



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI

-----

Ecole Doctorale des Sciences De l'Ingénieur (ED-SDI)

-----

Master Recherche en Efficacité Energétique et Energies Renouvelables

-----

## Rapport de Stage

### Thème :

**Etude des performances d'un dispositif de tube de Kundt pour la mesure du coefficient d'absorption et de l'impédance acoustiques des matériaux locaux de construction au Benin**

Présenté par :

**KIKI Gratien Jesugo Dieudonné**

Encadré par :

**Dr. AGBOMAHAMAN Macaire**

Maître Assistant des Universités CAMES  
Enseignant Chercheur à l'EPAC/UAC

Sous la direction de :

**Prof. HOUNGAN Comlan Aristide**

Maître de Conférences des Universités CAMES  
Enseignant Chercheur à l'ENSET/UNSTIM  
Directeur de l'ENSET- Lokossa.

Année académique : 2016 – 2017

DEDICACES

- œ *A mon cher père Donatien KIKI.*
- œ *A ma tendre mère Agnès KINTOYETON.*

## REMERCIEMENTS

*Qu'il nous soit permis avant toute chose, d'exprimer notre reconnaissance envers toutes les personnes qui de près ou de loin nous ont soutenu dans nos efforts et ont contribué ainsi à la réalisation de ce mémoire. Nous tenons à remercier particulièrement :*

- + Professeur Titulaire Antoine VIANOU, Directeur de l'Ecole Doctorale des Sciences De l'Ingénieur de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (ED-SDI/EPAC) ;*
- + Professeur GBAGUIDI Victor, Maître de Conférences, Directeur Adjoint de l'Ecole Doctorale des Sciences De l'Ingénieur de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (ED-SDI/EPAC) ;*
- + Professeur Titulaire Mohamed SOUMANOU, Directeur de l'EPAC ;*
- + Professeur Clément AHOUANNOU, Maître de Conférences, Directeur Adjoint de l'EPAC, Coordonnateur du Master de Recherche Efficacité Energétique et Energies Renouvelables ;*
- + Professeur Aristide HOUNGAN, Maître de Conférences, Directeur de l'Ecole Normale des Sciences de l'Enseignement Technique, Coordonnateur Adjoint du Master de Recherche Efficacité Energétique et Energies Renouvelables ; notre Maître mémoire qui nous a fait l'honneur de diriger nos travaux. Infiniment merci pour votre indéfectible soutien, vos précieux conseils, votre disponibilité et votre grande humilité ; que DIEU vous bénisse ;*
- + Professeur Latif FAGBEMI, Maître de Conférences, Chef Département Génie Biomédical ; merci pour vos conseils et votre soutien ;*
- + Docteur Macaire AGBOMAHENA, Maître Assistant des Universités CAMES, encadreur de notre mémoire ; merci pour tous les efforts consentis, vos conseils et vos diverses contributions à la qualité de ce document ;*
- + Docteur Toussaint KOSSOU, Enseignant à l'EPAC ; merci pour vos sages conseils et votre soutien ;*
- + Tout le corps enseignant de l'Ecole Doctorale des Sciences De l'Ingénieur, auteur de notre formation ;*

## REMERCIEMENTS

- ✚ *Monsieur Sylvain DJIKOU, doctorant à l'ED-SDI pour sa disponibilité et son grand soutien ;*
- ✚ *mes sœurs, Françoise, Hortense, Estelle et Yolande en témoignage de ma reconnaissance ineffable pour l'amour, la générosité et la marque d'affection qu'elles ont entretenues à mon endroit ;*
- ✚ *tous mes amis, en particulier Karol EKOUEDJEN, Jeniffer KINTONOU, Daniel HOUNTONDJI.*

**TABLE DES MATIERES**

DEDICACES .....	i
REMERCIEMENTS .....	ii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS .....	vi
NOMENCLATURE ET DESIGNATION DES PARAMETRES .....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES .....	x
RESUME .....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1.1. Principaux phénomènes physiques et formulations de base associées .....	3
1.1.1. Définitions .....	3
1.1.2. Les types d’ondes sonores .....	5
1.1.3. Les types de champs sonores.....	6
1.2. Notion de pression, puissance et intensité acoustique .....	7
1.2.1. Pression acoustique.....	7
1.2.2. Puissance acoustique .....	8
1.2.3. Intensité acoustique .....	9
1.3. Les principaux phénomènes acoustiques .....	9
1.3.1. Réflexion des ondes sonores .....	9
1.3.2. Absorption des ondes sonores .....	10
1.3.3. Transmission des ondes sonores.....	10
1.3.4. Diffraction des ondes sonores .....	11
1.3.5. Echo et réverbération.....	11
1.4. Le confort acoustique .....	11
1.4.1. Isolation et correction acoustique .....	11
1.4.2. Coefficient de réflexion et d’absorption d’un matériau .....	13
1.4.3. Lien entre porosité, perméabilité et comportement acoustique.....	14
1.4.4. Impédance acoustique d’un matériau .....	15
1.5. Méthodes de mesure du coefficient d’absorption d’un matériau.....	16
1.5.1. Salle réverbérante .....	17

1.5.2. Tube à impédance .....	18
1.5.3. Choix d'une méthode de mesure .....	19
CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODE .....	21
2.1. Matériels .....	21
2.1.1. Description technique.....	21
2.1.2. Principe du tube de Kundt.....	21
2.2. Méthodes .....	22
2.2.1. Méthode du doublet microphonique .....	22
2.2.2. Méthode du microphone unique .....	24
2.2.3. Détermination du coefficient de réflexion, du coefficient d'absorption et de l'impédance acoustique par la méthode du microphone unique. ....	25
2.3. Réalisation du tube de Kundt .....	27
2.3.1. Conception du tube de Kundt.....	27
2.3.1.1. Schéma du tube de Kundt .....	27
2.3.1.2. Choix des matériaux des composants du tube de Kundt.....	28
2.3.1.3. Dimensionnement du tube de Kundt.....	28
2.3.2. Réalisation du tube de Kundt .....	29
2.3.3. Choix des matériaux tests.....	31
Chapitre 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	33
3.1. Validation des mesures du coefficient d'absorption des échantillons.....	33
3.1.1. Protocole de mesure .....	33
3.1.2. Mesure des coefficients d'absorption .....	33
3.1.3. Résultat de la répétabilité des mesures .....	37
3.1.4. Calcul des incertitudes de mesure .....	40
3.1.5. Analyse des coefficients d'absorption mesurés .....	41
3.2. Calcul de l'impédance acoustique des matériaux tests .....	47
CONCLUSION GENERALE.....	49
BIBLIOGRAPHIE .....	50
WEBOGRAPHIE .....	51
ANNEXES .....	52
ANNEXE 1 : METHODES DE CARACTERISATION ACOUSTIQUE DES MATERIAUX .....	53
ANNEXE 2 : VALEURS DES COEFFICIENTS D'ABSORPTION DE QUELQUES MATERIAUX .....	58

**LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS**

CAMES	Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur.
UAC	Université d'Abomey-Calavi.
ED-SDI	Ecole Doctorale Sciences De l'Ingénieur.
EPAC	Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi.
UNSTIM	Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques.
ENSET	Ecole Normale des Sciences de l'Enseignement Technique.
Lab-CTMAE	Laboratoire de Caractérisation Thermo-physique des Matériaux et d'Appropriation Energétique.
GBF	Générateur de Basses Fréquences.

**NOMENCLATURE ET DESIGNATION DES PARAMETRES**

<b>Paramètres</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$T_0$	Température de référence	$^{\circ}C$
$P_{atm}$	Pression atmosphérique	$Pa$
$P_{max}$	Pression maximale	$Pa$
$P$	Pression	$Pa$
$\eta$	Viscosité dynamique du fluide	$Pa.s$
$\rho_a$	Masse volumique de l'air	$kg.m^{-3}$
$\omega$	Pulsation	$rad.s^{-1}$
$f$	Fréquence	$Hz$
$\lambda$	Longueur d'onde	$m$
$d_{SR}$	Distance séparant la source du récepteur	$m$
$L$	Longueur du tube de Kundt	$m$
$S$	Surface du matériau	$m^2$
$\Pi$	Perméabilité d'un matériau	$m^2$
$A_v$	Air d'absorption équivalente de la salle réverbérante vide	$m^2$
$V$	Volume de la salle réverbérante	$m^3$
$c$	Célérité du son	$m.s^{-1}$
$u$	Vitesse particulaire	$m.s^{-1}$
$W$	Puissance acoustique	$W$
$W_0$	Puissance sonore de la source de référence	$W$
$I$	Intensité acoustique	$W.m^{-2}$
$I_0$	Intensité acoustique de référence	$W.m^{-2}$
$L_p$	Niveau de pression	$dB$
$L_W$	Niveau de puissance acoustique	$dB$
$L_I$	Niveau d'intensité acoustique	$dB$
$\tau$	Temps mis par un son direct pour atteindre un récepteur	$s$
$T_R$	Temps de réverbération	$s$
$E_i$	Energie incidente	$J$
$E_r$	Energie réfléchie	$J$

## NOMENCLATURE ET DESIGNATION DES PARAMETRES

$E_t$	Energie transmise	$J$
$E_a$	Energie absorbé par le matériau	$J$
$Z_{ac}$	Impédance acoustique	$Rays$
$k$	Nombre d'onde	-
$R$	Coefficient de réflexion du matériau	-
$\alpha$	Coefficient d'absorption acoustique du matériau	-
$\Phi$	Porosité d'un matériau	-
$\sigma$	Résistance au passage de l'air	-

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1. 1</b> : définition normalisée des octaves et tiers d'octaves [5].....	4
<b>Tableau 2. 1</b> : choix des composants du tube de Kundt à réaliser.....	28
<b>Tableau 3. 1</b> : coefficient d'absorption du tube vide .....	33
<b>Tableau 3. 2</b> : coefficient d'absorption de la laine de verre (50 mm) .....	34
<b>Tableau 3. 3</b> : coefficient d'absorption de la laine de verre (25 mm) .....	34
<b>Tableau 3. 4</b> : coefficient d'absorption du polystyrène expansé (40 mm) .....	34
<b>Tableau 3. 5</b> : coefficient d'absorption du bois vernis (35 mm) .....	35
<b>Tableau 3. 6</b> : coefficient d'absorption de la laine de verre (50 mm) .....	35
<b>Tableau 3. 7</b> : coefficient d'absorption de la laine de verre (25 mm) .....	35
<b>Tableau 3. 8</b> : coefficient d'absorption du polystyrène expansé (40 mm) .....	35
<b>Tableau 3. 9</b> : coefficient d'absorption du bois vernis (35 mm) .....	36
<b>Tableau 3. 10</b> : coefficient d'absorption de la laine de verre (50 mm) .....	36
<b>Tableau 3. 11</b> : coefficient d'absorption de la laine de verre (25 mm) .....	36
<b>Tableau 3. 12</b> : coefficient d'absorption du polystyrène expansé (40 mm) .....	36
<b>Tableau 3. 13</b> : coefficient d'absorption du bois vernis (35 mm) .....	37

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1. 1</b> : bruits aériens et bruits solidiens [4] .....	5
<b>Figure 1. 2</b> : ondes sphériques [7].....	6
<b>Figure 1. 3</b> : Réflexion des ondes sur une paroi [7].....	10
<b>Figure 1. 4</b> : Comportement d'une onde en incidence oblique à la surface d'un matériau [8].....	12
<b>Figure 1. 5</b> : Mesure de l'absorption sous champ acoustique diffus dans la chambre réverbérante du laboratoire ICAR (ÉTS/IRSST).....	18
<b>Figure 1. 6</b> : tube de Kundt [22].....	19
<b>Figure 2. 1</b> : principe de fonctionnement du tube de Kundt à doublet microphonique [23] .....	22
<b>Figure 2. 2</b> : tube de Kundt à microphone unique [15].....	24
<b>Figure 2. 3</b> : comportement des ondes planes [23] .....	25
<b>Figure 2. 4</b> : schéma du tube de Kundt réalisé.....	27
<b>Figure 2. 5</b> : tube de Kundt réalisé.....	30
<b>Figure 3. 1</b> : courbe de répétabilité obtenue avec la laine de verre (50 mm) .....	38
<b>Figure 3. 2</b> : courbe de répétabilité obtenue avec la laine de verre (25 mm) .....	38
<b>Figure 3. 3</b> : courbe de répétabilité obtenue avec le polystyrène expansé (40 mm)...	39
<b>Figure 3. 4</b> : courbe de répétabilité obtenue avec le bois vernis (35 mm).....	39
<b>Figure 3. 5</b> : courbe de validation de la laine de verre (50 mm).....	42
<b>Figure 3. 6</b> : courbe de validation de la laine de verre (25 mm).....	43
<b>Figure 3. 7</b> : courbe de validation du polystyrène expansé (40 mm).....	44
<b>Figure 3. 8</b> : courbe de validation du bois vernis (35 mm).....	45
<b>Figure 3. 9</b> : classification des matériaux testés .....	46

**RESUME**

Connaître les propriétés acoustiques des matériaux locaux (coefficient d'absorption et impédance acoustiques) utilisés dans la construction des bâtiments au Bénin est d'un enjeu capital pour le confort acoustique des occupants. Ces propriétés ne sont cependant pas disponibles pour chaque matériau et elles peuvent varier de manière significative en fonction de la consistance des matériaux, de la densité et de la forme générale. L'une des propriétés acoustiques les plus importantes et souvent utilisées pour un matériau est le coefficient d'absorption qui est une mesure de l'énergie sonore qu'un matériau peut absorber à partir d'une onde sonore incidente. Pour la mesure de ce paramètre, l'utilisation du tube de Kundt est souvent préférée. Ainsi, nous avons réalisé un tube de Kundt à microphone unique pour la caractérisation des matériaux locaux et dont la validation a été effectuée grâce à trois matériaux que sont : la laine de verre, le polystyrène expansé et le bois vernis. Les mesures ont été effectuées avec les échantillons suivant la bande d'octave sur une plage de fréquence allant de 250 Hz à 2000 Hz et les valeurs obtenues ont été comparées à celles de la littérature. Ceci nous a permis de nous assurer de la bonne performance du tube, de la répétabilité et de la fiabilité des mesures effectuées.

**Mots clés :** confort acoustique ; tube de Kundt ; coefficient d'absorption acoustique, impédance acoustique ; matériau.

**ABSTRACT**

Knowing the acoustic properties of local materials (absorption coefficient and acoustic impedance) used in the construction of buildings in Benin is of crucial importance for the acoustic comfort of the occupants. However, these properties are not available for each material and can vary significantly depending on material consistency, density and overall shape. One of the most important and often used acoustic properties of a material is the absorption coefficient, which is a measure of the sound energy that a material can absorb from an incident sound wave. For the measurement of this parameter, the use of the Kundt tube is often preferred. Thus, we realized a single microphone Kundt tube for the characterization of local materials and whose validation was carried out thanks to three materials that are: glass wool, expanded polystyrene and varnished wood. The measurements were made with the samples in the octave band over a frequency range of 250 Hz to 2000 Hz and the values obtained were compared with those in the literature. This allowed us to make sure of the good performance of the tube, the repeatability and the reliability of the measurements made.

**Key words:** acoustic comfort; Kundt tube; sound absorption coefficient, acoustic impedance; material.

## INTRODUCTION GENERALE

La perception du son est d'une importance majeure dans la vie quotidienne. Communiquer à travers la parole, écouter de la musique, chanter, sont des exemples qui montrent combien les sons sont essentiels à notre bien-être. Le bruit par contre peut avoir de sérieuses incidences sur la qualité de vie des personnes directement concernées. D'après l'OMS, le bruit est défini comme un phénomène acoustique produisant une sensation auditive jugée désagréable ou gênante. C'est également un phénomène physique d'origine mécanique consistant en une variation de pression (très faible), de vitesse vibratoire ou de densité de fluide, qui se propage en modifiant progressivement l'état de chaque élément du milieu considéré, donnant ainsi naissance à une onde acoustique [1]. Il peut être considéré comme un agent de stress environnemental qui peut avoir un impact négatif sur la vie quotidienne, aussi bien au travail qu'à domicile. Les impacts sanitaires du bruit sont à la fois auditifs comme la surdité ou les acouphènes, et extra auditifs, tels que les troubles du sommeil, l'hypertension, les risques cardio-vasculaires ou la dégradation de la santé mentale. Les exigences des populations se sont donc renforcées et le bruit est globalement moins bien toléré. Face à de tels risques, ne pouvant éliminer les sources de bruit, la prise en compte du confort acoustique au sein des bâtiments s'avère indispensable pour le bien-être de la population.

Le confort acoustique est par définition la maîtrise des bruits extérieurs (voitures, trains, usines, avions...) et intérieur (ventilation, les bruits de pas, ...). Il est un élément souvent négligé des espaces intérieurs, or l'équilibre psychologique et la productivité au travail des occupants y sont intimement liés. Un bon confort acoustique a une influence positive sur la qualité de vie au quotidien et sur les relations entre usagers d'un bâtiment. A contrario, un mauvais confort acoustique génère des effets négatifs sur l'état de santé (nervosité, stress, sommeil contrarié, fatigue).

Les solutions pour la mise en œuvre du confort acoustique au sein d'un bâtiment dépendent principalement de l'enveloppe de ce dernier et donc des matériaux entrant dans sa réalisation. Le choix d'un ensemble de matériaux d'isolation ou de correction acoustique est fonction de la nature du bruit et du confort acoustique requis dans un lieu déterminé. Il est donc nécessaire de connaître les caractéristiques acoustiques (le coefficient d'absorption et l'impédance acoustique) de chaque matériau composant l'enveloppe du bâtiment.

Malheureusement au Benin, l'absence de données acoustiques sur les matériaux de construction locaux rend la réalisation du confort acoustique difficile dans nos bâtiments. C'est dans ce cadre qu'il nous a été demandé d'installer une unité de caractérisation acoustique des matériaux de construction locaux au Laboratoire de Caractérisation Thermo-physique des Matériaux et d'Appropriation Energétique (Lab-

CTMAE). Plusieurs méthodes ont été élaborées par les scientifiques pour la détermination de ces caractéristiques dont les deux utilisées sont les tests en salle réverbérante et les mesures en tube de Kundt. Les tests de réverbération sont relativement compliqués nécessitant des installations coûteuses, des échantillons de grande taille et des équipements spécialisés. Les résultats de cette approche peuvent également varier en fonction de la forme globale, de la taille de l'échantillon et condition de montage[2]. Pour pallier ces inconvénients, l'utilisation du tube de Kundt est souvent adoptée pour mesurer et comparer les valeurs relatives de l'absorption et de l'impédance acoustiques des matériaux.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer les performances d'un dispositif de tube de Kundt pour la détermination du coefficient d'absorption et de l'impédance acoustiques des matériaux locaux. Ainsi, nous chercherons, de façon spécifique, à réaliser le dispositif de tube de Kundt, ensuite à identifier les matériaux tests et enfin à procéder à la validation de notre dispositif.

Dans un premier temps, nous aborderons l'aspect théorique de ce travail, en donnant quelques notions d'acoustique nécessaires à sa compréhension, et en explicitant les calculs de la méthode retenue. Nous nous intéresserons dans la deuxième section à l'aspect pratique, en décrivant les caractéristiques du matériel utilisé ainsi que la méthode expérimentale mise en œuvre. Les résultats de cette méthode sur différents échantillons seront développés dans la dernière section accompagnés des discussions.

