onde de la laine Metisse. Les parties réelles sont en trait plein et les parties imaginaires en pointillés.

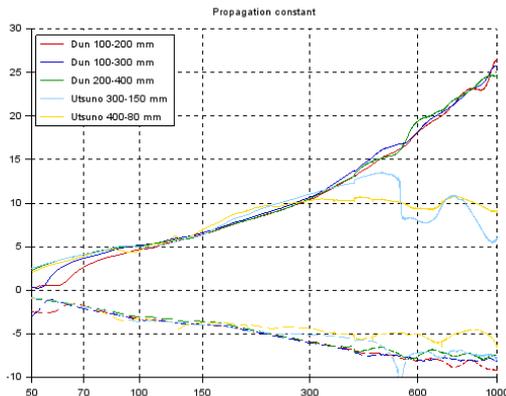


FIGURE 16 – Metisse nombre d'onde

La figure 17 trace l'impédance caractéristique de la laine Metisse avec le même code couleur que la figure précédente.

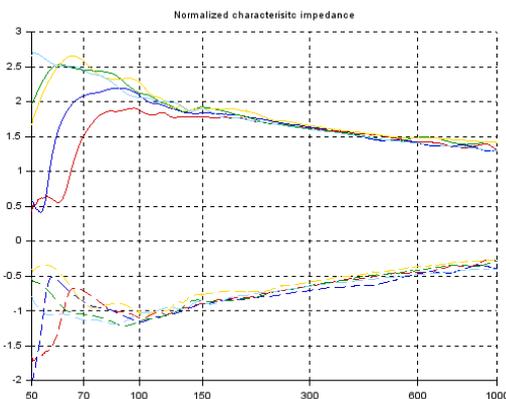


FIGURE 17 – Metisse impédance caractéristique

Ces courbes ont été calculées en utilisant les méthodes de Dunn, Davern et Larner, Davy.

La première méthode est utilisée avec des couples de laine d'épaisseurs 100 mm - 200 mm, 100 mm - 300 mm et 200 mm - 400 mm.

La deuxième méthode est utilisée avec une laine d'épaisseur 300 mm placé derrière une cavité de 150 mm et une laine d'épaisseur 400 mm placée derrière

une cavité de 80 mm. C'est donc au total six calculs différents des caractéristiques de la laine Metisse qu'il est possible de comparer.

Les courbes de l'impédance caractéristique font apparaître des écarts significatifs dans les basses fréquences entre les différentes mesures. Ce sont les mesures Dunn, Davern 200 mm - 400 mm et Larner, Davy qui sont les plus cohérentes dans le bas du spectre. En ce qui concerne le nombre d'onde, ce sont les deux mesures réalisées avec la méthode Larner, Davy qui divergent dans la partie supérieure du spectre. On considérera donc que c'est finalement la méthode Dunn, Davern 200 mm - 400 mm qui fournit globalement la meilleure estimation des caractéristiques de cette laine.

On peut alors comparer la mesure de l'absorption de la laine d'épaisseur 300 mm avec celle calculée à partir de l'impédance caractéristique. On obtient le graphique suivant :

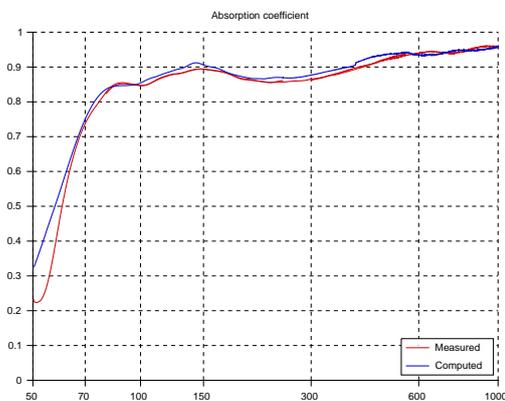


FIGURE 18 – Metisse 300 mm

On obtient une bonne prédiction avec une légère différence dans la bande 50 hz - 60 hz.

La figure 19 trace le coefficient d'absorption pour différentes configuration avec : une laine d'épaisseur 400 mm, une laine d'épaisseur 400 mm placé devant un plénum d'air de 200 mm d'épaisseur, une laine d'épaisseur 400 mm placée devant un plénum de 400 mm et enfin une laine d'épaisseur 800 mm. Ces trois dernière courbes sont calculées avec le script <Multi-layers_simulation.sce> et l'impédance caractéristique précédemment choisie.