## CHAPITRE 1: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

### Introduction

Plusieurs études ont été menées dans le domaine du confort acoustique des bâtiments. Celles-ci ont conduit à l'élaboration de différentes méthodes servant à la caractérisation acoustique des matériaux pour l'isolation et la correction acoustiques des locaux. Ce chapitre se consacre donc à la synthèse des travaux réalisés dans ce sens, mais avant, le développement de quelques notions d'acoustiques est nécessaire.

### 1.1. Principaux phénomènes physiques et formulations de base associées

#### 1.1.1. Définitions

L'état de référence en équilibre thermodynamique du milieu atmosphérique se caractérise par une température  $T_0$  de  $20^\circ\text{C}$ , une pression  $P_{atm} = 101.300 \text{ Pa}$  et une masse volumique  $\rho_a = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$  [3]. Toute vibration d'un corps dans ce milieu entraîne des variations locales de pression qui se propagent dans l'air. Ces perturbations captées par l'oreille, donnent la sensation de bruit.

Un son pur correspond à une variation sinusoïdale de la pression acoustique autour d'une position d'équilibre. Le champ de pression présente une dépendance spatiale et temporelle.

$$P(t, x) = P_{max} \cdot \sin(\omega t - kx) \quad (1.1)$$

Avec

$P_{max}$  : pression maximale de l'onde acoustique en  $\text{Pa}$  ;

$\omega$  : pulsation de l'onde  $\text{rad. s}^{-1}$ ;

$k$  : nombre d'onde  $\left(k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}\right)$ .

La distance entre deux extrema consécutifs correspond à la longueur d'onde  $\lambda$  (en m).

La fréquence du signal  $f$  et sa longueur d'onde  $\lambda$  sont reliées entre elles par la constante  $c = 344 \text{ m.s}^{-1}$  à  $20^\circ\text{C}$  [3], qui représente la célérité de l'onde dans l'air.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega} \quad (1.2)$$

L'oreille humaine est sensible aux ondes dont la fréquence est comprise entre 20 et 20.000  $\text{Hz}$  [4]. Ces deux limites ne sont cependant pas intangibles et varient en

fonction de l'acuité de l'oreille réceptrice. On définit alors trois domaines de fréquences  $Hz$ [5] :

- 20 à 400  $Hz$  : **graves**  $\Rightarrow \lambda$  compris entre 0,85  $m$  et 17  $m$  ;
- 400 à 2000  $Hz$  : **moyennes**  $\Rightarrow \lambda$  compris entre 0,17  $m$  et 0,85  $m$  ;
- au-delà de 2000  $Hz$  : **aigues**  $\Rightarrow \lambda$  inférieur à 0,17  $m$ .

Le son correspond à une superposition de signaux de fréquences différentes. Il faut donc étudier ses caractéristiques selon  $f$ . Cependant, les acousticiens préfèrent travailler sur des intervalles de fréquences appelés octaves et tiers d'octaves. Ces intervalles sont de largeur relative constante avec :

$$\frac{f_{i+1} - f_i}{f_i} = \text{constante} \quad (1.3)$$

Avec :

$f_{i+1}$  et  $f_i$  : limites de la bande de fréquences.

On a  $f_{i+1} = 2f_i$  dans le cas des octaves et  $f_{i+1} = 2^{1/3}f_i$  pour les tiers d'octave, ce qui permet alors de définir de manière normalisée ces intervalles. Le travail par bandes de fréquences permet de faciliter la représentation du son et la comparaison des performances acoustiques des matériaux.

Le domaine de fréquence étudié dans le cadre de l'acoustique du bâtiment se situe généralement entre 100 et 5.000  $Hz$  [6].

**Tableau 1. 1** : définition normalisée des octaves et tiers d'octaves [5].

	Fréquences (Hz)																	
1/3 d'octave	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
octave	125		250		500		1000		2000		4000							

Le **bruit** est une combinaison de sons complexes non-harmoniques. C'est donc une variation aléatoire de la pression acoustique : aucune périodicité dans le signal et la fréquence n'est pas précise. La notion de bruit est généralement associée à une notion de gêne.

Ainsi, nous distinguons les bruits aériens (bruits émis par une source n'ayant pas de contact avec la structure) et les bruits solidiens (ayant pour origine une mise en vibration directe de la structure).

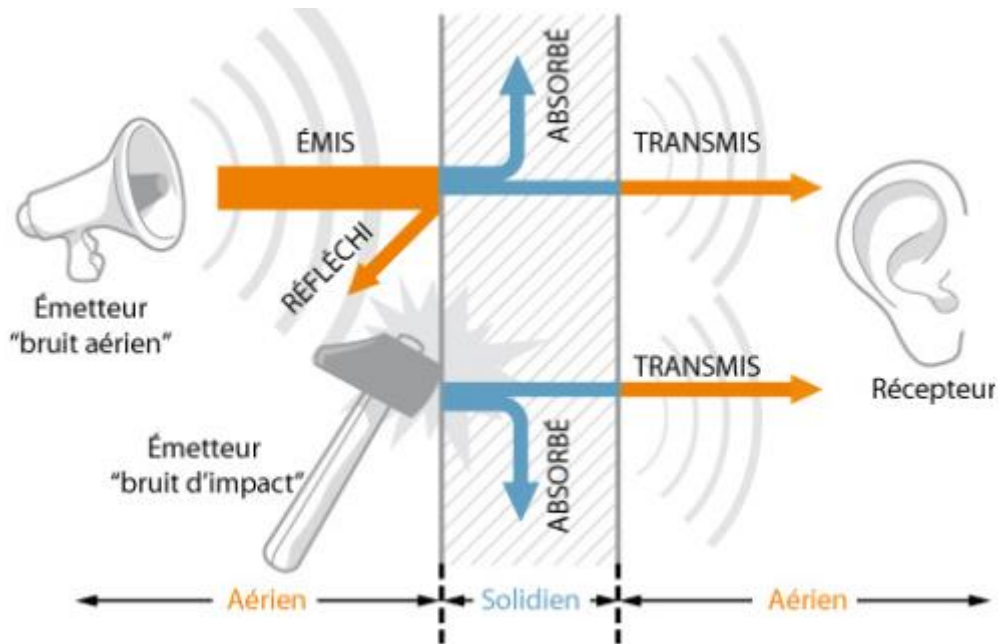


Figure 1. 1 : bruits aériens et bruits solidiens [4]

### 1.1.2. Les types d'ondes sonores

Les différentes études acoustiques se font classiquement suivant deux types d'ondes acoustiques : les ondes planes et les ondes sphériques. Il est évident que, dans la réalité, la forme des fronts d'onde sera généralement plus complexe. Mais, ces deux types d'ondes existent réellement dans de nombreux cas. Pour des études plus sophistiquées, les acousticiens disposent d'outils permettant de décomposer un champ sonore en somme de fronts d'onde plans ou sphériques.

#### ❖ Les ondes planes

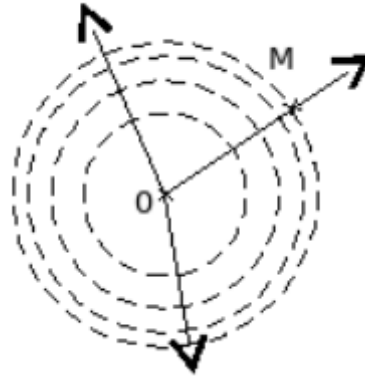
Les ondes planes sont caractérisées par des fronts d'ondes plans et parallèles. Ces ondes ne se rencontrent que dans des conduits de section constante et en dessous de la fréquence de coupure du conduit à partir de laquelle d'autres types d'onde vont apparaître.

#### ❖ Les ondes sphériques

Les surfaces d'ondes sont des sphères concentriques. La source sphérique idéale est schématisée par une sphère solide située en O, qui se contracte et se dilate au cours du temps autour d'une valeur moyenne de son rayon. Toutes les particules situées en

un point M vibrent avec une amplitude proportionnelle à  $1/r$  ;  $r$  étant la distance OM, et avec un retard de phase  $kr$ .

A partir d'une distance assez grande de la source par rapport à la longueur d'onde, on peut assimiler le front d'onde sphérique à un front d'onde plan (la source est alors assimilée à une onde plane).



**Figure 1. 2** : ondes sphériques [7].

### 1.1.3. Les types de champs sonores

Il existe essentiellement 4 types de champs sonores : champ proche – champ lointain et champ libre – champ réverbéré.

#### ❖ Champ proche – champ lointain

Deux catégories servent à caractériser l'évolution du champ acoustique émis par une source en fonction de la distance source-récepteur, il s'agit du champ proche et du champ lointain.

En *champ proche*, les phénomènes acoustiques sont très complexes. La mesure et l'analyse de ce type de champ fait l'objet de recherches.

En *champ lointain*, on peut caractériser la partie progressive du champ sonore. Le champ sera lointain si la distance source-récepteur est très grande par rapport à la longueur d'onde considérée ( $\lambda$ ) ; la position du champ lointain dépend donc de la fréquence.

## ❖ Champ libre – champ réverbéré

Ces deux catégories servent à caractériser l'évolution du champ sonore émis par une source en fonction de son environnement.

Lorsque les ondes peuvent se propager sans rencontrer d'obstacles, le champ est dit **libre**. C'est ce type de champ qu'on cherche à recréer dans une chambre anéchoïque.

Lorsque la source émet dans un local donné, l'évolution spatiale du champ sonore va dépendre des caractéristiques acoustiques du local. On se trouve alors dans un champ **réverbéré**. Il faut cependant faire attention avec cette terminologie. Le champ, en effet, peut-être plus ou moins :

- totalement réverbéré lorsque l'énergie réfléchiée par les parois du local domine nettement (de plus de 10 dB) l'énergie émise directement par la source.
- partiellement réverbéré dans la mesure où le champ sonore résulte et du champ sonore réfléchi et du champ sonore direct.

## 1.2. Notion de pression, puissance et intensité acoustique

### 1.2.1. Pression acoustique

La grandeur caractéristique la plus accessible à la mesure d'un son (au moins dans les gaz) est la pression acoustique  $p(t)$ . En un point de l'espace, elle est définie comme étant la partie fluctuante de la pression totale  $P(t)$  autour d'une valeur moyenne constante  $P_{atm}$  représentant la pression atmosphérique au repos.

$$p(t) = P(t) - P_{atm} \quad (1.4)$$

Avec :

$p(t)$  : pression acoustique instantanée en  $Pa$  ;

$P(t)$  : pression totale en  $Pa$  ;

$P_{atm}$  : pression atmosphérique en  $Pa$ .

L'oreille humaine est sensible à une plage de pression allant de  $2 \cdot 10^{-5} Pa$  pour le seuil d'audibilité à  $20 Pa$  pour le seuil de douleur, soit un rapport de 1 à 1.000.000[3]. Mais on utilise dans la pratique le « niveau de pression acoustique » exprimé en décibels. Un décibel vaut un dixième de bel (nom de l'Américain Graham Bell) et est égal à :

$$L_p = 10 \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (1.5)$$

Avec :

$L_p$ : niveau de pression acoustique en  $dB$  ;

$p$  : pression acoustique de la source considérée en  $Pa$  :

$p_0 = 2.10^{-5} Pa$  : pression de référence correspondant au seuil d'audibilité en  $Pa$ .

### 1.2.2. Puissance acoustique

La puissance acoustique est la quantité d'énergie rayonnée par unité de temps par une source sonore. Elle ne peut être mesurée directement, mais par contre, on peut calculer la puissance acoustique instantanée qui traverse une surface  $S$  donnée d'après la formule :

$$W = \frac{p^2 \cdot S}{\rho \cdot c} \quad (1.6)$$

Avec :

$W$  : puissance acoustique en  $W$  ;

$p$  : pression acoustique en  $Pa$  ;

$S$  : surface considérée en  $m^2$ ;

$\rho$  : masse volumique du milieu propagateur en  $kg \cdot m^{-3}$  ;

$c$  : célérité ou vitesse du son en  $m \cdot s^{-1}$ .

Les puissances sonores sont comprises entre  $W_0 = 10^{-12} W$  (valeur correspondant au seuil d'audibilité) et  $1 W$  (seuil de douleur). Dans la pratique, on utilise le « niveau de puissance acoustique » exprimé en décibel.

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad (1.7)$$

Avec :

$L_W$  : niveau de puissance acoustique en  $dB$  ;

$W$  : puissance sonore de la source considérée en  $W$  ;

$W_0$  : puissance sonore de la source de référence, soit  $10^{-12} W$ .

### 1.2.3. Intensité acoustique

L'intensité acoustique en un point donné est le flux d'énergie moyen traversant en une seconde l'unité de surface centrée en ce point et perpendiculaire à la direction considérée. Elle a pour expression :

$$I = \frac{W}{S} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (1.8)$$

Avec :

$I$  : l'intensité acoustique en  $W \cdot m^{-2}$  ;

$W$  : la puissance acoustique de la source sonore en  $W$  ;

$S$  : la surface considérée en  $m^2$  ;

$p$  : pression acoustique en  $Pa$  ;

$\rho$  : masse volumique du milieu propagateur en  $kg \cdot m^{-3}$  ;

$c$  : célérité du son en  $m \cdot s^{-1}$ .

Le niveau d'intensité se détermine par la formule :

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (1.9)$$

Avec :

$L_I$  : le niveau d'intensité acoustique en  $dB$  ;

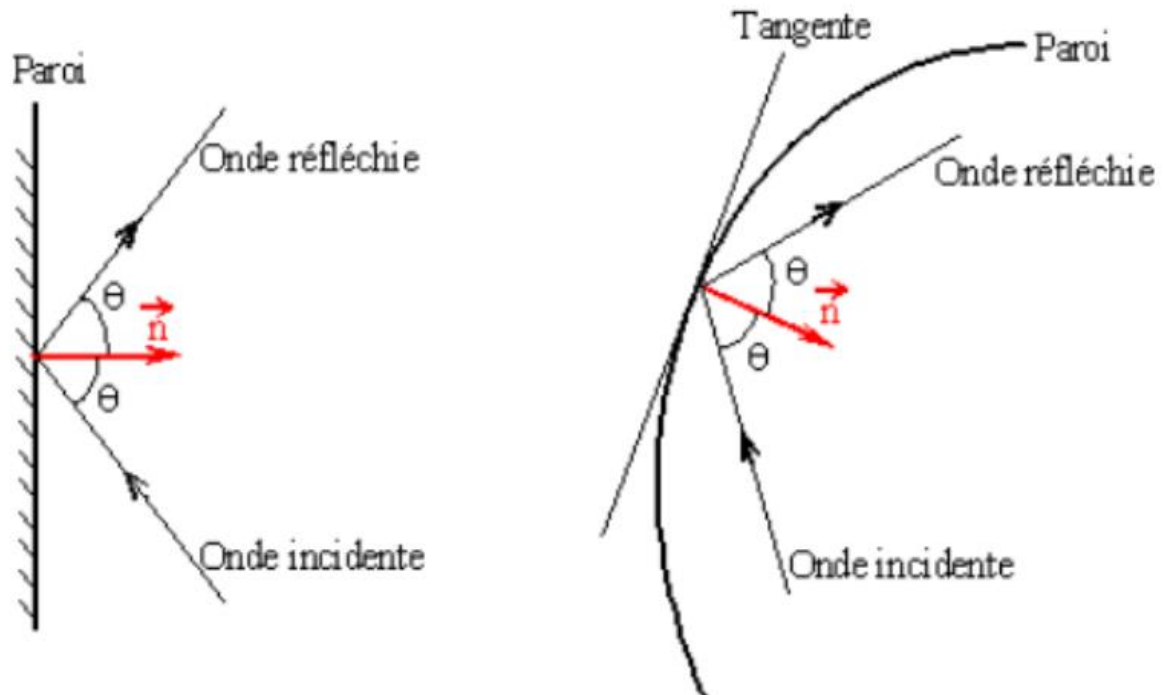
$I$  : l'intensité acoustique considéré en  $W \cdot m^{-2}$  ;

$I_0$  : l'intensité acoustique de référence ;  $I_0 = 10^{-12} W \cdot m^{-2}$ .

## 1.3. Les principaux phénomènes acoustiques

### 1.3.1. Réflexion des ondes sonores

Lorsqu'une onde acoustique rencontre un obstacle, sa direction de propagation est modifiée : c'est la réflexion. La loi de Snell-Descartes, qui stipule qu'il y a égalité des angles incident et réfléchi s'applique alors pour des surfaces planes ou faiblement convexes ou concaves. Le matériau composant la paroi est plus ou moins absorbant. L'amplitude de l'onde réfléchie est donc plus faible que celle de l'onde incidente. Ce comportement de la paroi dépend de ses propriétés acoustiques (absorption et impédance acoustiques).



**Figure 1. 3** : Réflexion des ondes sur une paroi [7]

### 1.3.2. Absorption des ondes sonores

Quand une onde sonore entre en contact avec un matériau, une partie de l'énergie est réfléchie, une autre partie est absorbée dans le matériau et le reste le traverse. La qualité de l'absorption acoustique est déterminée par l'agencement de l'espace et des matériaux utilisés. Par nature, la laine de verre offre d'excellentes propriétés d'absorption acoustique[2].

L'absorption acoustique contrôle le niveau de pression acoustique ambiant dans une pièce et favorise un environnement confortable dans lequel les gens peuvent se concentrer et travailler de façon productive, sans irritation et stress causés par le bruit.

### 1.3.3. Transmission des ondes sonores

La transmission acoustique à travers un matériau est la part d'onde sonore qui n'est ni absorbée, ni réfléchie par ce matériau soumis à une onde incidente. Ce phénomène est caractérisé par un coefficient de transmission acoustique, qui dépend des propriétés du matériau. En acoustique du bâtiment, il est plus courant d'utiliser le coefficient d'affaiblissement (en dB) de la structure ou encore l'une des définitions de l'indice d'affaiblissement ou de l'isolement, au lieu de la définition classique du facteur de transmission.

### 1.3.4. Diffraction des ondes sonores

Lorsqu'une onde sonore arrive à proximité d'un obstacle, elle va chercher à le contourner. L'arête de l'obstacle devient le centre de la nouvelle onde secondaire, appelée onde diffractée. La fente présente sous une porte ou l'ouverture, même minime, d'une fenêtre deviennent une nouvelle source sonore. La diffraction représente une des difficultés à surmonter pour l'isolation d'un local.

### 1.3.5. Echo et réverbération

Après émission d'un signal impulsif, un récepteur (R) entendra le son direct provenant d'une source (S) et atténué par la distance source-récepteur « $d_{SR}$ ». Ce son direct arrive au bout du temps :

$$\tau = \frac{d_{SR}}{c} \quad (1.10)$$

Avec :

$\tau$  : le temps mis par le son direct pour atteindre le récepteur en  $s$  ;

$d_{SR}$  : la distance séparant la source du récepteur en  $m$  ;

$c$  : la célérité du son en  $m \cdot s^{-1}$ .