On remarque que ces quatre configurations donnent la même absorption pour les fréquences supérieures à 150 hz et diffèrent dans la bande 50 hz - 150 hz. Si l'on cherche à calculer la fréquence de coupure telle que l'absorption soit de 0.6 (voir section 12), on trouve la valeur de 51 hz pour l'épaisseur 400 mm.

La limitation en fréquence du tube ne permet pas de calculer cette valeur pour les autres épaisseurs mais on peut déduire de l'allure des courbes que la fréquence la plus basse est, comme on devait s'y attendre, ob-

tenue avec la laine de 800 mm et est probablement autour de 30 hz.

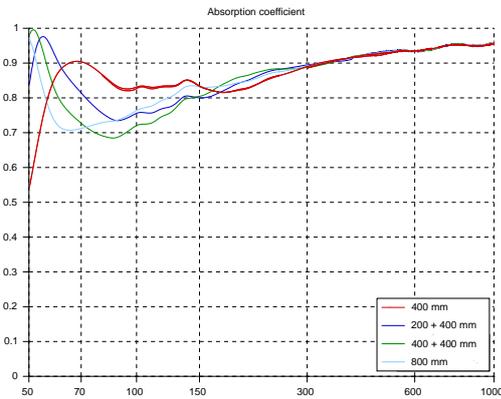


FIGURE 19 – Metisse 400 mm 600 mm et 800 mm

11.2 Laine de verre Isover IBR

Cette section concerne la laine de verre Isover IBR que l'on trouve en épaisseur 400 mm. Cette laine est très intéressante en regard de son faible prix. Cette laine est classée AFR4, soit un coefficient de résistivité au passage de l'air de $4000 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$. Les figures 20 et 21 montrent l'absorption de cette laine pour des épaisseurs de 100 mm, 200 mm, 300 mm et 400 mm.

Les figures 22 et 23 tracent le nombre d'onde et l'impédance caractéristique de la laine IBR. Les parties réelles sont en trait plein et les parties imaginaires en pointillés.

Ces courbes ont été calculées en utilisant seulement la méthode de Dunn, Davern avec des couples de laine d'épaisseurs 100 mm - 200 mm, 100 mm - 300 mm et 200 mm - 400 mm.