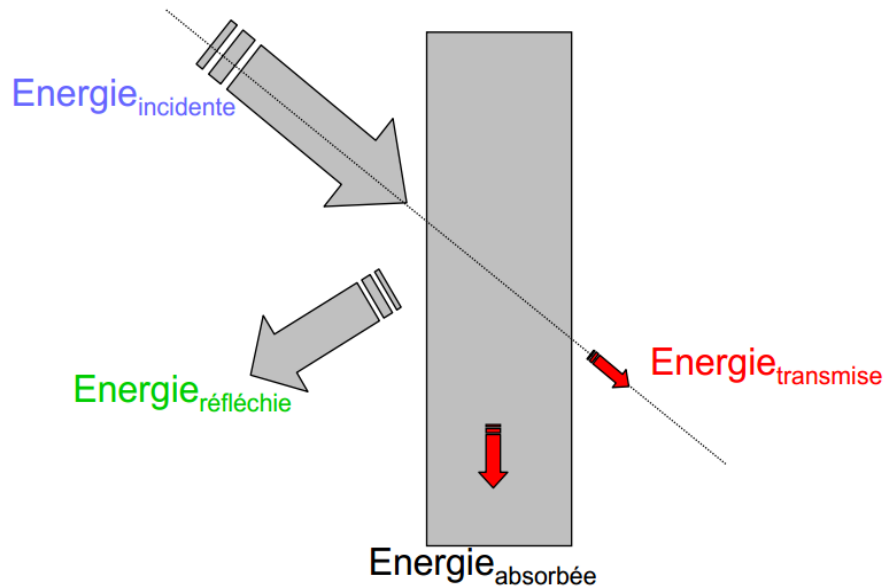
Le temps d'intégration de l'oreille est de 30 à 40  $ms$  pour un son complexe de niveau constant. Si un son se répète après plus de 30  $ms$  et avec une amplitude suffisante, on le qualifiera d'*écho*. L'oreille a donc le temps de faire la distinction entre les deux sons YHéquivalents mais décalés dans le temps. Ceci entraîne un sentiment auditif très gênant (écho sur un téléphone portable).

Au contraire, lorsque l'oreille n'a pas le temps de faire la distinction entre les réflexions successives, de bien séparer un son direct et un son réfléchi, on parle de *réverbération*. La réverbération caractérise en fait une salle au niveau de la quantité d'ondes réfléchies, de leurs amplitudes, et surtout de la vitesse à laquelle décroît l'amplitude du fond sonore.

## 1.4. Le confort acoustique

### 1.4.1. Isolation et correction acoustique

La propagation du son est perturbée lorsque des obstacles se dressent sur son passage. L'onde incidente génère une onde réfléchie sur la surface du matériau et une onde transmise au travers de celui-ci.



**Figure 1. 4 :** Comportement d'une onde en incidence oblique à la surface d'un matériau [8].

Le bilan énergétique correspondant à cette situation est:

$$E_i = E_r + E_t + E_a \quad (1.11)$$

Avec :

$E_i$  : l'énergie incidente en  $J$  ;

$E_r$  : l'énergie réfléchie en  $J$  ;

$E_t$  : l'énergie transmise en  $J$  ;

$E_a$  : l'énergie absorbé par le matériau en  $J$ .

On parle d'*isolation acoustique* lorsque l'énergie transmise ( $E_t$ ) devient négligeable devant les autres composantes. Ceci se produit lorsqu'on désire limiter la propagation du son de part et d'autre d'un obstacle (cas du mur entre deux pièces). Pour ce faire, on utilise des matériaux de forte inertie que l'onde incidente ne peut pas mettre en mouvement. Il n'y a donc pas d'onde transmise par effets vibratoires. C'est l'effet de masse.

On parle de *correction acoustique* lorsqu'on cherche à réduire les nuisances du bruit émis dans le local que l'on cherche à traiter. Le but est de limiter la création d'ondes réfléchies sur les parois de la pièce car elles interfèrent avec les ondes incidentes et gênent l'intelligibilité du discours (problème de l'écho). Des matériaux poreux sont alors employés (laine de verre...) car ils ont la faculté de dissiper une partie de l'énergie de l'onde incidente (phénomène d'absorption). Toutefois, il faut

noter que ce type de matériaux permet d'augmenter l'énergie absorbé ( $E_a$ ) et de diminuer l'énergie réfléchi ( $E_r$ ) mais qu'il n'a quasiment pas d'incidence sur l'énergie transmise ( $E_t$ ) qui reste généralement élevée.

En effet, les matériaux absorbants se caractérisent par une forte porosité et une perméabilité élevée. Ils ont donc tendance à laisser passer une partie des ondes incidentes. De plus, ces matériaux légers vibrent facilement.

#### 1.4.2. Coefficient de réflexion et d'absorption d'un matériau

Dans le cas particulier où l'énergie de l'onde transmise ( $E_t$ ) est négligeable, la formule (1.11) se réécrit de la manière suivante :

$$E_i = E_r + E_a \quad (1.12)$$

$$1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_a}{E_i}$$

On définit alors le coefficient de réflexion ( $R$ ) et le coefficient d'absorption ( $\alpha$ ) :

$$R = \frac{E_r}{E_i} \quad (1.13)$$

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad (1.14)$$

Par définition,  $\alpha$  est un coefficient adimensionnel, variant entre 0 et 1. La valeur 0 correspond à un matériau totalement réfléchissant et la valeur 1 correspond à un matériau totalement absorbant.

L'absorption dépend principalement de la fréquence. Ceci signifie qu'un même échantillon peut être par exemple faiblement absorbant aux basses fréquences et fortement aux hautes fréquences. Ceci explique pourquoi la valeur de  $\alpha$  doit toujours s'accompagner de la fréquence à laquelle la mesure a été réalisée.

Le coefficient d'absorption acoustique ( $\alpha$ ) se mesure de manière continue sur toute une gamme de fréquences à l'aide de plusieurs méthodes dont les plus connues et les plus utilisées sont : la mesure par tube à impédance et la mesure en salle réverbérante[9].

Le calcul de la valeur du coefficient d'absorption ( $\alpha$ ) se fait par octave ou tiers d'octave afin de comparer les matériaux entre eux.

### 1.4.3. Lien entre porosité, perméabilité et comportement acoustique

#### ❖ Porosité

Un matériau peut être qualifié de milieu poreux s'il est constitué à la fois d'une phase solide et de vides appelés pores. Ces pores sont saturés par de l'air. Il existe deux familles de pores dans un matériau, influant de manière différenciée sur le comportement acoustique : les pores connectés et les pores occlus.

Tout d'abord, un matériau possédant une forte porosité est léger. Il aura donc tendance à vibrer sous l'effet des ondes incidentes. Ce type de matériau ne peut donc pas être employé tel quel pour de l'isolation acoustique.

Ensuite, l'absorption acoustique est due aux frottements visqueux existant entre le fluide et le squelette solide, car ils ont des vitesses de déplacement différentes. Cet amortissement n'existe donc que si l'onde acoustique peut pénétrer dans le réseau poreux et il est d'autant plus fort que la surface de contact entre le fluide et le solide est grande. L'absorption acoustique est donc favorisée lorsque le matériau possède une porosité ouverte ( $\phi$ ) élevée et une perméabilité ( $\Pi$ ) suffisante. Ainsi, l'onde pénètre facilement dans le matériau et dispose d'un large espace pour s'amortir. C'est pourquoi les matériaux absorbants sont employés pour régler les problèmes d'écoute à l'intérieur d'un local en limitant la réverbération des sons (réflexion négligeable). Ils dissipent une partie de l'énergie acoustique incidente et transmettent l'autre partie de par leur perméabilité.

Cependant, un phénomène de diffraction peut se produire si la longueur d'onde  $\lambda$  est du même ordre de grandeur que la taille des pores en surface.

#### ❖ Perméabilité

Les matériaux amortissent les sons par dissipation visqueuse. Cependant, ce mécanisme de dissipation d'énergie suppose que les ondes puissent pénétrer dans le matériau et disposer d'un espace suffisant pour être amorties. Il faut donc une certaine perméabilité et une porosité ouverte importante.

La perméabilité ( $\Pi$ ) d'un matériau homogène, se définit à partir de la loi de Darcy, qui relie le débit du fluide traversant à la perte de charge et à la surface traversée. Dans le cas d'un écoulement non turbulent dans un milieu isotrope, on a :

$$v = -\frac{\Pi}{\eta} \nabla P \quad (1.15)$$

$$Q = \frac{\Pi}{\eta} S \frac{\Delta P}{\Delta l} \quad (1.16)$$

Avec :

$v$  : vitesse d'écoulement du fluide ( $m \cdot s^{-1}$ ) ;

$\Pi$  : coefficient de perméabilité du matériau ( $m^2$ ) ;

$\eta$  : viscosité dynamique du fluide ( $Pa \cdot s$ ) ;

$Q$  : débit volumique du fluide ( $m^3/s$ ) ;

$\Delta l$  : épaisseur du matériau poreux ( $m$ ) ;

$S$  : section de passage du fluide ( $m^2$ ) ;

$\Delta P = P_2 - P_1$  : différence de pression appliquée sur chaque face de l'échantillon ( $Pa$ ).

Lorsque le fluide traversant le milieu poreux est de l'air, on utilise comme paramètre la résistance au passage de l'air  $\sigma$ . Elle peut se calculer directement à partir des mesures réalisées sur un perméamètre, grâce à la relation :

$$\sigma = \frac{P_2 - P_1}{\Delta l \cdot Q} S \quad (1.17)$$

En combinant (1.16) et (1.17), on en déduit la relation de passage entre résistivité à l'air et perméabilité macroscopique :

$$\frac{\Pi}{\eta} = \frac{1}{\sigma} \quad (1.18)$$

#### 1.4.4. Impédance acoustique d'un matériau

L'impédance acoustique d'un milieu pour une onde acoustique caractérise la résistance du milieu au passage de cette onde. Notée  $Z_{ac}$ , elle représente le rapport de la pression acoustique et de la vitesse de la particule associée du milieu.

$$Z_{ac} = \frac{p}{u} \quad (1.19)$$

Avec ;

$Z_{ac}$  : l'impédance acoustique du milieu considéré en  $Ray$  ;

$p$  : la pression acoustique en  $Pa$  ;

$u$  : la vitesse particulaire en  $m \cdot s^{-1}$ .

Dans le cadre de notre étude, nous ne nous intéresserons qu'au coefficient d'absorption acoustique et à l'impédance acoustique des matériaux.

## 1.5. Méthodes de mesure du coefficient d'absorption d'un matériau

La caractérisation des propriétés acoustiques d'un matériau est basée sur une approche expérimentale. Des paramètres représentatifs tels que le coefficient d'absorption et l'impédance acoustique sont mesurés grâce à plusieurs méthodes (voir annexe 1), mais les plus utilisées sont la méthode de la salle réverbérante et celle du tube de Kundt.

### 1.5.1. Etat de l'art

La mesure du coefficient d'absorption acoustique des matériaux est majoritairement réalisée selon deux méthodes standardisées.

La première méthode est décrite par les normes ISO354 et ASTM C423 [2] et repose sur l'utilisation d'une chambre réverbérante. Cette méthode permet l'obtention du coefficient d'absorption en champ acoustique diffus. Elle requiert l'usage d'une chambre de volume important, très réfléchissant, avec une grande surface de matériau test afin de rendre plus réaliste la détermination du coefficient. Malgré son coût de réalisation très élevé, cette méthode présente des insuffisances. Ainsi, d'autres méthodes ont été élaborées pour la détermination du coefficient d'absorption acoustique des matériaux en champ acoustique diffus. Hormis la méthode de la cabine Alpha qui utilise une enceinte réverbérante et un échantillon tous deux de dimensions réduites [10], avec des problèmes de diffraction et de diffusion toujours présents [11], peu de travaux ont envisagé la possibilité de mesurer le coefficient d'absorption d'un matériau sous champ acoustique diffus en réduisant les contraintes liées à la méthode de la chambre réverbérante. Takahashi et al. [12] ont proposé une méthode utilisant deux microphones et le bruit ambiant dans le local comme seule source d'excitation, avec des résultats précis comparativement à des résultats expérimentaux obtenus sous incidence aléatoire et au-dessus de 400 Hz pour des échantillons de petites surfaces. Otsuru et al. [13] ont étudié numériquement des améliorations possibles de la méthode précédente, avec un moyennage d'ensemble des sources ponctuelles réparties sur un hémisphère centré sur un matériau, montrant ainsi une réduction des effets de bord. Citons enfin l'utilisation d'un haut-parleur paramétrique proposée par Kuang et al. [14]. En positionnant ce dernier sur différents points situés sur un arc de cercle dont l'origine est le centre du matériau test, le coefficient d'absorption du matériau est mesuré à l'aide de deux microphones pour différents angles d'incidence. Le coefficient sous champ diffus est estimé par un moyennage des coefficients mesurés pour chaque incidence testée, avec des résultats acceptables au-dessus de 1000 Hz par comparaison à la méthode de la chambre réverbérante.

La deuxième méthode de mesure représente un moyen plus réduit de détermination des coefficients d'absorption des matériaux, mais se faisant cette fois-ci en régime stationnaire. Il s'agit de la méthode du tube de Kundt (normes ISO 10534-2

et ASTM E1050-12 [2]). Il fut réalisé en 1866 par le physicien allemand August Kundt (1839 – 1894). Un matériau test de petite taille et de forme souvent circulaire est placé à une extrémité d'un tube cylindrique rigide au bout duquel se trouve un haut-parleur qui émet un son pur. La mesure du coefficient d'absorption se fait grâce à un ou plusieurs microphones. Au contact du matériau, une partie des ondes incidentes est absorbé par ce dernier et l'autre partie est réfléchi, créant ainsi un champ d'onde stationnaire dans le tube. Bruel et Kjær ont été les premiers à développer un dispositif de tube de Kundt à microphone unique [15]. Cette technique est encore largement utilisée de nos jours à cause de la fiabilité, la rapidité et la répétabilité des mesures obtenues. Par la suite, la méthode de mesure basée sur une source de bruit à large bande à deux microphones (norme ASTM E1050) a été introduite en 1985 et était une mise à jour de la méthode d'excitation sinusoïdale à microphone unique donnée par la norme ASTM C384 [16]. Cette méthode a elle aussi été mise à jour en 1998 pour inclure les modifications des dimensions du tube. Plus précisément, la longueur du tube a été définie en fonction de la fréquence de coupure afin de répondre à l'exigence que les ondes planes soient pleinement développées avant d'atteindre les microphones et l'échantillon.

### 1.5.2. Salle réverbérante

La méthode de la chambre réverbérante permet l'obtention du coefficient d'absorption pour une excitation de type champ acoustique diffus, ce qui est plus réaliste concernant l'utilisation pratique des matériaux absorbant. Cette méthode requiert des surfaces de matériaux importantes. La mesure de l'absorption acoustique en salle réverbérante est basée sur la mesure du temps de réverbération et l'utilisation de la formule de Sabine :

$$T_R = \frac{0,16V}{A_v} \quad (1.20)$$

Avec :

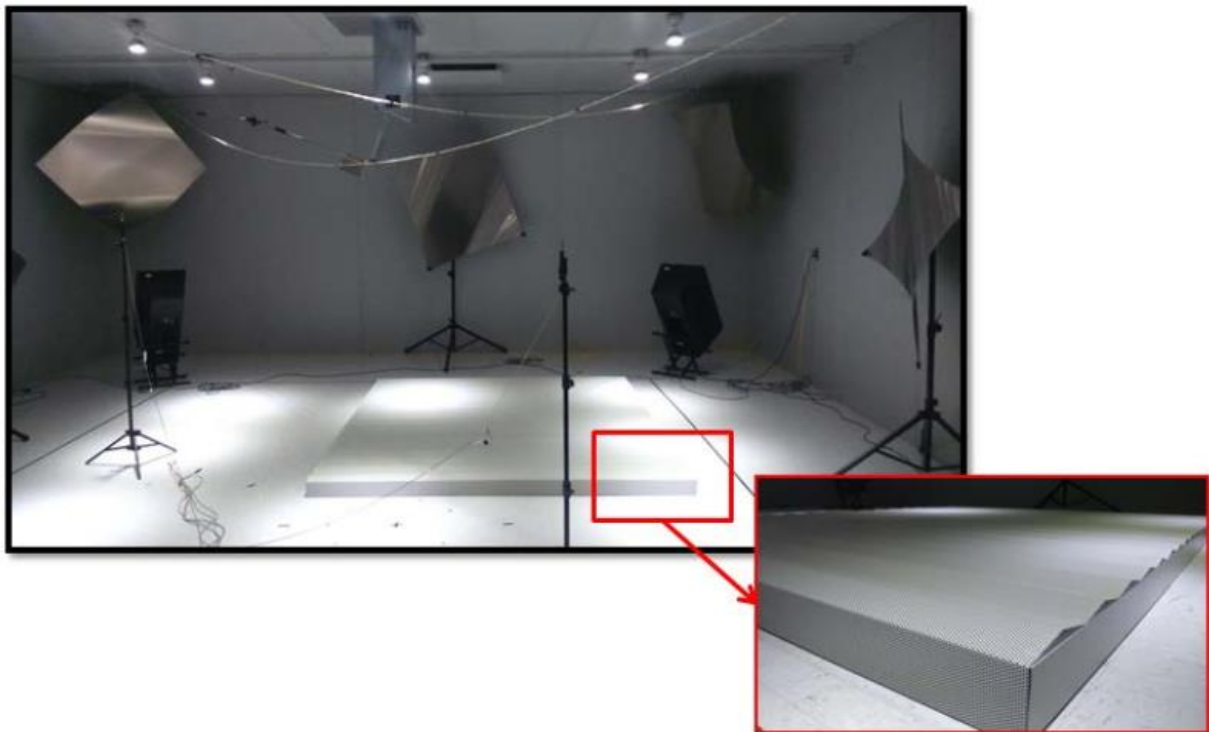
$T_R$  : le temps de réverbération en s ;

$V$  : le volume de la salle réverbérante en  $m^3$  ;

$A_v$  : l'air d'absorption équivalente de la salle réverbérante vide en  $m^2$ .

On comparera le temps de réverbération de la salle vide avec celui obtenu après que l'on ait disposé une surface  $S$  de matériau acoustique. Il faut noter que la durée de réverbération est l'intervalle de temps pendant lequel, après un arrêt brusque d'une source de bruit, le niveau de pression décroît de 60 dB.

La norme ISO 354 stipule que la chambre réverbérante doit avoir un volume supérieur à  $180 \text{ m}^3$  et un coefficient d'Absorption moyen  $\alpha_0 < 0,06$  [17]. Malgré le respect de cette préconisation, les valeurs mesurées du coefficient d'absorption sont souvent supérieures à l'unité et ne sont pas directement utilisables pour des calculs d'acoustique des salles sans une convection adéquate [18]. Des écarts de mesure importants sont également constatés entre différents laboratoires, illustrant les effets de la taille de la chambre utilisée, des conditions de montage de l'échantillon ou encore du positionnement des diffuseurs [19, 20]. Une comparaison précise des performances de produits acoustiques commerciaux est ainsi rendue difficile. Des chambres réverbérantes d'un volume très important et conséquemment coûteuse sont théoriquement nécessaires afin de limiter les problèmes de diffusion en basses fréquences.



**Figure 1. 5 :** Mesure de l'absorption sous champ acoustique diffus dans la chambre réverbérante du laboratoire ICAR (ÉTS/IRSST).

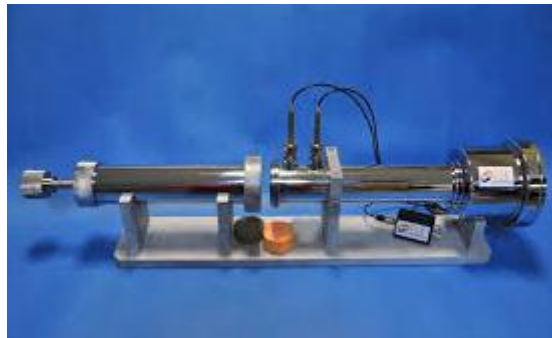
Il apparait difficile de satisfaire de manière simple aux exigences de la théorie sous-jacente à cette méthode d'essai et ainsi d'obtenir des résultats répétables et non surestimés dans une large gamme fréquentielle. Ceci suggère donc la recherche de solutions plus compactes ou plus efficaces pour la détermination du coefficient d'absorption des matériaux.

### 1.5.3. Tube à impédance

Le tube à impédance, encore appelé tube de Kundt ou tube à ondes stationnaires, est un dispositif permettant de faire des mesures rapides et faciles, mais

parfaitement reproductibles, des coefficients d'absorption des matériaux [21]. Le tube à impédance permet également une mesure précise de l'impédance acoustique normalement incidente et nécessite seulement de petits échantillons du matériau à tester.

Cette méthode de mesure présente l'intérêt d'être simple, rapide et peu coûteuse. En effet, pour réaliser une mesure, une faible quantité de matériau est nécessaire, ce qui n'est pas le cas de la mesure en chambre réverbérante pour laquelle une grande surface est nécessaire. La mise en œuvre de la mesure en tube permet de comparer un plus grand nombre de matériaux dans un laps de temps.



**Figure 1. 6** : tube de Kundt [22]

#### 1.5.4. Choix d'une méthode de mesure

L'utilisation de la chambre réverbérante pour la caractérisation acoustique des matériaux nécessite une chambre de volume supérieur à  $180 m^3$ , très hautement réfléchissant avec des diffuseurs installés à l'intérieur et un matériau à tester de grandes dimensions. Malgré un investissement aussi important, les coefficients mesurés ne sont pas directement utilisables et diffèrent de façon appréciable d'un laboratoire à un autre. Dans le même temps, le tube de Kundt permet des mesures représentatives, répétables avec des échantillons de petites dimensions et tout ceci à un coût relativement bas. Il permet en plus de déterminer l'impédance acoustique des matériaux.

Dans le cadre de notre étude, la *méthode du tube de Kundt* paraît donc la plus adaptée pour la mesure du coefficient d'absorption et de l'impédance acoustique des matériaux.

### Conclusion

L'isolation acoustique, la correction acoustique, le coefficient d'absorption et l'impédance acoustiques sont autant de notions abordées dans ce chapitre dont la connaissance est indispensable pour la suite de notre travail. Il faut aussi noter que parmi les différentes méthodes énumérées pour la détermination des caractéristiques

acoustiques des matériaux, celle retenue dans le cadre de cette étude est la méthode mesure par le tube de Kundt.

## CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODE

### Introduction

Les matériaux possèdent des propriétés d'absorption acoustique très variables. Une onde incidente sur un matériau engendre une onde réfléchie et une onde transmise. La partie de l'énergie qui n'est pas réfléchie correspond à l'absorption. Celle-ci provient soit de la dissipation par le matériau soit de la transmission à travers le matériau. Les propriétés d'absorption sont utilisées par exemple pour réduire le niveau sonore. Cela peut aussi servir à améliorer la qualité acoustique des bâtiments en corrigeant les temps de réverbération.

On présente ici une méthode habituellement utilisée qui permet de mesurer à la fois le coefficient d'absorption et l'impédance acoustiques des matériaux.

### 2.1. Matériels

#### 2.1.1. Description technique

Le tube de Kundt est l'un des moyens d'essais les plus utilisés dans le domaine de l'acoustique. Il sert à caractériser les matériaux en déterminant le coefficient d'absorption acoustique, le coefficient de réflexion et l'impédance de surface. La méthode de mesure associée à ce moyen d'essai est décrite dans la norme ASTM E 1050 en Amérique du Nord et dans la norme ISO 10534-2 pour l'Europe.

Le tube d'impédance est généralement de forme cylindrique. Il est composé :

- d'un tube rigide et droit ;
- d'un porte échantillon destiné à accueillir le matériau à tester ;
- d'une section de mesure où les micros sont fixés de manière à avoir la membrane affleurant au tube (pour la méthode du doublet électronique) ou d'un microphone fixé en bout d'une tige se déplaçant dans le tube (pour la méthode du microphone unique) ;
- un haut-parleur pour l'émission du son.

D'autres appareils complémentaires comme un générateur de basses fréquences (GBF), un amplificateur de puissance et un oscilloscope permettent respectivement la production, l'amplification et l'acquisition des signaux.

#### 2.1.2. Principe du tube de Kundt

Un échantillon du matériau à tester est monté à l'une des extrémités d'un tube rectiligne, rigide, lisse et étanche. Une onde acoustique incidente est produite par un

haut-parleur placé à l'autre extrémité du tube et alimenté par un générateur de basses fréquences (GBF). À la traversée de l'échantillon, l'onde perd de l'amplitude (diminution de l'énergie incidente par absorption) et une onde réfléchie déphasée est alors renvoyée par ce dernier. La superposition des deux ondes produit une onde stationnaire dans le tube. Un microphone relié à une tige mobile à l'intérieur du tube et positionné sur son axe capte l'onde sonore (supposée plane) et ses vibrations sont visualisées sur un oscilloscope en sortie. On repère par mesure les maxima (sonde sur un ventre de pression) et les minima de pression (sonde sur un nœud de pression) de l'onde stationnaire. Le coefficient d'absorption de l'échantillon et les grandeurs associées sont fonction du niveau de ces extrema.

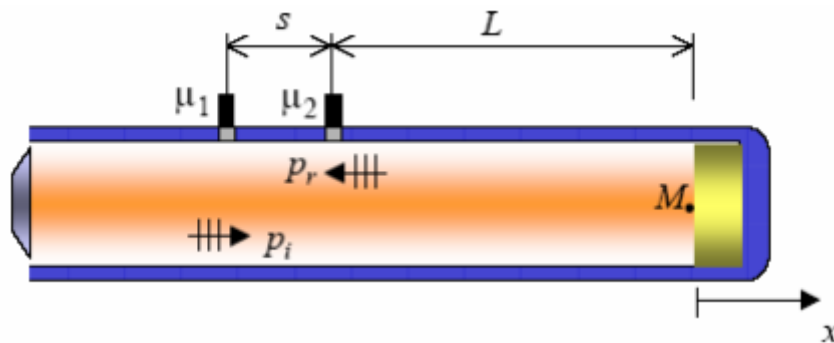
Les dimensions du tuyau (longueur  $L$  et diamètre intérieur  $D$ ) déterminent une plage de fréquence d'ondes planes.

## 2.2. Méthodes

La mesure des paramètres phoniques des matériaux avec le tube de Kundt peut se faire suivant deux méthodes : celle du doublet microphonique ou celle du microphone unique.

### 2.2.1. Méthode du doublet microphonique

L'usage du tube de Kundt à doublet microphonique permet la mesure de l'absorption et l'impédance acoustiques d'un matériau sous incidence normale. La figure ci-dessous montre le principe de la mesure d'absorption par la méthode du doublet microphonique.



**Figure 2. 1** : principe de fonctionnement du tube de Kundt à doublet microphonique [23]

Le haut-parleur émet une onde acoustique plane large bande. Une fraction de l'onde est absorbée par l'échantillon tandis que l'autre partie est réfléchie à l'intérieur du tube, formant ainsi un système d'ondes stationnaires. Le champ acoustique à l'intérieur du tube se décompose donc en une partie propagative, correspondant à la fraction de l'énergie acoustique absorbée par le matériau, et une partie stationnaire, correspondant aux réflexions sur l'échantillon.

Cette méthode permet de mesurer la partie nonpropagative de l'onde et donc d'estimer le coefficient d'absorption du matériau. L'équation suivante est utilisée pour décrire le coefficient de réflexion du matériau à partir de la fonction de transfert mesurée entre les deux microphones.

$$R_0 = \frac{e^{jks} - H_{12}}{H_{12} - e^{-jks}} e^{j2kL} \quad (2.1)$$

Avec :

$k$  : le nombre d'onde ;

$s$  : l'espacement entre les microphones ;

$L$  : la distance entre la surface du matériau et le microphone le plus proche de l'échantillon.

Le terme  $H_{12}$  est déterminé en mesurant la fonction de transfert entre les micros 1 et 2.

Le coefficient d'absorption du matériau peut-être déterminé à partir du coefficient de réflexion via la formule suivante :

$$\alpha = 1 - |R_0|^2 \quad (2.2)$$

Avec :

$\alpha$  : le coefficient d'absorption du matériau testé ;

$R_0$  : le coefficient de réflexion en pression du matériau testé.

L'impédance quant-à-elle se calcule grâce à la formule :

$$z = \frac{1 + R_0}{1 - R_0} \rho c \quad (2.3)$$

Avec :

$z$  : l'impédance acoustique du matériaux en Ray ;

$\rho$  : la masse volumique de l'air en  $kg.m^{-3}$  ;

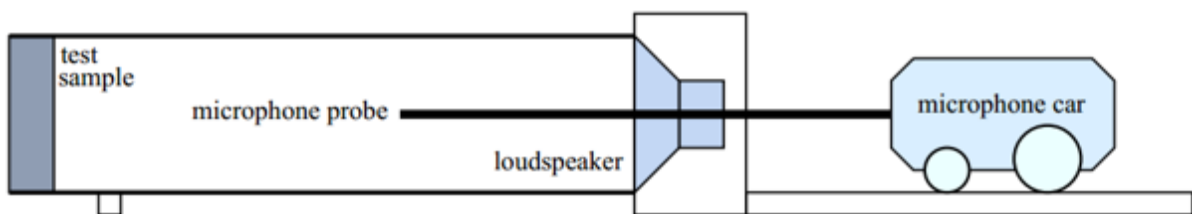
$c$  : la célérité du son dans l'air en  $m.s^{-1}$

La réponse en amplitude et en phase des deux microphones n'étant jamais parfaitement identique, on procède à un étalonnage en effectuant deux mesures consécutives de la fonction de transfert entre les deux microphones dans leur position initiale puis en les inversant. Le facteur de correction correspond alors à la moyenne géométrique de ces deux fonctions de transfert.

La fonction de transfert mesurée avec le matériau sera ainsi corrigée par ce facteur de correction, ce qui permettra de s'affranchir des différences en amplitude et en phase entre les deux microphones.

### 2.2.2. Méthode du microphone unique

Cette méthode utilise un tube de section uniforme, de longueur fixe (figure 2.2). Le champ d'ondes stationnaires est créé par un haut-parleur alimenté par un signal sinusoïdal, généré puis amplifié par la chaîne générateur BF/ ampli BF. Le champ acoustique créé devant l'éprouvette constituée par le matériau absorbant est exploré au moyen d'un microphone mobile.



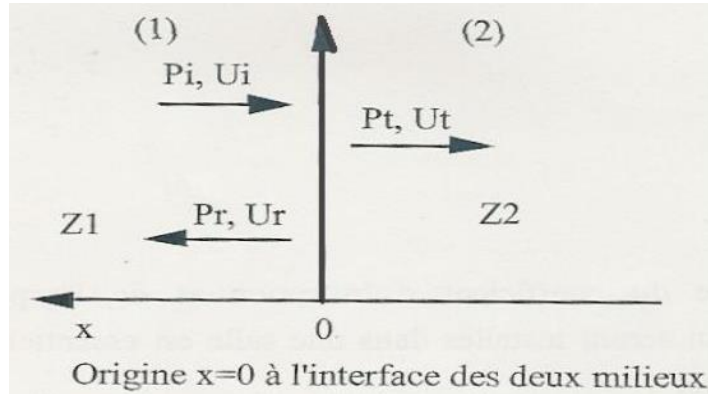
**Figure 2. 2 :** tube de Kundt à microphone unique [15].

La méthode retenue pour notre étude est celle du microphone unique. Ce choix se justifie par :

- la fiabilité des mesures effectuées ;
- la simplicité du système (pas besoin de faire un étalonnage du microphone comme dans le cas de la méthode du doublet microphonique) ;
- la détermination plus simple des paramètres phoniques recherchés (ne nécessite pas l'usage de la fonction de transfert).

**2.2.3. Détermination du coefficient de réflexion, du coefficient d'absorption et de l'impédance acoustique par la méthode du microphone unique.**

Considérons deux milieux 1 et 2



**Figure 2. 3 :** comportement des ondes planes [23]

En chaque point du milieu (1) ( $x > 0$ ), la pression acoustique  $p$  est la somme de la pression incidente  $p_i$  et de la pression réfléchie  $p_r$  sur la surface du milieu (2). Pour des ondes sinusoïdales, ces deux pressions s'expriment par :

$$p_i(x) = P_i e^{j\omega(t+x/c)} \quad \text{et} \quad u_i(x) = \frac{P_i}{\rho c} e^{j\omega(t+x/c)} \quad (2.4)$$

$$p_r(x) = P_r e^{j\omega(t-x/c)} \quad \text{et} \quad u_r(x) = -\frac{P_r}{\rho c} e^{j\omega(t-x/c)} \quad (2.5)$$

Avec :

$p_i$  : la pression incidente en  $Pa$  ;

$p_r$  : la pression réfléchie en  $Pa$  ;

$P_i$  et  $P_r$  : les amplitudes de pression en  $Pa$  ;

$c$  : célérité du son dans le milieu 1 (l'air) en  $m.s^{-1}$  ;

$\rho$  : masse volumique du milieu 1 (l'air) en  $kg.m^{-3}$ .

A l'interface des deux milieux, on a :

$$p(0) = p_i(0) + p_r(0) = (P_i + P_r) e^{j\omega t} \quad (2.6)$$

$$u(0) = u_i(0) + u_r(0) = \frac{(P_i - P_r)}{\rho c} e^{j\omega t} \quad (2.7)$$

On peut donc en déduire l'impédance spécifique  $Z_s$  à l'interface du milieu 2 :

$$Z_s = \frac{p(0)}{u(0)} = \rho c \frac{(P_i + P_r)}{(P_i - P_r)} \quad (2.8)$$

En introduisant le coefficient de réflexion en pression  $R_0 = \frac{P_r}{P_i}$  ; on obtient :

$$Z_s = \rho c \frac{(1 + R_0)}{(1 - R_0)} \quad (2.8)$$

Avec :

$R_0$  : coefficient de réflexion en pression.

Le coefficient de réflexion en intensité ou tout simplement coefficient de réflexion du matériau (milieu 2) s'écrit :

$$R = |R_0|^2 \quad (2.9)$$

Le coefficient d'absorption acoustique est le rapport de la puissance acoustique absorbée par l'éprouvette à la puissance acoustique incidente. Sous incidence normale, le coefficient d'absorption  $\alpha$  est lié au coefficient de réflexion par la relation :

$$\alpha = 1 - R = 1 - |R_0|^2 \quad (2.10)$$

En connaissant les tensions maximales (tensions lues sur l'oscilloscope), on peut déterminer le coefficient de réflexion en pression d'un matériau en appliquant la formule suivante :

$$R_0 = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}} \quad (2.11)$$

Où  $U_{max}$  est la tension maximale mesurée aux bornes du micro explorateur et  $U_{min}$  est la tension minimale mesurée aux bornes de ce même micro.

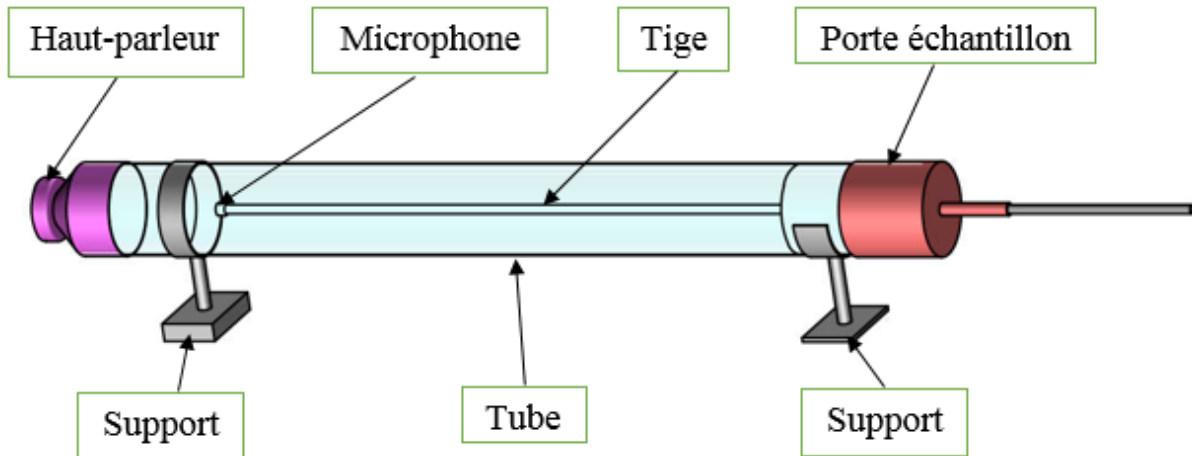
**NB** : ces résultats ne sont valables que dans le cas d'ondes planes, ce qui est le cas dans notre étude. Ces calculs seront utilisés en particulier pour nos mesures avec le tube de Kundt réalisé.

## 2.3. Réalisation du tube de Kundt

### 2.3.1. Conception du tube de Kundt

#### 2.3.1.1. Schéma du tube de Kundt

Le tube de Kundt réalisé se présente comme illustré dans la figure ci-dessous.



**Figure 2. 4 :** schéma du tube de Kundt réalisé

Le tube de Kundt réalisé se compose principalement de :

- ✓ un haut-parleur qui représente la source sonore ;
- ✓ un tube cylindrique qui sert de guide pour les ondes sonores ;
- ✓ un porte échantillon destiné à accueillir le matériau à tester ;
- ✓ un microphone pour la mesure des pressions le long du tube ;
- ✓ une tige qui porte le microphone et qui assure le déplacement rectiligne de ce dernier dans le tube ;
- ✓ deux (2) supports pour maintenir le tube en équilibre.

### 2.3.1.2. Choix des matériaux des composants du tube de Kundt

**Tableau 2. 1** : choix des composants du tube de Kundt à réaliser

Composant	Matériau	Justification
Tube	PVC	Le tube de Kundt possède la particularité de limiter la transmission et l'absorption des ondes ( $E_t \approx E_a \approx 0$ ) et de se placer en incidence normale. Ainsi, compte tenu de sa rigidité et de son très faible coefficient d'absorption ( $\alpha = 0,04$ à $1000 \text{ Hz}$ [28]), mais aussi de son faible coût et de sa grande disponibilité, nous avons choisi un tuyau PVC.
Porte-échantillon	Acier ordinaire	L'échantillon doit être placé dans un support rigide et imperméable, ce qui supprime la transmission et l'absorption des ondes. L'acier ordinaire (très faible coefficient d'absorption, $\alpha = 0,03$ à $1000 \text{ Hz}$ [29]) a donc été retenu.
Tige à microphone	Aluminium	Etant donné que le porte-microphone doit être supporté par le porte-échantillon et y coulisser facilement, il nous faut opter pour un matériau à faible masse volumique et ayant un très bon état de surface après usinage ; d'où le choix de l'aluminium.

### 2.3.1.3. Dimensionnement du tube de Kundt

La méthode de mesure se base sur le principe que seules des ondes planes se propagent dans le tube. Ceci implique une limitation haute fréquence. En effet, à partir d'une certaine fréquence, appelée fréquence de coupure, d'autres types d'ondes apparaissent et il n'est plus possible de dissocier l'onde plane des autres.