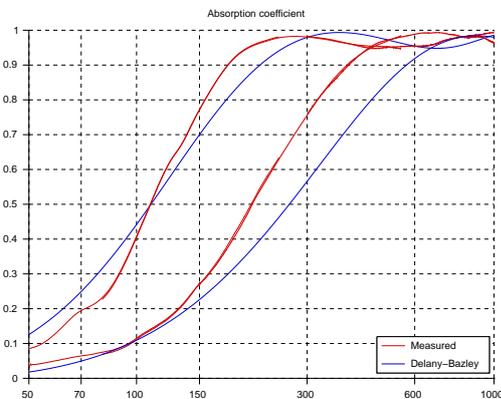


FIGURE 20 – IBR 100 mm et 200 mm

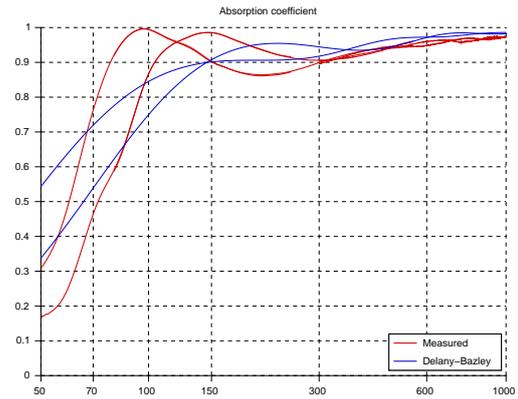


FIGURE 21 – IBR 300 mm et 400 mm

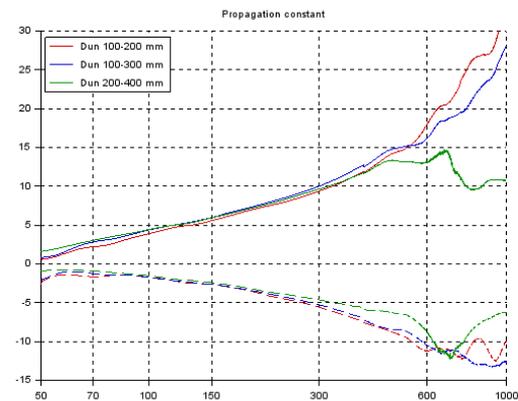


FIGURE 22 – IBR nombre d'onde

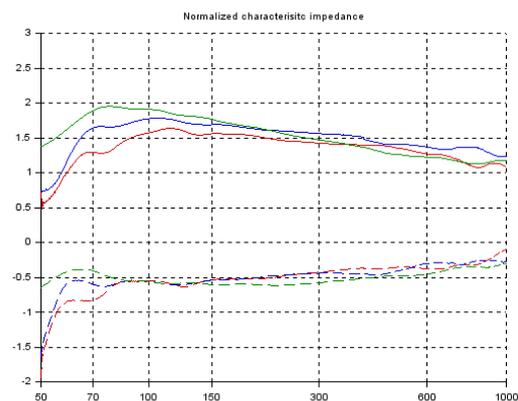


FIGURE 23 – IBR impédance caractéristique

Les courbes de l'impédance caractéristique sont

apparaître quelques écarts dans les basses fréquences et un écart plus significatif dans la partie haute du spectre concernant le nombre d'onde pour l'identification avec le couple 200 mm - 400 mm.

On compare, comme pour la laine Metisse, la mesure de l'absorption de la laine d'épaisseur 300 mm avec celle calculée à partir de l'impédance caractéristique obtenue avec le couple 200 mm - 400 mm. On obtient le graphique suivant :

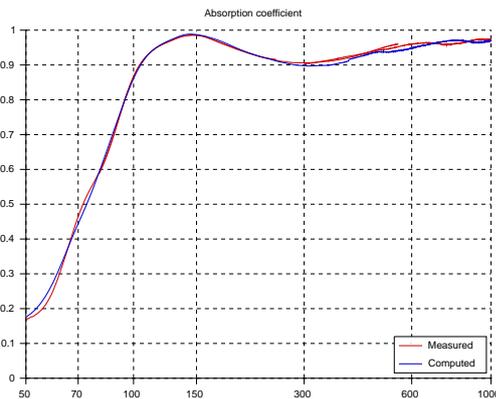


FIGURE 24 – IBR 300 mm

Les écarts sont très faibles.

On trace enfin, comme pour la laine Métisse, le coefficient d'absorption pour différentes configurations avec : une laine d'épaisseur 400 mm, une laine d'épaisseur 400 mm placé devant un plénum d'air de 200 mm d'épaisseur, une laine d'épaisseur 400 mm placée devant un plénum de 400 mm et enfin une laine d'épaisseur 800 mm. On obtient ces courbes dans la figure 25.

On remarque que les fréquences de coupures toujours calculées pour $\alpha = 0.6$ sont plus élevées que dans le cas de la laine Metisse. On obtient le tableau suivant :

Configuration	f_c (hz)
400 mm	64 hz
200 + 400 mm	53 hz
400 + 400 mm	45 hz
800 mm	40 hz

Les deux dernière valeurs sont estimées à partir de la progression de la pente du coefficient.

Cette laine est donc très légèrement moins performante si on en croit ces mesures que la laine Metisse m+.

Elle reste cependant très intéressante en regard de son faible prix.

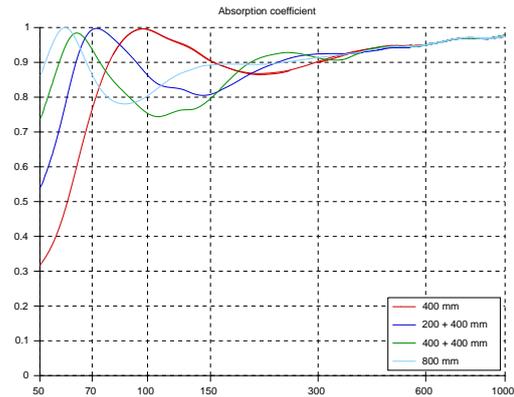


FIGURE 25 – IBR 400 mm 600 mm et 800 mm

11.3 Mousse de mélanine Basotect

La figure 26 montrent l'absorption de la mousse Basotect pour des épaisseurs de 100 mm, 200 mm et 300 mm. Les courbes rouges représentent les valeurs mesurées dans le tube et les courbes bleues la simulation avec le modèle Delany-Bazley pour un coefficient de résistivité au passage de l'air de $9820 \text{ Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.

Les figures 27 et 28 tracent le nombre d'onde et l'impédance caractéristique de la mousse Basotect identifiées avec les méthodes de Dunn, Davern et Larner, Davy.

On constate des écarts importants entre les différentes identifications particulièrement dans les basses fréquences ne permettant pas de calculer des prédictions pour des épaisseurs plus importantes.

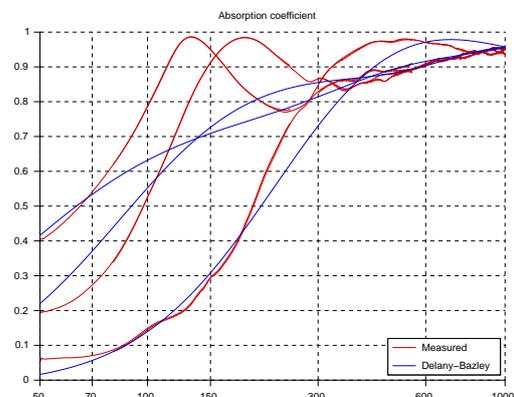


FIGURE 26 – Basotect 100 mm, 200 mm et 300 mm

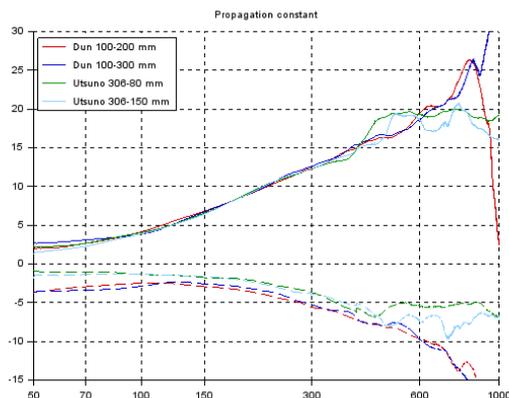


FIGURE 27 – Basotect nombre d’onde

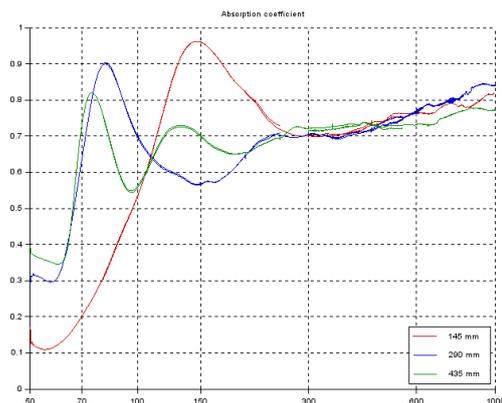


FIGURE 29 – Rockfaçade 145 mm, 290 mm et 435 mm

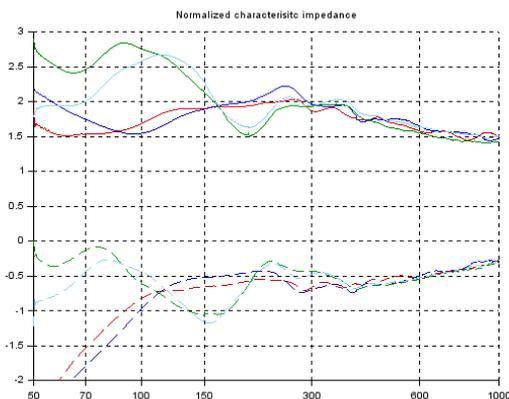


FIGURE 28 – Basotect impédance caractéristique

11.4 Laine de roche Rockwool Rockfaçade

Il existe plusieurs laines de roches utilisées en tant que matériaux d’absorption acoustique. Nous avons choisi une laine aisément disponible chez les fournisseurs de matériaux courant : la laine Rockwool Rockfaçade. Celles qu’on trouve sont le plus souvent utilisées pour l’isolation thermique. Nous avons simplement mesuré l’absorption de cette laine sans chercher à identifier ses caractéristiques. Cette laine de roche est disponible en 70 mm d’épaisseur ce qui nous a permis de mesurer l’absorption de panneaux de 145 mm, 290 mm et 435 mm.