Les fréquences de coupure (minimale et maximale) dépendent respectivement de la longueur  $L$  du diamètre  $d$  du tube. Plus le tube est petit, plus la fréquence de coupure est haute. D'après Dowling, la limite de mesure en haute fréquence  $f_{max}$  se détermine par l'expression (Dowling et al, 1985) [15] :

$$f_{max} < \frac{c}{1,67d} \quad (2.12)$$

Avec :

$f_{max}$  : la fréquence maximale de coupure en  $Hz$  ;

$c$  : la célérité des ondes acoustiques en  $m.s^{-1}$  ;

$d$  : le diamètre interne du tube en  $m$ .

Par suite, la limite basse fréquence de mesure est obtenue par :

$$f_{min} > \frac{3c}{4L} \quad (2.13)$$

Où  $L$  est la longueur du tube en  $m$ .

La fréquence  $f$  à couvrir se trouve donc dans la limite :

$$\frac{3c}{4L} < f < \frac{c}{1,67d} \quad (2.14)$$

Pour notre étude, nous avons choisi un tube de diamètre  $d = 0,1 m$ , et de longueur  $L = 1 m$  La plage de fréquence à couvrir sera donc :

$$\frac{3 \times 340}{4 \times 1} < f < \frac{340}{1,67 \times 0,1}$$

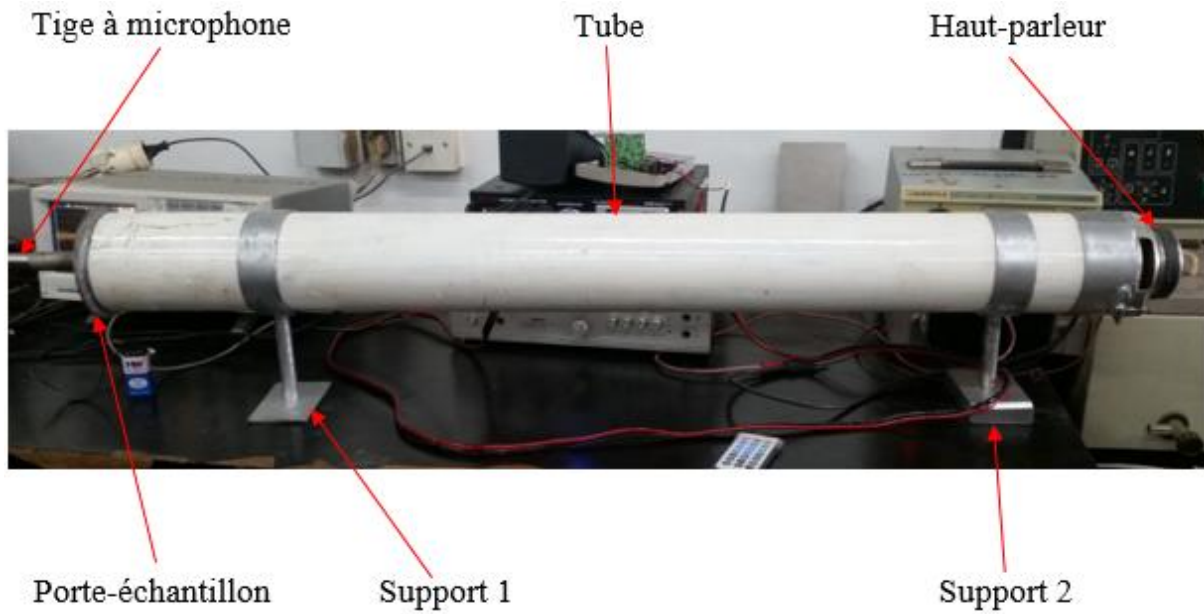
$$255 \text{ Hz} < f < 2035 \text{ Hz}$$

### 2.3.2. Réalisation du tube de Kundt

#### Montage du dispositif

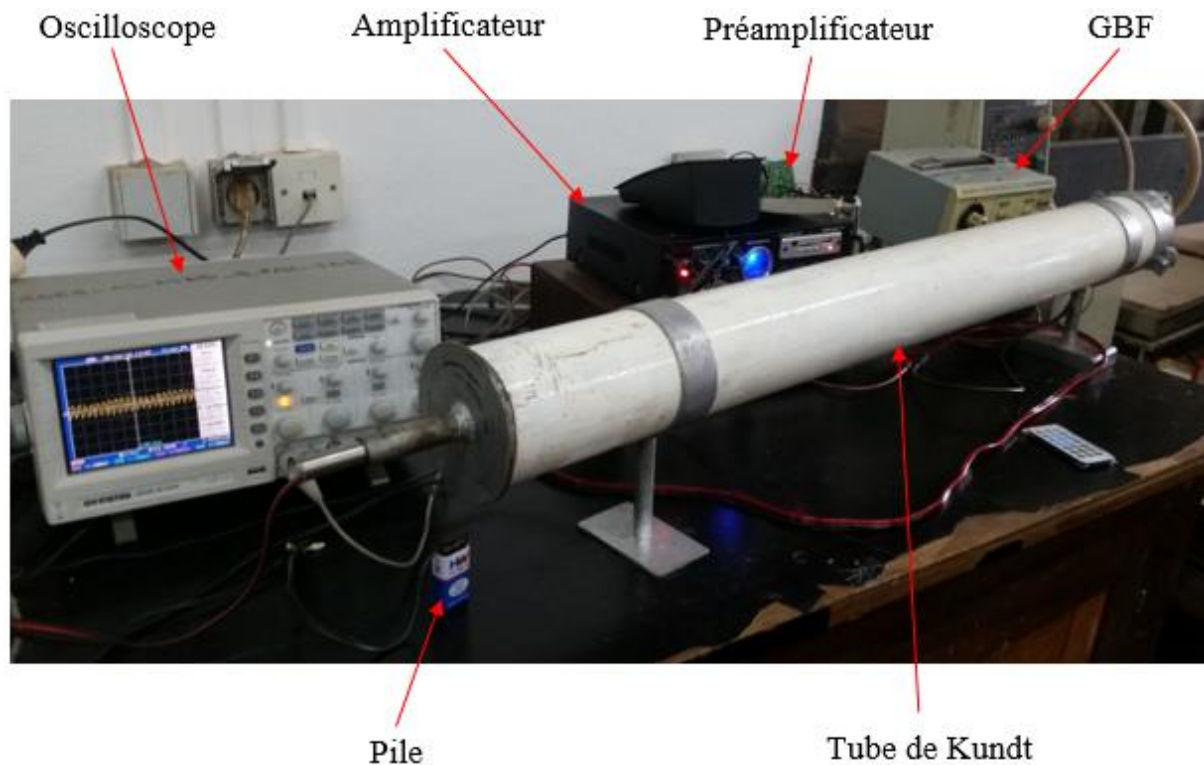
Le montage des différentes pièces constituant le tube Kundt se fait comme suit :

- mise en place du tube cylindrique dans les supports ;
- fixation du haut-parleur à l'une des extrémités du tube ;
- fixation du microphone sur la tige ;
- introduction de la tige avec microphone dans le porte échantillon
- montage de l'ensemble (porte échantillon, tige et microphone) à la seconde extrémité du tube.



**Figure 2. 5 :** tube de Kundt réalisé.

**✚ Mise en place du banc d'acquisition des données**



**Figure 2. 6 :** banc de mesure du coefficient d'absorption et de l'impédance acoustique des matériaux.

Pour l'acquisition des données, il faut :

- placer un échantillon du matériau à tester dans le porte échantillon et le monter dans le tube ;
- mettre l'analyseur de fréquence (oscilloscope) sous tension et le configurer pour les mesures de la bande d'octave ;
- connecter la prise microphone à travers un préamplificateur puis un amplificateur à l'entrée direct de l'analyseur de fréquence ;
- connecter le haut-parleur au générateur de basse fréquence déjà sous tension pour l'émission des ondes sonores ;
- régler le générateur de basse fréquence pour produire des ondes sinusoïdales sur les différentes fréquences de la bande d'octaves ; commencer les mesures en lisant les niveaux maximum et minimum de la tension sur l'analyseur de fréquence grâce au déplacement de la tige à microphone dans le tube (faire attention à ne pas toucher le haut-parleur avec le microphone).

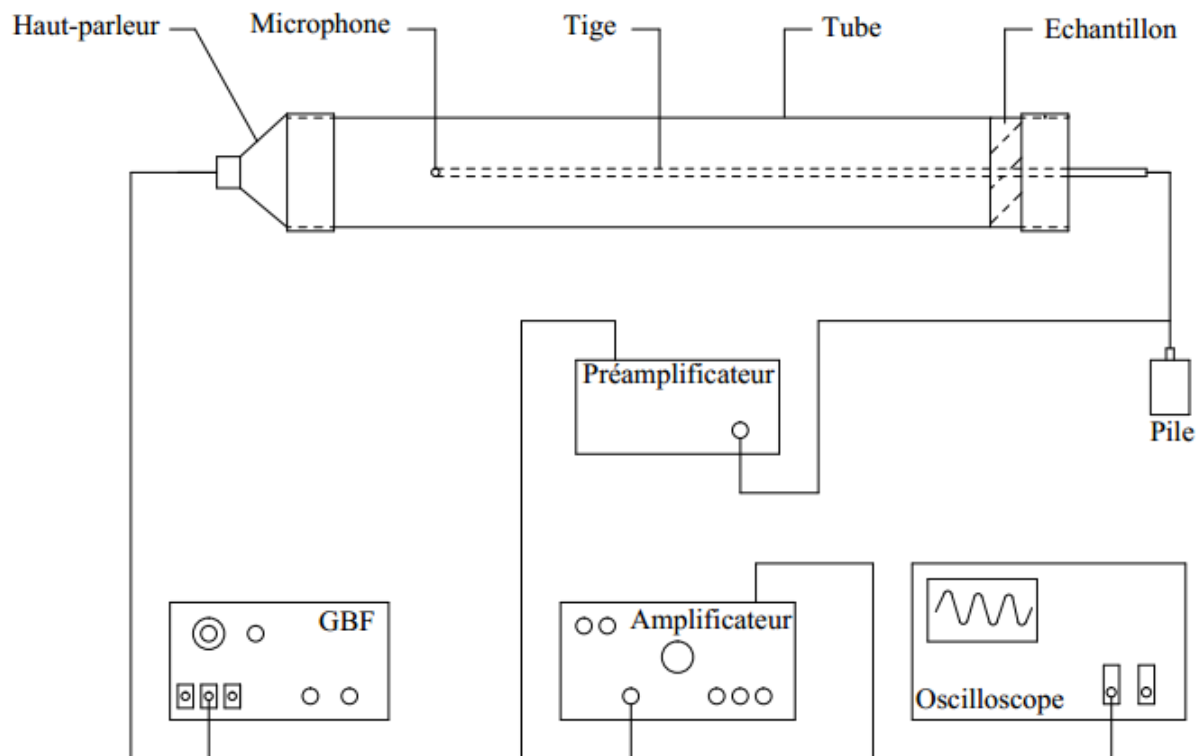


Figure 2. 7 : schéma du banc d'acquisition des données.

### 2.3.3. Choix des matériaux tests

Pour la validation du tube de Kundt réalisé, nous avons choisi trois matériaux dont les propriétés acoustiques sont connues. Il s'agit de la laine de verre, du polystyrène expansé et du bois vernis.

Fabriquée à partir de produits naturels (sable et verre recyclé), la laine de verre est un matériau isolant qui se présente généralement sous la forme d'un matelas plus ou moins souple où l'air est emprisonné de façon immobile par les fibres enchevêtrées [24]. La laine de verre est utilisée pour l'isolation thermique et l'isolation phonique des bâtiments d'habitation ou des bâtiments non résidentiels. Ses caractéristiques lui permettent également d'être employée comme absorbant pour la correction acoustique ou dans la protection contre les incendies.

Le polystyrène quant à lui est constitué d'une mousse blanche et compacte, utilisée le plus souvent comme isolant thermique et comme emballage. Le polystyrène expansé est obtenu à partir de polystyrène cristal auquel on a ajouté, en cours de polymérisation, un agent d'expansion (souvent vapeur d'eau puis pentane). Du point de vue acoustique, il est un matériau peu absorbant.

En ce qui concerne le bois, il est un matériau léger dont les propriétés d'isolation acoustiques ne sont pas très bonnes. La structure du bois épaisse, à surface compacte et lisse n'amortit pas spécialement bien le bruit, ainsi le bois n'est pas non plus un bon matériau absorbant. Pour notre étude, nous avons choisi le bois « Eden ».



(a) laine de verre

(b) polystyrène expansé

(c) bois vernis

**Figure 2. 8 :** échantillons pour la validation du tube de Kundt réalisé.

## Conclusion

Le dispositif retenu pour la caractérisation acoustique des matériaux locaux est le tube de Kundt à microphone unique. Il a donc été réalisé et les trois matériaux que sont : la laine de verre, le polystyrène expansé et le bois vernis ont été identifiés pour évaluer sa performance.

## Chapitre 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

### Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le dispositif de mesure retenu et réalisé, à savoir le tube de Kundt à microphone unique. Ce dernier pourra donc être utilisé pour la détermination du coefficient de réflexion acoustique, du coefficient d'absorption et de l'impédance acoustiques des matériaux. Mais avant, il nous faut procéder à sa validation.

### 3.1. Validation des mesures du coefficient d'absorption des échantillons

#### 3.1.1. Protocole de mesure

Des premières mesures sur des matériaux aux propriétés connues sont indispensables pour tester le dispositif réalisé. Pour cela, nous avons choisi différents matériaux : un (01) matériau absorbant (la laine de verre) ; un (01) matériau très peu absorbant (le polystyrène expansé) et un (01) matériau réfléchissant (le bois vernis).

Suivant les différentes fréquences de la bande d'octave, le coefficient d'absorption de chaque matériau sera déterminé et la courbe de ces coefficients tracée. Cet exercice sera réalisé trois (03) fois et les courbes obtenues pour chaque type de matériau seront superposées afin d'évaluer la répétabilité des mesures avec le tube de Kundt réalisé.

Par suite, la courbe des coefficients d'absorption mesurés pour chaque matériau sera tracée puis comparée à celle des coefficients obtenus dans la littérature.

#### 3.1.2. Mesure des coefficients d'absorption

Avant de procéder aux mesures des coefficients d'absorption des échantillons, évaluons d'abord les performances du tube vide en mesurant ses coefficients d'absorption sans échantillon à l'intérieur. Les valeurs obtenues sont consignées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 3. 1** : coefficient d'absorption du tube vide

<b>Tube vide</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{max}$ (mV)	3280	3180	2900	2260
$U_{mini}$ (mV)	100	80	40	20
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,11</b>	<b>0,09</b>	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>

Après analyse du tableau, nous remarquons que les coefficients d'absorption du tube vide sont très faibles sur la bande de fréquence retenue. Ceci respecte donc la condition selon laquelle le porte échantillon doit être le plus réfléchissant que possible afin que les ondes incidentes émises par le haut-parleur ne soient aussi absorbées par le porte-échantillon lors des mesures.

#### Première série de mesure

**Tableau 3. 2** : coefficient d'absorption de la laine de verre (50 mm)

<b>Laine de verre (50 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{maxi}$ (mV)	3120	3200	2420	820
$U_{mini}$ (mV)	900	880	660	200
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,69</b>	<b>0,67</b>	<b>0,67</b>	<b>0,63</b>

**Tableau 3. 3** : coefficient d'absorption de la laine de verre (25 mm)


<b>Laine de verre (25 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{maxi}$ (mV)	3260	3240	2780	520
$U_{mini}$ (mV)	920	1080	1020	180
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,68</b>	<b>0,75</b>	<b>0,78</b>	<b>0,76</b>

**Tableau 3. 4** : coefficient d'absorption du polystyrène expansé (40 mm)

<b>Polystyrène expansé (40 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{maxi}$ (mV)	3180	3180	3160	1020
$U_{mini}$ (mV)	260	500	620	80
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,27</b>	<b>0,46</b>	<b>0,54</b>	<b>0,26</b>

**Tableau 3. 5** : coefficient d'absorption du bois vernis (35 mm)

<b>Bois vernis (35 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{maxi}$ (mV)	3240	3180	3020	2140
$U_{mini}$ (mV)	280	120	60	20
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,29</b>	<b>0,16</b>	<b>0,07</b>	<b>0,03</b>

 **Deuxième série de mesure**

**Tableau 3. 6** : coefficient d'absorption de la laine de verre (50 mm)

<b>Laine de verre (50 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{maxi}$ (mV)	3140	3200	2440	560
$U_{mini}$ (mV)	860	900	720	200
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,67</b>	<b>0,69</b>	<b>0,70</b>	<b>0,77</b>

**Tableau 3. 7** : coefficient d'absorption de la laine de verre (25 mm)


<b>Laine de verre (25 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{maxi}$ (mV)	3200	3200	3220	600
$U_{mini}$ (mV)	960	1140	1320	200
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,71</b>	<b>0,77</b>	<b>0,82</b>	<b>0,75</b>

**Tableau 3. 8** : coefficient d'absorption du polystyrène expansé (40 mm)

<b>Polystyrène expansé (40 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{maxi}$ (mV)	3210	3200	3120	1060
$U_{mini}$ (mV)	240	460	480	60
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,25</b>	<b>0,43</b>	<b>0,46</b>	<b>0,20</b>

**Tableau 3. 9** : coefficient d'absorption du bois vernis (35 mm)

<b>Bois vernis (35 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{maxi}$ (mV)	3220	3180	3080	2000
$U_{mini}$ (mV)	120	120	80	40
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,13</b>	<b>0,14</b>	<b>0,09</b>	<b>0,07</b>

 **Troisième série de mesure**

**Tableau 3. 10** : coefficient d'absorption de la laine de verre (50 mm)

<b>Laine de verre (50 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{maxi}$ (mV)	3120	3200	2200	740
$U_{mini}$ (mV)	900	980	660	200
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,69</b>	<b>0,71</b>	<b>0,71</b>	<b>0,66</b>

**Tableau 3. 11** : coefficient d'absorption de la laine de verre (25 mm)

<b>Laine de verre (25 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{maxi}$ (mV)	3220	3200	3060	480
$U_{mini}$ (mV)	980	1040	960	160
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,71</b>	<b>0,74</b>	<b>0,72</b>	<b>0,75</b>

**Tableau 3. 12** : coefficient d'absorption du polystyrène expansé (40 mm)

<b>Polystyrène expansé (40 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{maxi}$ (mV)	3280	3160	3140	1120
$U_{mini}$ (mV)	220	440	440	80
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,23</b>	<b>0,42</b>	<b>0,43</b>	<b>0,24</b>

**Tableau 3. 13 :** coefficient d'absorption du bois vernis (35 mm)

<b>Bois vernis (35 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
$U_{maxi}$ (mV)	3280	2640	3160	2280
$U_{mini}$ (mV)	260	100	80	0
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	<b>0,27</b>	<b>0,14</b>	<b>0,09</b>	<b>0</b>

### 3.1.3. Résultat de la répétabilité des mesures

La répétabilité représente l'accord entre les résultats de mesures successives d'une même grandeur effectuées avec la même méthode et les mêmes instruments à des intervalles de temps assez courts (30 secondes dans le cas de notre étude). Elle est évaluée par détermination de l'écart type.