Les résultats sont représentés dans le graphe de la figure 29. L’absorption est plutôt plus faible que les précédentes laine mesurées.

12 Quelle valeur d’absorption choisir ?

L’absorption acoustique d’une salle d’écoute a principalement trois objectifs :

- obtenir un temps de réverbération donné dépendant du choix de l’auditeur ;
- supprimer les premières réflexions dont on sait qu’elles sont néfastes car elle empêchent, notamment, une spatialisation correcte de l’image sonore ;
- amortir les modes basses fréquences de la pièce.

L’atténuation d’une onde sonore réfléchi par une paroi se déduit simplement du coefficient d’absorption de cette paroi. Elle s’écrit :

$$X_{dB} = 10 \log(1 - \alpha) \quad (35)$$

Si l’on désire que l’énergie de l’onde réfléchi soit de 20 dB inférieure à l’onde incidente (norme utilisée dans les chambre anéchoïde pour définir leur fréquence de coupure), on en déduit un coefficient d’absorption $\alpha = 0.99$. Si l’on se contente de -10 dB, on obtient $\alpha = 0.9$.

Ainsi pour supprimer les premières réflexions, il conviendra d’utiliser un matériau absorbant au coefficient α le plus élevé possible et jamais inférieur à 0.9.

Pour amortir les modes basses fréquence de la pièce il n’est par contre pas nécessaire d’utiliser un matériau ayant un coefficient d’absorption aussi élevé.

Considérons les modes axiaux d’une pièce de dimension L dont seul un des deux murs dans cet axe est absorbant. Notons α le coefficient d’absorption de ce mur. Considérons une onde sonore qui se propage suivant cette longueur. Le temps nécessaire à cette onde pour effectuer un aller-retour est $T_d = 2L/c$.

Tous les aller-retour, soit toutes les T_d secondes, l’onde sonore perd une énergie $1 - \alpha$. Au bout de n

aller-retour, donc pendant un temps $T_r = nT_d$, l'onde sonore a perdu une énergie $(1 - \alpha)^n$, ce qui correspond à une atténuation de :

$$X_{dB} = 10n \log(1 - \alpha) \quad (36)$$

Cette atténuation s'écrit en fonction de T_r :

$$X_{dB} = \frac{5T_r c}{L} \log(1 - \alpha) \quad (37)$$

On en déduit le coefficient α :

$$\alpha = 1 - 10^{-\frac{X_{dB} L}{5T_r c}} \quad (38)$$

Pour comparer ce temps T_r à un temps de réverbération, on va se fixer une atténuation de -60 dB. On obtient alors :

$$\alpha_1 = 1 - 10^{-\frac{L}{T_r c}} \quad (39)$$

Si l'on dote les deux murs du même absorbant le calcul devient :

$$\alpha_2 = 1 - 10^{-\frac{L}{T_r c}} \quad (40)$$

On peut alors calculer pour une longueur L donnée d'une salle d'écoute les trois premiers modes axiaux (F_1 , F_2 et F_3) et les coefficient d'absorption α_1 et α_2 .

On obtient le tableau suivant calculé avec le tableur Excel [22] :

L (m)	F_1 (hz)	F_2 (hz)	F_3 (hz)	α_1	α_2
3	57	113	227	0.46	0.26
4	43	85	170	0.56	0.33
5	34	68	136	0.64	0.40
6	28	57	113	0.70	0.46
7	24	49	97	0.76	0.51
8	21	43	85	0.80	0.56
9	19	38	76	0.84	0.60
10	17	34	68	0.87	0.64

On peut prendre deux exemples d'application. Pour une longueur de 9 m, en dotant les deux murs d'un même absorbant, on absorbe le mode F_2 si le coefficient d'absorption est supérieur ou égal à 0.6. Cette valeur est obtenue avec une laine Matisse de 800 mm d'épaisseur.

Pour une longueur de 5 m, en dotant un seul mur d'un absorbant IBR 400 mm, on absorbe également le mode F_2 correspondant (le coefficient d'absorption doit être supérieur ou égal à 0.64).

Il ne s'agit évidemment pas de remplir tous les murs d'absorbant de telles épaisseurs ce qui conduirait à une pièce trop sourde. On voit cependant l'intérêt d'utiliser des absorbants de forte épaisseur, là où habituellement on se limite à des épaisseurs beaucoup plus faibles.