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum(\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{n}} \quad (3.1)$$

Avec :

$\sigma_n$  : l'écart type ;

$\alpha_i$  : le coefficient d'absorption mesuré ;

$\bar{\alpha}$  : la moyenne des coefficients d'absorption ;

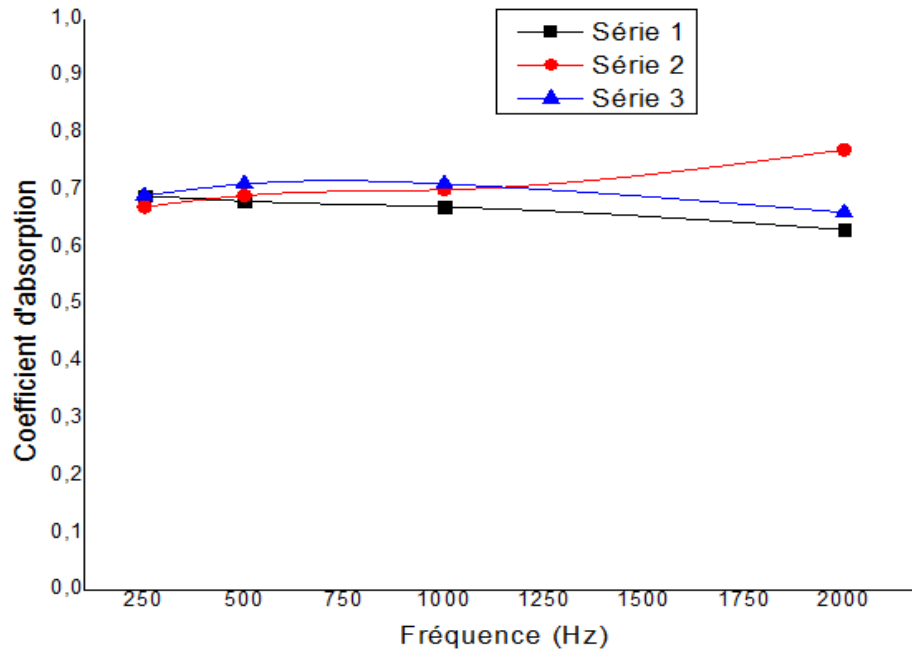
$n$  : le nombre de mesure effectué ( $n = 3$ )

On obtient donc le tableau ci-dessous :

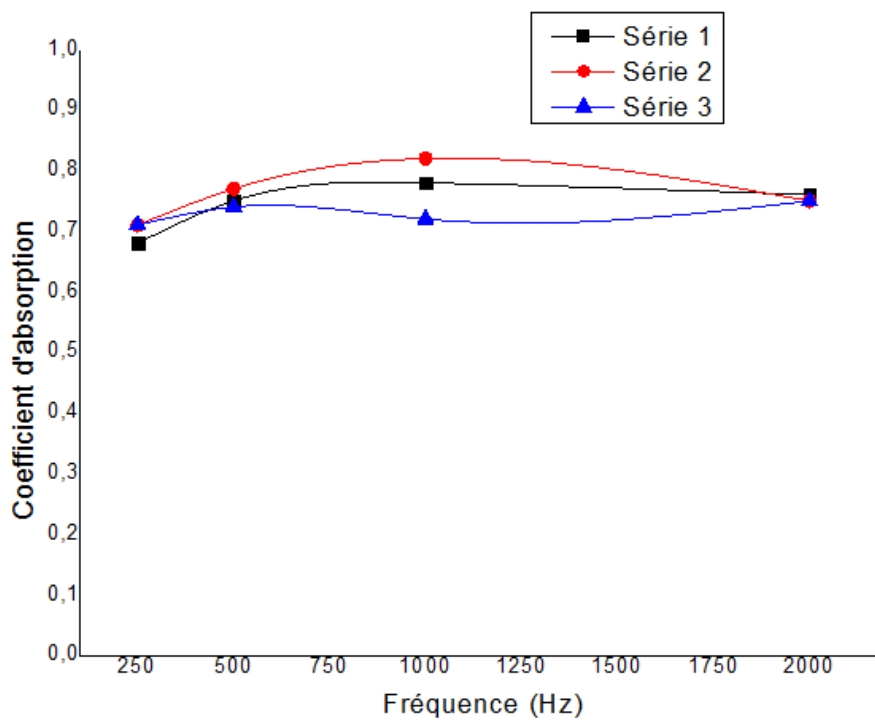
**Tableau 3.14 :** écarts types des coefficients d'absorption mesurés

Fréquences (Hz)	250	500	1000	2000
Laine de verre (50 mm)	0,010	0,016	0,017	0,042
Echantillon A (25 mm)	0,014	0,012	0,041	0,005
Echantillon B	0,016	0,018	0,046	0,025
Echantillon C	0,071	0,011	0,010	0,028

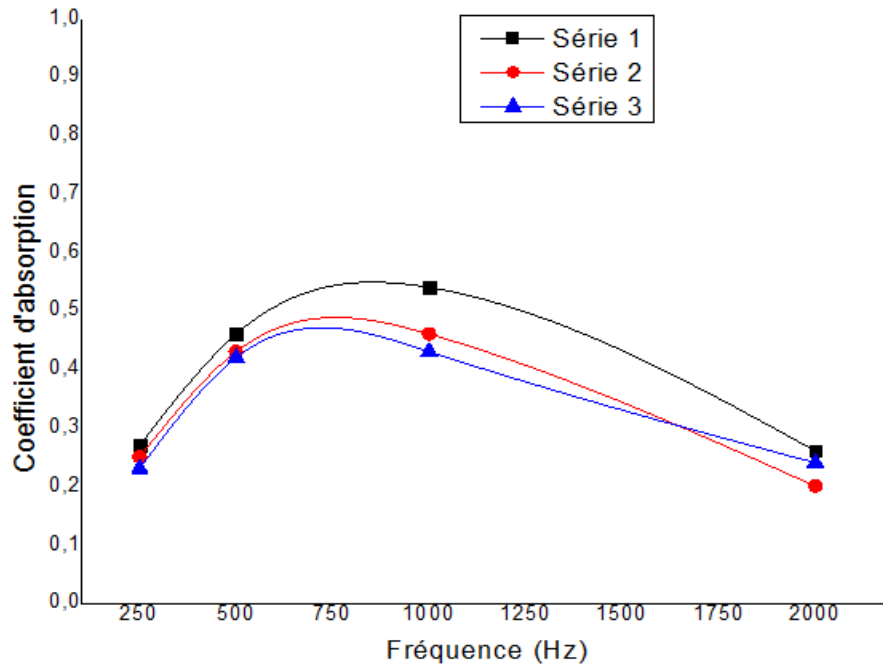
En plus des écarts types calculés, une évaluation graphique de la répétabilité des mesures a été réalisée par superposition des courbes de coefficient d'absorption des trois séries de mesure pour chaque matériau. On obtient ainsi les figures ci-dessous :



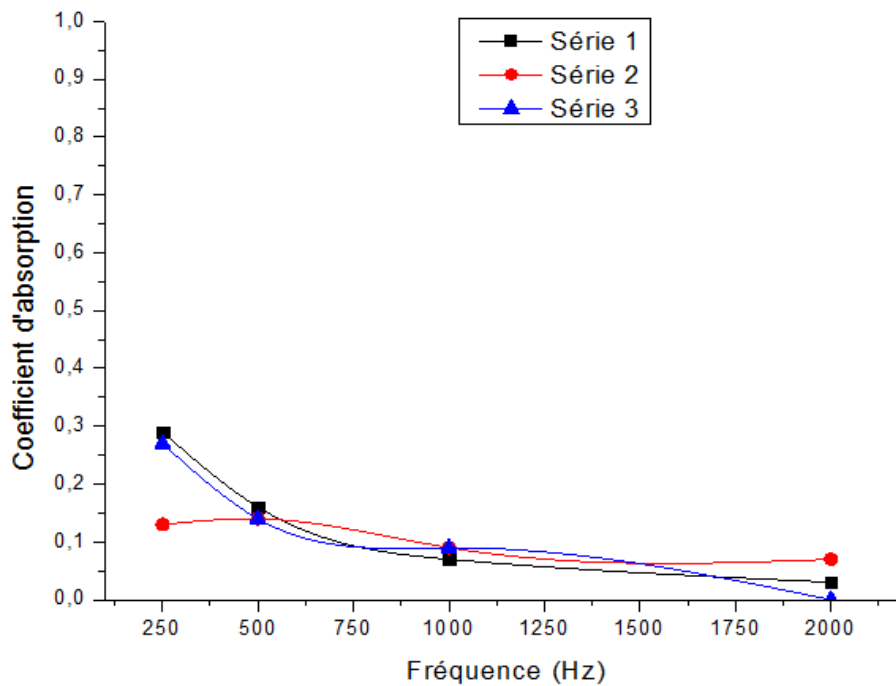
**Figure 3. 1 :** courbe de répétabilité obtenue avec la laine de verre (50 mm)



**Figure 3. 2 :** courbe de répétabilité obtenue avec la laine de verre (25 mm)



**Figure 3. 3 :** courbe de répétabilité obtenue avec le polystyrène expansé (40 mm)



**Figure 3. 4 :** courbe de répétabilité obtenue avec le bois vernis (35 mm)

## Discussion

Un examen rigoureux de la variabilité des résultats obtenus entre les trois séries permet d'affirmer la répétabilité des mesures effectuées avec notre tube de Kundt. Pour preuve, les écarts types calculés sont relativement faibles (majoritairement de l'ordre de 0,01) et on observe une similarité entre les courbes des coefficients d'absorption de la laine de verre (figure 3.1 et 3.2), du polystyrène expansé (figure 3.3) et du bois vernis (figure 3.4). Les écarts de mesure observés sur certaines fréquences peuvent être imputés à des erreurs de manipulation et n'ont pas de réelle influence sur la répétabilité des mesures.

### 3.1.4. Calcul des incertitudes de mesure

L'incertitude de mesure d'une grandeur  $M$ , notée  $\Delta M$ , est un paramètre positif qui permet de définir un intervalle de valeurs «probables» de la grandeur  $M$  dans lequel on a 95% de chance de trouver la «valeur vraie». On parle d'intervalle de confiance à 95%. La qualité d'une mesure sera d'autant meilleure que l'incertitude associée sera petite [20].

Désignons par  $\Delta\alpha$  les incertitudes associées aux différentes mesures effectuées. On a :

$$\alpha = 1 - \left( \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{max} + U_{min}} \right)^2 \quad (3.2)$$

$$\Delta\alpha = \left| \frac{\partial\alpha}{\partial U_{max}} \right| \Delta U_{max} + \left| \frac{\partial\alpha}{\partial U_{min}} \right| \Delta U_{min} \quad (3.3)$$

Où :

$$\frac{\partial\alpha}{\partial U_{max}} = \frac{-4U_{min}(U_{max} - U_{min})}{(U_{max} + U_{min})^3}$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial U_{min}} = \frac{4U_{max}(U_{max} - U_{min})}{(U_{max} + U_{min})^3}$$

$$\Delta U_{max} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{max_i} - \bar{U}_{max})^2}{n(n-1)}}$$

$$\Delta U_{min} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{min_i} - \bar{U}_{min})^2}{n(n-1)}}$$

Avec :

$\alpha$  : le coefficient d'absorption du matériau ;

$U_{max}$  : la tension maximale donnée par l'oscilloscope en  $mV$  ;

$U_{min}$  : la tension minimale donnée par l'oscilloscope en  $mV$  ;

$\Delta\alpha$  : l'incertitude de mesure ;

$\frac{\partial\alpha}{\partial U_{max}}$  : la dérivée partielle du coefficient d'absorption par rapport à la tension maximale ;

$\frac{\partial\alpha}{\partial U_{min}}$  : la dérivée partielle du coefficient d'absorption par rapport à la tension minimale ;

$\Delta U_{max}$  : l'incertitude associée à la mesure de la tension maximale ;

$\Delta U_{min}$  : l'incertitude associée à la mesure de la tension minimale ;

$n$  : le nombre de mesure ( $n = 3$ ).

Ainsi, les incertitudes calculées sont consignées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 3. 15** : incertitudes des coefficients d'absorption acoustique déterminés

Matériau	Coefficient d'absorption	Fréquence			
		250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Laine de verre (50 mm)	$\bar{\alpha}$	0,68	0,76	0,69	0,68
	$\Delta\bar{\alpha}$	0,006	0,02	0,05	0,04
	$\bar{\alpha} \pm \Delta\bar{\alpha}$	<b>0,68 ± 0,006</b>	<b>0,69 ± 0,02</b>	<b>0,69 ± 0,05</b>	<b>0,68 ± 0,04</b>
Laine de verre (25 mm)	$\bar{\alpha}$	0,70	0,86	0,77	0,75
	$\Delta\bar{\alpha}$	0,009	0,02	0,05	0,05
	$\bar{\alpha} \pm \Delta\bar{\alpha}$	<b>0,7 ± 0,009</b>	<b>0,75 ± 0,02</b>	<b>0,77 ± 0,05</b>	<b>0,75 ± 0,05</b>
Polystyrène expansé	$\bar{\alpha}$	0,25	0,43	0,50	0,23
	$\Delta\bar{\alpha}$	0,01	0,01	0,06	0,09
	$\bar{\alpha} \pm \Delta\bar{\alpha}$	<b>0,25 ± 0,01</b>	<b>0,43 ± 0,01</b>	<b>0,47 ± 0,06</b>	<b>0,23 ± 0,09</b>
Bois vernis	$\bar{\alpha}$	0,23	0,14	0,08	0,03
	$\Delta\bar{\alpha}$	0,05	0,02	0,01	0,02
	$\bar{\alpha} \pm \Delta\bar{\alpha}$	<b>0,23 ± 0,05</b>	<b>0,14 ± 0,02</b>	<b>0,08 ± 0,01</b>	<b>0,03 ± 0,02</b>

### 3.1.5. Analyse des coefficients d'absorption mesurés

Dans cette section, la performance du tube de Kundt réalisé est vérifiée en comparant les coefficients d'absorptions mesurés de chaque matériau à ceux obtenus dans la littérature. Ainsi, par superposition des courbes obtenues avec les coefficients

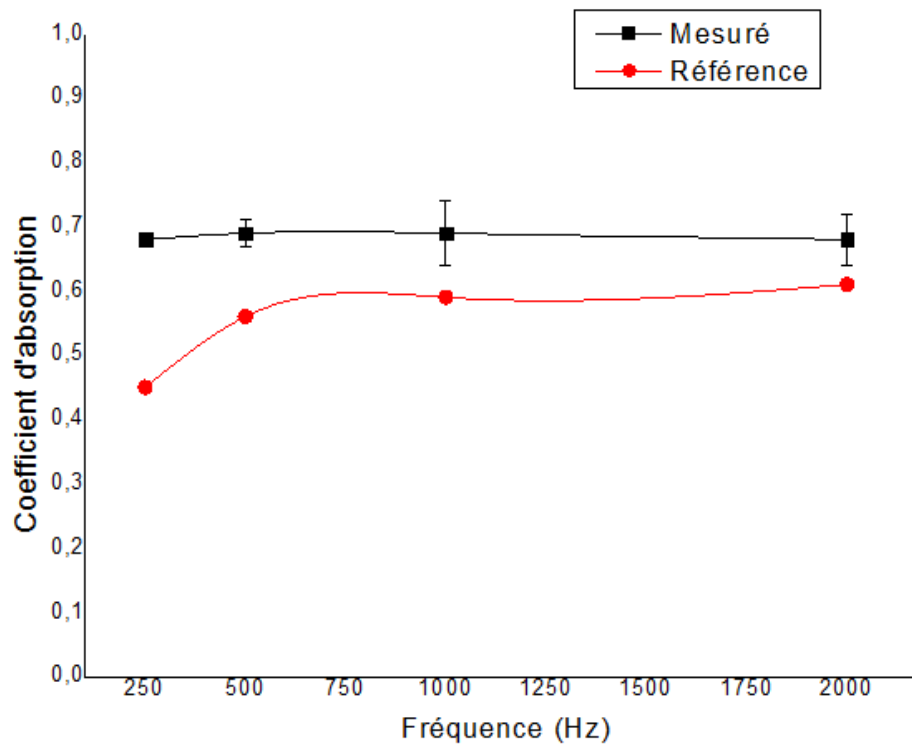
d'absorption mesurés et ceux de la littérature, nous pouvons apprécier la performance de notre tube.

### ✚ Tracé des courbes de validation

D'après la littérature, les coefficients d'absorption des matériaux choisis sont répartis dans les tableaux suivants.

**Tableau 3. 16 :** coefficient d'absorption de la laine de verre (50 mm) [26]

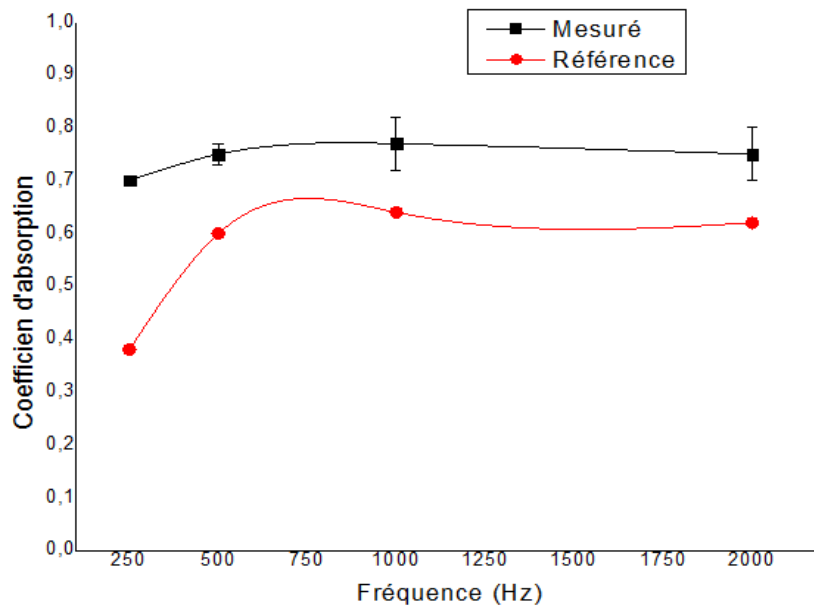
Laine de verre (50 mm)					
Fréquence (Hz)		250	500	1000	2000
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	Référence	0,45	0,56	0,59	0,61
	Mesuré	$0,68 \pm 0,006$	$0,69 \pm 0,02$	$0,69 \pm 0,05$	$0,68 \pm 0,04$



**Figure 3. 5 :** courbe de validation de la laine de verre (50 mm).

**Tableau 3. 17** : coefficient d'absorption de la laine de verre (25 mm) [27]

<b>Laine de verre (25 mm)</b>					
Fréquence (Hz)		250	500	1000	2000
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	Référence	0,38	0,60	0,64	0,62
	Mesuré	$0,7 \pm 0,009$	$0,75 \pm 0,02$	$0,77 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,05$

**Figure 3. 6** : courbe de validation de la laine de verre (25 mm)**Tableau 3. 18** : coefficient d'absorption du polystyrène expansé [28]

<b>Polystyrène expansé</b>					
Fréquence (Hz)		250	500	1000	2000
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	Référence	0,1	0,41	0,33	0,21
	Mesuré	$0,25 \pm 0,01$	$0,43 \pm 0,01$	$0,47 \pm 0,06$	$0,23 \pm 0,09$

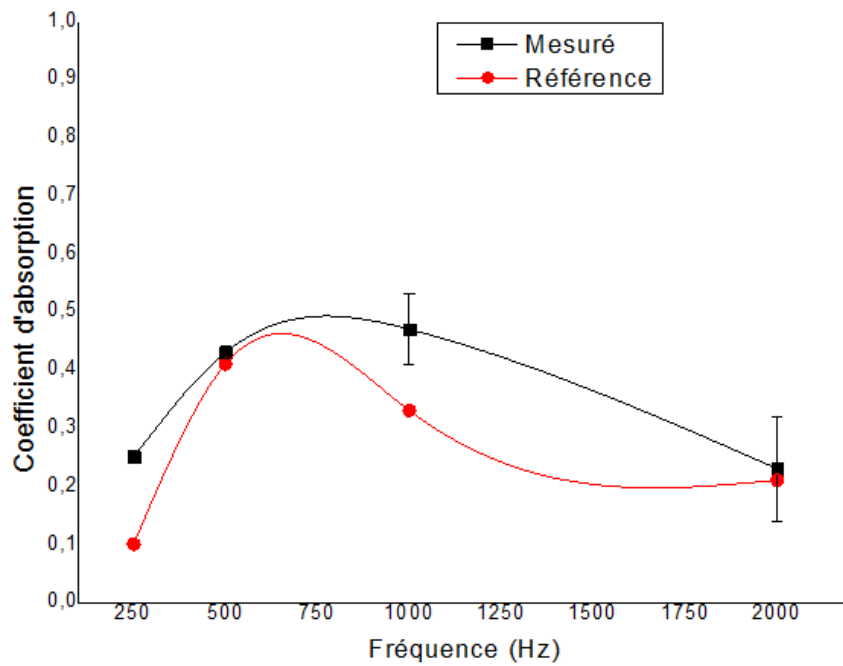
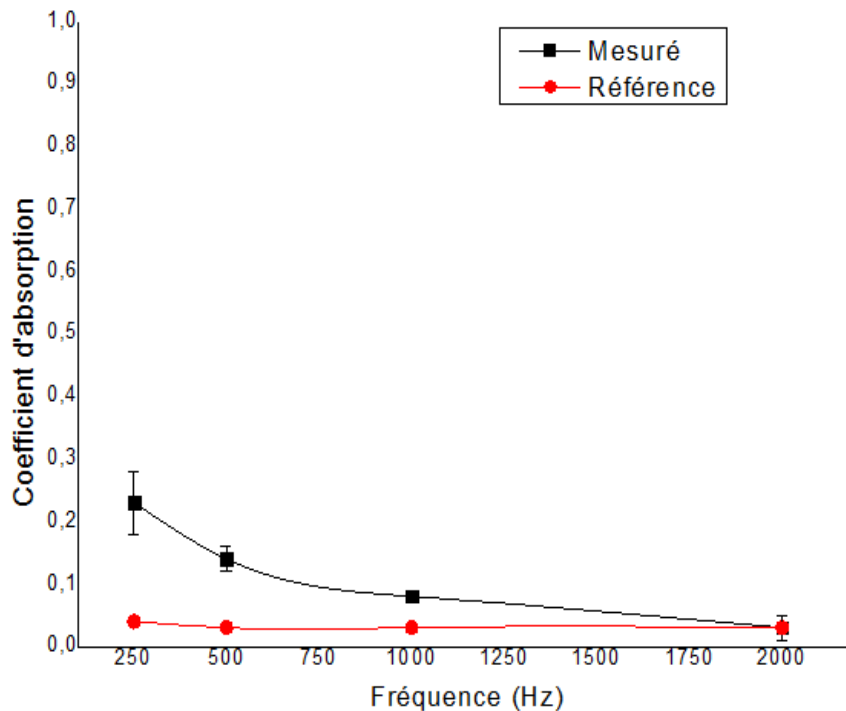


Figure 3. 7 : courbe de validation du polystyrène expansé (40 mm)

**Tableau 3. 19** : coefficient d'absorption du bois vernis [29]

<b>Bois vernis</b>					
Fréquence (Hz)		250	500	1000	2000
Coefficient d'absorption ( $\alpha$ )	Référence	0,04	0,03	0,03	0,03
	Mesuré	0,23 ± 0,05	0,14 ± 0,02	0,08 ± 0,01	0,03 ± 0,02



**Figure 3. 8 :** courbe de validation du bois vernis (35 mm)

### Discussion

Les mesures des coefficients d'absorption acoustique en tube de Kundt sur un échantillon circulaire de laine de verre de 25 mm et 50 mm d'épaisseurs pour un diamètre de 100 mm ont été réalisées. Trois séries de mesures ont été effectuées et la courbe de la moyenne des valeurs obtenues a été tracée et comparée à celle des valeurs de référence de la littérature. Il ressort de ces mesures que la laine de verre est un matériau absorbant puisque les valeurs obtenues tendent vers 1. Néanmoins, la courbe des valeurs mesurées n'est pas identique à la courbe de référence. On remarque que les valeurs mesurées dans la plage de 250 Hz à 500 Hz sont un peu éloignées des valeurs de référence avec une erreur absolue maximale de 0,32 à 250 Hz pour la laine de 25 mm et de 0,23 à 250 Hz pour celle de 50 mm. Au-delà de 500 Hz, les valeurs tendent toutes vers les valeurs de référence. Les écarts de mesures observés s'expliquent par la non-homogénéité du matériau, la difficulté à obtenir une surface parfaitement plane lors de la mise en place de l'échantillon dans son contenant et les erreurs de manipulation.

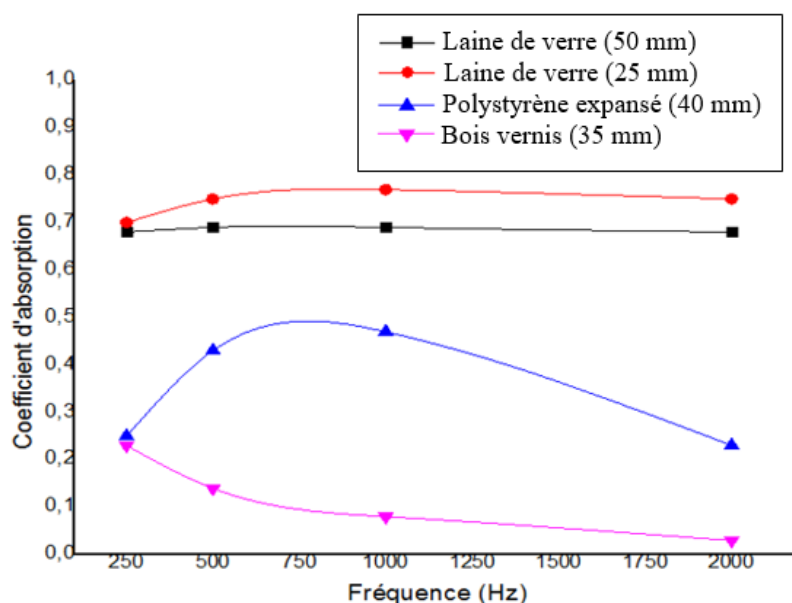
En ce qui concerne le polystyrène expansé, les mesures effectuées semblent être en adéquation avec celles de la littérature sur la plage de fréquence retenue, exception faite de la fréquence de 250 Hz pour laquelle on enregistre une erreur absolue maximale de 0,15.

Contrairement à la laine de verre, le bois vernis est un matériau très peu absorbant du point de vue de l'acoustique[17]. Nous devrions donc obtenir un coefficient de réflexion proche de 1, et par conséquent, un coefficient d'absorption proche de 0. Le tableau 3.18 nous montre des valeurs très proche de 0 au fur et à mesure que les fréquences augmentent. Ce qui conforte l'hypothèse selon laquelle le bois vernis est un matériau réfléchissant. Rapportés aux valeurs de référence, nous constatons que les coefficients d'absorption mesurés sont très proches de celle-ci sauf pour la fréquence de 250 Hz. L'erreur absolue maximale enregistrée à cette fréquence est de 0,19. Les erreurs observées dans ce cas peuvent être attribuées à la direction des ondes incidentes par rapport celle des fibres composant le bois, la nature du bois utilisé (la littérature ne faisant pas spécifiquement cas du bois utilisé) et des erreurs de manipulation.

Malgré les quelques erreurs identifiées, le tube de Kundt réalisé nous permet de catégoriser très spécifiquement différents matériaux en fonction de leur pouvoir absorbant (voir figure 3.9 ci-dessous) sur le plan acoustique et avec des coefficients d'absorption fiables. L'analyse de la figure 3.9 nous permet de classer la laine de verre dans la catégorie des matériaux absorbant, le polystyrène dans la catégorie des matériaux peu absorbant et le bois vernis dans la catégorie des matériaux réfléchissants.

Aussi, il faut noter que toutes les erreurs absolues maximales enregistrées sont obtenues à la fréquence de 250 Hz qui n'est normalement pas dans la plage de fréquence puisque le tube de Kundt réalisé n'est fonctionnel que sur un intervalle de ]255 Hz ; 2035 Hz[.

Tout ceci traduit bien la bonne performance du tube de Kundt réalisé.



**Figure 3. 9 :** classification des matériaux testés

### 3.2. Calcul de l'impédance acoustique des matériaux tests

$$Z = \rho c \frac{1 + R_0}{1 - R_0} \quad (3.3)$$

Avec :

$Z$  : impédance acoustique du matériau test en Ray ;

$\rho$  : masse volumique du matériau test  $\rho = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$  ;

$c$  : célérité du son ( $C = 344 \text{ m.s}^{-1}$ ) ;

$R_0$  : coefficient de réflexion en pression.

Les tableaux ci-dessous renseignent sur les valeurs de l'impédance acoustique des matériaux tests en fonction des fréquences.

**Tableau 3. 20** : impédance acoustique de la laine de verre (50 mm)

<b>Laine de verre (50 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
Impédance acoustique (Rays)	1455,66	1187,04	1428,58	1458,54

**Tableau 3. 21** : impédance acoustique de la laine de verre (25 mm)

<b>Laine de verre (25 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
Impédance acoustique (Rays)	1397,18	888,26	1133,28	1223,04

**Tableau 3. 22** : impédance acoustique du polystyrène expansé (40 mm)

<b>Polystyrène expansé (40 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
Impédance acoustique (Rays)	5543,92	2812,30	2328,51	6009,10

**Tableau 3. 23** : impédance acoustique du bois vernis (35 mm)

<b>Bois vernis (35 mm)</b>				
Fréquence (Hz)	250	500	1000	2000
Impédance acoustique (Rays)	6088,23	10927,87	17376,51	44166,06

**Conclusion**

En utilisant les résultats mesurés pour trois essais de trois différents types de matériaux (laine de verre, polystyrène expansé et bois vernis), quelques différences non appréciables ont été trouvées entre les essais pour chaque matériau. Néanmoins, la grande majorité des mesures effectuées sont voisines des valeurs de référence ; ce qui nous permet de valider le dispositif de tube de Kundt réalisé.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le confort acoustique d'un bâtiment dépend de la nature des matériaux constituant son enveloppe. Il s'avère donc important de caractériser acoustiquement ces matériaux de construction. Cette étude a donc cherché à mettre en place un dispositif de détermination des caractéristiques acoustiques (coefficient d'absorption et impédance acoustiques) des matériaux de construction locaux au Bénin. Une étude bibliographique des différentes méthodes de détermination nous a orienté vers le choix d'une des méthodes les plus utilisées : la méthode de Kundt ; celle-ci nécessitant un dispositif de tube de Kundt à double microphones ou à microphone unique. Seul le tube de Kundt à microphone unique a été réalisé et ses performances ont été évaluées grâce à trois matériaux tests aux propriétés acoustiques différentes que sont : la laine de verre, le polystyrène expansé et le bois vernis. Quarante-huit (48) mesures des coefficients d'absorption de ces matériaux ont été effectuées avec le dispositif réalisé sur une plage de fréquence allant de 250 Hz à 2000 Hz, ce qui nous a permis de catégoriser les trois matériaux. Ainsi, la laine de verre a été reconnue comme un matériau absorbant, le polystyrène expansé comme un matériau partiellement absorbant et le bois vernis comme un matériau réfléchissant. Les valeurs obtenues ont été ensuite comparées à celles de la littérature. Les résultats qui ressortent de cette comparaison nous ont permis d'affirmer la bonne performance du dispositif et par conséquent de le valider.

En acoustique du bâtiment, la gamme de fréquence étant généralement de 100 Hz à 5000 Hz, il serait envisageable de réaliser un tube de Kundt pouvant couvrir cette plage de fréquence. Ceci permettra d'étudier le comportement acoustique des matériaux de construction locaux sur toute la plage de fréquence recommandée. Aussi, faudrait-on penser à l'élaboration d'un logiciel de mesure directe des coefficients de réflexion, d'absorption et de l'impédance acoustiques des matériaux sans prendre par les calculs.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Martin-Houssart G., Rizk C., 2002. *Mesurer la qualité de vie dans les grandes agglomérations*. Etude de l'INSEE PREMIÈRE, n°868, Paris 68 p.
- [2] Roben O., Berry A., Doutré O., 2014. *Mesure du Coefficient d'Absorption des Matériaux Poreux sous Champ Acoustique Diffus Synthétique*, 1891-1897.
- [3] Reinmuth F., 1999. *Climatisation et conditionnement d'air modernes par l'exemple*. Paris, Edition PYCLIVRES, rue Guillemainot, 296 p.
- [4] Bernard GREHANT, 1994 ; *Acoustique et Bâtiment*. Paris, 11, rue Lavoisier – F75384 Paris Cedex 08, 220 p.
- [5] Véronique C., 2005. *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique*. Lyon, École doctorale : Mécanique, Energétique, Génie Civil et Acoustique (MEGA), thèse de doctorat en Génie Civil, 248 p.
- [6] Christophe Cloud ; *Acoustique du Bâtiment et de l'Environnement*, 104 p.
- [7] Xavier V., 2013. *Cours d'acoustique et mécanique ondulatoire*. I.U.P. GDP Option GET, 54 p.
- [8] Manuel VAN DAMME, *Isolation aux bruits aériens : principes et matériaux*. Acoustical Expert – VK Group.
- [9] Masateru K., 2014. *A new high-frequency impedance tube for measuring sound absorption coefficient and sound transmission loss*, 1-12 p.
- [10] Hounghan C. A., 2003. *Caractérisation phonique de matériaux locaux*. Abomey-Calavi, EPAC, Mémoire de DEA Énergétique et Environnement, 101 p.
- [11] Duval A. and al., 2010. *Diffuse field absorption coefficient simulation of porous materials in small reverberation rooms : finite size and diffusivity issues*. Lyon, in proceeding of 10<sup>th</sup> French Acoustic Congress, 1-8 p.
- [12] Takahashi Y., Otsuru T., Tomiku R., 2005. *In situ measurements of surface and absorption coefficients of porous materials using two microphones and ambient noise*. Applied Acoustics 66, 845-865 p.
- [13] Otsuru T. and al., 2009. *Ensemble averaged surface normal impedance of material using an in-situ technique : Preliminary study using boundary element method*. J. Acoust. Soc. Am., 125(6), 3784-3791 p.
- [14] Kuang Z., Ye C., Huang J., 2010. *A method for measuring diffuse-field sound absorption coefficients of materials using parametric loudspeaker*. Tokyo, Vol.31, 6-8, 331-332 p.

- [15] Daniel A. Russell, 1998. *Absorption Coefficients and Impedance*. Journal of the Acoustical Society of America, 77(4) : 1820-1828 p.
- [16] Novak C., Helen U., 2011. *Comparative Study of the ASTM E1050 Standard for Different Impedance Tube Lengths*. Portland, University of Windsor, 1-10 p.
- [17] ISO 354 : 2003, *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.
- [18] C.H. Jeong, 2013. *Converting Sabine absorption coefficients to random incidence absorption coefficients*. J. Acoust. Soc. Am. 133(6), 3951-3962.
- [19] Allard J.F. and al., 2003. *Impedance measurements around grazing incidence for nonlocally reacting thin porous layers*. J. Acoust. Soc. Am., vol. 113 : 1210-1214.
- [20] Halliwell R.E., 1983. *Inter-laboratory variability of sound absorption measurement*, J. Acoust. Soc. Am., 73(3), 880-886.
- [21] Iwase T., Izumi Y., and Kawabata R., 1998. *A new measuring method for sound propagation constant by using sound tube without any air spaces back of the test material*. In Proc. Internoise 98. Christchurch. New Zealand.
- [22] Tremeau A., 2006. *Mesure de l'absorption in situ : réalisation d'un banc de mesure*. Master's thesis, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers.
- [23] Sylvain G., 2008. *Comportement acoustique des revêtements muraux des églises*. Université Poitier, Laboratoire d'Architecture et Acoustique. 44 p.
- [24] Gupta V. B. and Kothari V. K., 1997. *Manufactured Fibre Technology*. Chapman and Hall. London.
- [25] Biansan J-M., Blat S., Nicoules C., Olive J-F., 2017. *Notion d'erreurs et d'incertitudes en sciences expérimentales*. Toulouse, Académie de Toulouse, 10 p.

## WEBOGRAPHIE

- [26] [https://educnet.enpc.fr/pluginfile.php/15558/mod\\_resource/content/2/cours\\_3\\_2\\_salles.pdf](https://educnet.enpc.fr/pluginfile.php/15558/mod_resource/content/2/cours_3_2_salles.pdf). le 24/04/2018 à 16h42.
- [27] [http://sacura.chez.com/materiaux/classement\\_p/absorption\\_accoust.htm](http://sacura.chez.com/materiaux/classement_p/absorption_accoust.htm) ; le 24/04/2018 à 18h13.
- [27] <http://www.kemisol.be/pdf/techdoc%2005%20fr.pdf> ; le 24/04/2018 à 15h25.
- [28] coefficient d'absorption du bois 5 [http://sacura.chez.com/materiaux/classement\\_p/absorption\\_accoust.htm](http://sacura.chez.com/materiaux/classement_p/absorption_accoust.htm) ; le 25/04/2018 à 08h51.

**ANNEXES**

ANNEXE 1 : METHODES DE CARACTERISATION ACOUSTIQUE DES

MATERIAUX

ANNEXE 2 : VALEURS DES COEFFICIENTS D'ABSORPTION DE QUELQUES

MATERIAUX

## ANNEXE 1 : METHODES DE CARACTERISATION ACOUSTIQUE DES MATERIAUX

Les différentes méthodes employées pour la détermination du coefficient d'absorption sont inventoriées dans l'arbre ci-dessous.