Conclusions

Ce papier décrit la conception et la réalisation d'une tube d'impédance pour la mesure des coefficients d'absorption en basse fréquence.

Les mesures des différentes laines montrent qu'une épaisseur de 400 mm permet d'amortir des modes inférieur à 100 hz et que 800 mm permet de descendre plus bas que 50 hz. Un simple calcul donne les valeurs d'absorption requises en fonction des dimensions de la salle d'écoute.

Les courbes d'identifications des impédance caractéristiques montre la difficulté d'identifier les matériau poreux pour les très basses fréquences.

Des modifications pourraient être apportés pour améliorer la qualité des mesures dans cette bande :

- changer le haut-parleur qui excite le tube pour un système ayant une fréquence de coupure plus basse, en visant par exemple 30 hz.
- isoler le tube du sol pour éviter les transmissions ambiante. On pourrait poser le tube sur système masse - ressort de très basse fréquence de résonance (quelques hz).
- utiliser des microphones plus performant de taille 1/4" permettant d'atteindre la limite théorique supérieure de 2185 hz.
- utiliser des microphones calibrés en amplitude et en phase ce qui permettrait avec quatre microphones de la sorte, la mesure sur tout le spectre en une seule passe.

Références

- [1] Room Acoustics Software REW, <http://www.roomeqwizard.com/>
- [2] Scilab : open source software for numerical computation, <http://www.scilab.org/en>
- [3] Licence Française de logiciel libre : <http://www.cecill.info>
- [4] Téléchargement des scripts Scilab de ce projet : http://www.volucres.fr/AudioHighEnd/resources/ImpedanceTube/Code_Scilab.rar
- [5] Téléchargement des fichiers de mesures et des scripts Scilab de ce projet : <http://www.volucres.fr/AudioHighEnd/resources/ImpedanceTube/Mesures.rar>
- [6] Trevor J. Fox, Peter D'Antonio : Absorbers and Diffusers.
- [7] M.E. Delanay et N. Bazley : Acoustical properties of fibrous absorbant materials, Applied acoustic April 1970
- [8] Yashushi Miki : Acoustical properties of porous materials - Modification of Delany-Bazley models, Journal of the Acoustical Society of Japan 1990

- [9] Takeshi Komatsu, Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials, Journal of the Acoustical Society of Japan 2008
- [10] Hideo Utsuno, Toshimitsu Tanaka, Takeshi Fujikawa, A.F Sybert : Transfert function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials, The Journal of the Acoustical Society of America 86
- [11] Dunn IP, Davern WA. Calculation of acoustic impedance of multi layer absorbers. Applied Acoustics. 1986
- [12] David James Larner, John Laurence Davy : The prediction of the complex characteristic acoustic impedance of porous materials, Inter noise 2015, Australia
- [13] Walter Schneider, Michael Leistner, Frank Zickmantel, R. Tippkemper : Large Scale Impedance Tube, CFA/DAGA Strasbourg
- [14] J. Han, D.W Herrin, A.F Sybert : Accurate Measurement of Small Absorption Coefficients, SAE International
- [15] Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System, ASTM E1050
- [16] Beyma woofer : reference 8WOOFER/P-V2, <https://www.beyma.com/getpdf.php?pid=8WOOFER/P%20V2>
- [17] Microphone Dayton EMM-6 : <https://www.daytonaudio.com/product/911/emm-6-electret-measurement-microphone>
- [18] Laine de coton Metisse m+ : <http://www.isolantmetisse.com/>
- [19] Mousse de mélanine Basotect : <http://www.postacoustics.nl/wp-content/uploads/2014/05/Acoustic-properties-Basotect-G1.pdf/>
- [20] Laine de verre Isover IBR en 400mm : <https://www.isover.fr/products-star/pour-les-combles-perdus-en-maison-neuve-ibr>
- [21] Laine de roche Rockwool Rockfaçade : https://cdn01.rockwool.fr/siteassets/rw-f/telechargements/fiches-produit/rockwool_fp_rockfacade_201902.pdf?f=20190228113133
- [22] Lien vers le tableur Excel de calcul des absorptions : http://www.volucres.fr/AudioHighEnd/resources/ImpedanceTube/Absorption_modes.xls