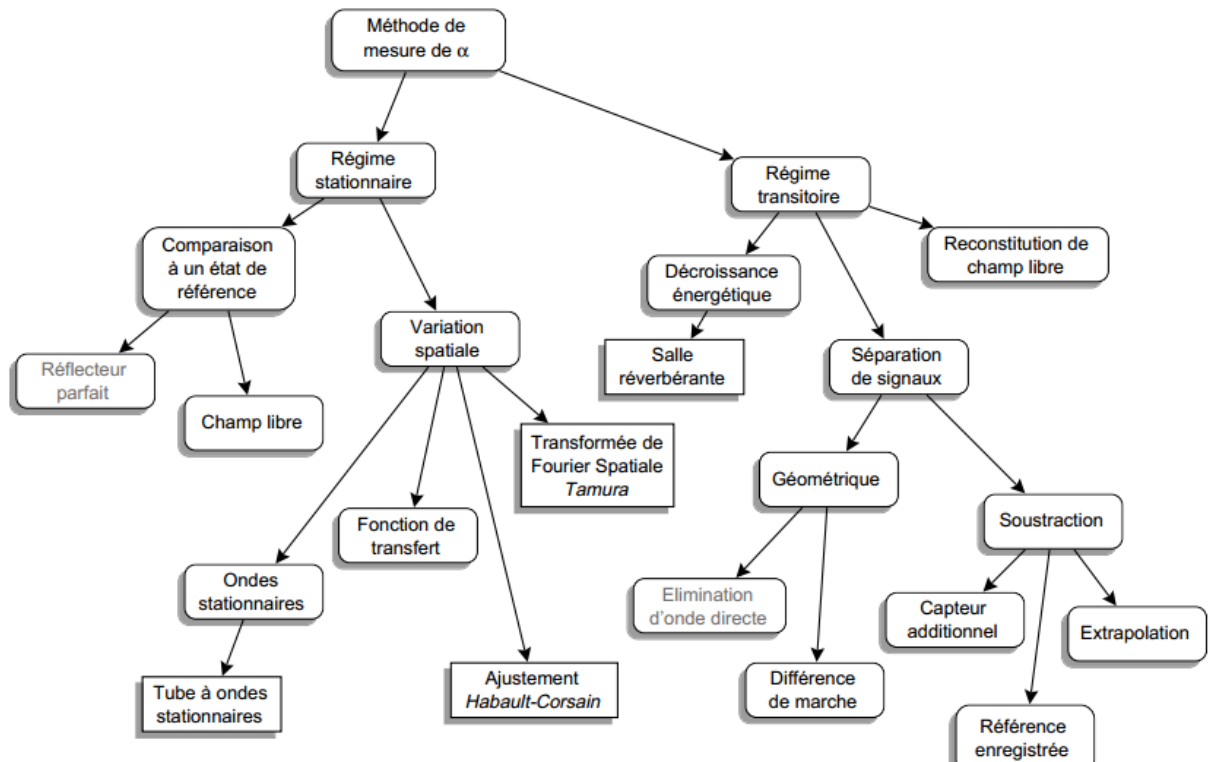


Figure 1.4 : arbre des méthodes de mesure d'absorption des matériaux [10].

### ✚ Régime stationnaire

Pour cette catégorie de méthodes, le champ acoustique ne varie pas sur la durée de la mesure. Les méthodes décrites dans cette partie nécessitent au moins deux mesures, soit en deux points différents, soit pour deux matériaux différents.

#### ❖ Comparaison à un état de référence

##### • Méthode de pression pariétale (réflecteur parfait)

Proposé par Ingard et Bolt en 1951, elle se déroule en champ libre. Un microphone est placé de telle sorte que sa membrane se trouve à la surface de l'échantillon du matériau testé. Celui-ci est soumis à un champ acoustique plan. La pression mesurée est comparée à celle que l'on obtient dans la même configuration, mais avec cette fois une paroi supposée parfaitement réfléchissante, ce qui permet de déduire le coefficient de réflexion complexe  $R$ . L'angle d'incidence est quelconque. Cette méthode ne semble pas avoir été reprise.

- **Réponse en champ libre : mesure d'excès atténuation**

En extérieur, pour une distance source récepteur donnée, une première mesure de spectre est effectuée à très grande hauteur par rapport au matériau, de telle sorte que la condition de champ libre soit reconstituée. Par ailleurs, la deuxième mesure est effectuée cette fois en incidence fortement oblique et permet, associée à la première, de calculer l'excès d'atténuation. Cette caractéristique est donnée à l'entrée d'un algorithme d'optimisation couplé à un modèle de propagation, l'ensemble permettant de remonter à l'impédance (Nocke et al, 1997).

- ❖ **Variation spatiale**

- **Méthode du tube à onde stationnaire**

La création d'un champ acoustique plan à l'intérieur d'un guide d'ondes engendre l'apparition d'ondes stationnaires, dont les caractéristiques dépendent des terminaisons mises en place. Ceci définit le principe de la célèbre méthode du tube à ondes stationnaires encore appelé tube de Kundt.

Un tuyau d'axe rectiligne et de section constante est terminé à une extrémité par la membrane d'un haut-parleur et l'autre par un échantillon de matériau à tester. Le relevé du taux d'ondes stationnaires permet d'accéder au coefficient de réflexion  $R$ , en incidence normale. Cette méthode est l'une des deux plus répandues à l'heure actuelle, et fait l'objet de plusieurs normes et standards : ISO 10534-2; ASTM E1050-12.

Il est aussi possible, dans un tube à ondes stationnaires, de déterminer l'impédance acoustique de la terminaison à partir de l'évaluation de la fonction de transfert entre deux points d'observation fixes, sur une droite parallèle à l'axe du tube (Blaser, 1980), (Fahy, 1984).

Enfin, une version portable a été proposée, permettant ainsi des mesures in situ car non destructive (Syed, 1985). Elle ne s'est pas répandue jusqu'à présent parce qu'il est extrêmement difficile de réaliser l'étanchéité du tube à l'extrémité qui est en contact avec le matériau testé par la simple application d'un effort normal à sa surface.

- **Méthode de fonction de transfert**

En se donnant un modèle de propagation au-dessus d'une paroi inconnue, il est possible d'accéder à ses propriétés d'absorption par inversion du modèle, à partir de la mesure de la pression acoustique en plusieurs points. On en choisit en général deux sur

une perpendiculaire à la paroi, on parle alors de doublet microphonique, de la même manière que dans un guide d'ondes.

Toujours dans le même but, il est tout à fait possible de mesurer une fonction de transfert sur une parallèle à la surface (Legeay et Seznec, 1983), (Wilken et Wempen, 1986), (Wempen et Mellert, 1990). Cette mesure permet donc des déterminations à incidence quelconque.

- **Méthode par ajustement**

Sur la base d'un modèle de propagation dépendant des caractéristiques d'absorption du matériau testé, on peut procéder par ajustement des paramètres du modèle à partir de relevés de pression en quelques points. Habault et Corsain en 1985 ont exploré cette piste en extérieur, en recourant à un algorithme des moindres carrés non linéaires.

- **Méthode de la transformée de Fourier Spatiale**

En onde sphériques, à partir du relevé de la pression sur deux maillages situés chacun dans un plan parallèle à l'échantillon évalué, il est possible d'accéder au coefficient de réflexion R en effectuant une décomposition en ondes planes et en travaillant dans l'espace des nombres d'onde, via l'utilisation de la transformation de Fourier spatiale (Tamura, 1990), (Tamura et al, 1995).

### Régime transitoire

Cette fois, la mesure implique l'observation d'une variation de la pression acoustique sur une durée finie, en un ou plusieurs points fixes.

- ❖ **Décroissance de l'énergie (méthode de mesure en chambre réverbérante)**

La décroissance de l'énergie acoustique dans une salle, une fois toutes les sources éliminées, est liée à l'absorption créée par les parois. En condition de champ diffus, il est possible de mesurer le coefficient d'absorption d'un échantillon en mesurant la différence de la durée de réverbération dans une salle, en présence et en l'absence de l'échantillon testé. C'est ce que réalise la méthode en chambre réverbérante. Elle a fait l'objet d'une normalisation ISO354 ; ASTM C423.

- **Méthode de séparation de signaux**

Le principe de cette méthode repose sur l'envoi d'une onde vers la paroi à tester, assorti de la séparation de l'onde incidente et de l'onde réfléchi. Il est possible de la décliner en trois variantes, selon le procédé qui a été retenu pour séparer les ondes directe et réfléchi.

- **Elimination de l'onde directe**

Cremer présente une méthode où la géométrie de la salle de mesure empêche toute autre onde que celle qui est réfléchi par la paroi testée de parvenir au point d'observation, du fait de la présence d'un panneau absorbant additionnel, dans une chambre anéchoïque. On obtient le coefficient de réflexion  $R$  par comparaison entre l'onde réfléchi par le matériau testé et celle que renvoie un matériau de référence supposé parfaitement réfléchissant (Cremer et Müller, 1978).

- **Différence de marche et troncature**

La disposition des troncatures impliquées dans la mesure est choisie de telle sorte que le signal réfléchi arrive avec un retard suffisamment important par rapport au signal transitoire direct pour qu'ils soient tous deux séparables par simple troncature de l'enregistrement. La première mise en œuvre de cette approche a été réalisée par Von Spandöck avec des salves sinusoïdales reproduite par haut-parleur en guise d'excitation (Spandöck, 1934).

- **Séparation par soustraction**

Les méthodes de séparation géométrique imposent des différences de marche importantes entre ondes incidente et réfléchi, au point d'être inapplicable en condition in situ, en dehors des hautes fréquences. Une manière de revenir à des valeurs plus raisonnables consiste à remplacer l'opérateur de troncature par celui de soustraction.

#### **Soustraction par capteur additionnel**

Une solution naturelle à ce problème peut être apportée par un capteur additionnel, disposé dans la salle d'expérience de telle sorte qu'il capte une copie de l'onde incidente, identique à celle reçue par le capteur principal, situé à proximité de la paroi. Cette amélioration a été mise en œuvre en intérieur par Yusawa en 1975, Le Louer et al en 1993, et en extérieur par Cramond et Don en 1984. La difficulté réside dans l'obtention d'une impulsion identique en deux points suffisamment différents pour une position de source constante, du fait entre autres de problème de directivités des sources.

#### **Soustraction à l'aide d'une référence enregistrée**

Pour contourner l'obstacle de la directivité, on peut procéder différemment. Il suffit d'effectuer une mesure en deux temps avec un seul récepteur, à configuration source – récepteur fixe. L'une est la mesure normale, l'autre est obtenue en l'absence de la réflexion, soit en retirant la paroi de la salle de mesure, soit en effectuant la mesure en un autre endroit, en salle anéchoïque par exemple. Davies et Mulholland appliquent cette procédure à leur mesure à base d'impulsions (Davies et Mulholland, 1979), Hollin et Jones utilisent, quant à eux, un haut-parleur et procèdent par corrélation (Hollin et Jones, 1977).

En voulant s'affranchir de la directivité des sources utilisées au moyen de la procédure définie au paragraphe précédent, on se trouve bien rapidement confronté à une autre difficulté tout aussi sérieuse, celle de la répétabilité du signal de test. L'expérience montre que les sources impulsionnelles sont défailtantes en la matière.

#### ❖ **Reconstitution du champ libre**

A l'initiative de Vigran et Lundeby a commencé d'explorer les possibilités d'une méthode inspirée de celle du doublet microphonique en champ libre, où les premières étapes consistent à réaliser une acquisition des réponses impulsionnelles, puis à appliquer des fenêtres sur celles-ci. Ce qui rattache cette méthode aux méthodes en régime transitoire, de manière à recréer les conditions de champ libre. Malheureusement les premiers résultats ont été particulièrement décevants (Lundeby, 1995).

## ANNEXE 2 : VALEURS DES COEFFICIENTS D'ABSORPTION DE QUELQUES MATERIAUX

Matériaux	Nature et composition	Indice (a) d'absorption acoustique du matériau en fonction des fréquences					
		125H	250H	500H	1kH	2kH	4kH
		Z	Z	Z	Z	Z	Z
<b>TENTURES - RIDEAUX - TISSUS</b>							

Draperie	coton contre mur	0.04	0.05	0.11	0.18	0.3	0.44
Tissus	posé sur mousse de 5 ou 10mm (décoratif)	0.13	0.16	0.17	0.24	0.44	0.53
Draperie	coton, plis serrés	0.1	0.38	0.5	0.85	0.82	0.67
Feutre	25 mm collé	0.12	0.25	0.50	0.63	0.65	0.60
Feutre	e = 12mm, flottant	0.17	0.24	0.35	0.50	0.65	0.65
Décors	(scène) tentures légères en cretonne	0.05	0.15	0.15	0.15	0.10	0.05
Rideaux	velours mince, plis simples	0.08	0.30	0.50	0.50	0.60	0.60
Rideaux	velours épais, double plis	0.50	0.50	0.70	0.90	0.90	0.92
Rideaux	coton	0.10	0.20	0.40	0.50	0.65	0.60
Rideaux	velours 350g/m <sup>2</sup> tendu contre mur	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.37
Rideaux	velours 500g/m <sup>2</sup> , drapés à 50%	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
Rideaux	très lourds, 625g/m <sup>2</sup> , drapés à 50%	0.14	0.35	0.55	0.72	0.70	0.65
Rideaux	à 90mm du mur	0.06	0.10	0.38	0.63	0.70	0.73
Velours	à 100 mm du mur	0.09	0.33	0.45	0.52	0.50	0.44
Velours	à 200 mm du mur	0.12	0.36	0.45	0.52	0.50	0.44
Laine	de lin	0.09	0.18	0.48	0.73	0.50	0.33
Moleton	tendu	0.50	0.57	0.48	0.35	0.28	0.20
Tissus	posé sur mousse de 20mm (décoratif)	0.35	0.40	0.43	0.52	0.53	0.57

<b>BOIS et DERIVES du BOIS</b>		125H	250H	500H	1kH	2kH	4kH
		Z	Z	Z	Z	Z	Z
Panneaux Lin	en diaphragme (50mm du mur)	0.70	0.80	0.05	0.40	0.35	0.30
Contreplaqué	e = 6mm (à 50mm du mur)	0.60	0.40	0.35	0.12	0.08	0.08
Contreplaqué	poli et verni, e=8mm à 200mm du mur	0.04	0.15	0.08	0.05	0.03	0.03

Contreplaqué	e = 5mm à 20mm du mur	0.07	0.12	0.28	0.11	0.08	0.08
Contreplaqué	e = 5mm à 50mm du mur	0.12	0.20	0.08	0.08	0.07	0.02
Contreplaqué	e = 5mm à 50mm mur + laine minérale	0.25	0.40	0.30	0.15	0.16	0.08
Contreplaqué	e = 3mm à 50mm du mur	0.20	0.28	0.26	0.09	0.12	0.11
Panneaux	(Klégecel) à 80mm du mur + laine minérale	0.53	0.58	0.35	0.35	0.25	0.20
Isorel	mou (e = 15mm) collé	0.10	0.15	0.30	0.52	0.65	0.62
Bois	verniss	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Bois	revêtement bois de 5cm, collé sur mur	0.10	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04
Panneaux	fouurrures 5kg/m <sup>2</sup> - e=8mm à 3cm mur	0.25	0.22	0.04	0.03	0.03	0.08
Panneaux	fouurrures 5kg/m <sup>2</sup> - e=8mm à 5cm mur	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
Panneaux	fouurrures 10kg/m <sup>2</sup> e=16mm à 5cm mur	0.18	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07
Panneaux fibres	perfora. borgne, e=12mm, vide d'air	0.48	0.41	0.57	0.96	0.89	0.59
Panneaux fibres	perfora. borgne, e=12mm, collé paroi	0.12	0.21	0.59	0.74	0.82	0.74

Matériaux	Nature et composition	Indice (a) d'absorption acoustique du matériau en fonction des fréquences					
		125H	250H	500H	1kH	2kH	4kH
		Z	Z	Z	Z	Z	Z

Panneaux fibres	trous 4mm, l=2cm, es=13mm, sur mur	0.07	0.22	0.47	0.53	0.67	0.51
Panneaux fibres	trous 4mm, l=2cm, es=13mm, à 25mm mur	0.21	0.45	0.71	0.52	0.69	0.50
Panneaux fibres	trous 5mm, esp. 14mm, 66mm mur+ laine min	0.13	0.73	0.85	0.72	0.72	0.51
Isorel	mou, e = 12mm, fixé sur mur	0.06	0.11	0.33	0.40	0.40	0.43
Isorel	dur, e = 12mm, diaphragme à 50mm du mur	0.32	0.15	0.09	0.09	0.09	0.09

### MATERIAUX POREUX

125H 250H 500H 1kH 2kH 4kH

		Z	Z	Z	Z	Z	Z
Fibres de roche	projeté (e = 25mm)	0.20	0.55	0.60	0.60	0.60	0.60
Fibres de verre		0.25	0.32	0.65	0.70	0.73	0.80
Fibres de verre	panneaux (e = 30mm)	0.08	0.31	0.80	0.97	0.99	1.00
Aggloméré	projection billes polyst. + résine (e = 10mm)	0.03	0.04	0.05	0.14	0.32	0.75
Laine de roche	250 kg/m <sup>3</sup> -15mm projeté métal déployé	0.15	0.16	0.25	0.35	0.35	0.35
Laine de verre	e = 25mm	0.15	0.38	0.6	0.64	0.62	0.62
Laine de verre	projeté (e = 10mm)	0.06	0.09	0.13	0.19	0.25	0.31
Laine de verre	50mm et recouverte de toile poreuse	0.35	0.45	0.56	0.80	0.60	0.55
Laine minérale	r = 100 kg/m <sup>3</sup> / e = 50 mm	0.27	0.62	0.88	0.93	0.81	0.76
Laine minérale	isover (25 mm)	0.43	0.51	0.57	0.62	0.65	0.67
Laine de lin		0.09	0.18	0.45	0.72	0.50	0.33
Marbres	surface polie	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Mousse	urée formol (r = 6 kg/m <sup>3</sup> / e=20mm)	0.14	0.19	0.3	0.62	0.8	0.72
Pierres	poli	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Plâtre	plâtre lissé	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07
Plaque plâtre	e=10mm+40mm laine min.à 0,10m mur	0.30	0.20	0.10	0.10	0.05	0.10
Vermiculite		0.31	0.34	0.50	0.75	0.80	0.85
Brique perforée	1500 trous/m <sup>2</sup> + 9mm laine minérale	0.09	0.71	0.74	0.58	0.37	0.29
<b>BETONS et ENDUITS</b>							
		<b>125H</b>	<b>250H</b>	<b>500H</b>	<b>1kH</b>	<b>2kH</b>	<b>4kH</b>
		<b>Z</b>	<b>Z</b>	<b>Z</b>	<b>Z</b>	<b>Z</b>	<b>Z</b>
Béton	brut décoffrage et non peint	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
Béton	lisse	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.07
Béton	très lisse et peint (vernis, laque)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Enduit	ciment lissé	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Enduit	plâtre	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
Enduit	chaux et au sable sur métal déployé	0.04	0.05	0.06	0.08	0.04	0.06
Enduit	crépi	0.01	0.03	0.04	0.05	0.08	0.17
Enduit	à la chaux sur lattis bois	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05

<b>PAROIS REFLECHISSANTES</b>		<b>125H</b>	<b>250H</b>	<b>500H</b>	<b>1kH</b>	<b>2kH</b>	<b>4kH</b>
		<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>
Vitre		0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02

<b>LIQUIDES</b>		<b>125H</b>	<b>250H</b>	<b>500H</b>	<b>1kH</b>	<b>2kH</b>	<b>4kH</b>
		<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>
Eau		0.01	0.01	0.01	0.01 5	0.02	0.02 5
<b>Matériaux</b>	<b>Nature et composition</b>	Indice (a) d'absorption acoustique du matériau en fonction des fréquences					
		<b>125H</b>	<b>250H</b>	<b>500H</b>	<b>1kH</b>	<b>2kH</b>	<b>4kH</b>
		<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>

### **SPECTATEURS et MOBILIERS**

Personnes	Adulte	0.20	0.30	0.39	0.43	0.47	0.47
Enfant	Adolescent	0.19	0.20	0.33	0.38	0.42	0.40
Enfant	enseignement primaire	0.17	0.40	0.42	0.42	0.33	0.26
Personnes	Adulte dans un fauteuil	0.28	0.30	0.42	0.45	0.45	0.48
Auditoire	assis (sièges de théâtre)	0.20	0.33	0.38	0.46	0.40	0.04
Auditoire	assis (bancs d'église)	0.20	0.25	0.31	0.35	0.33	0.35
Fauteuil	recouvert de tissus plastique	0.14	0.23	0.35	0.39	0.30	0.28
Fauteuil	recouvert de tissus épais	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
Sièges	bois simple	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06
Sièges	à ressort (siège+dossier en tissus)	0.25	0.31	0.33	0.34	0.35	0.32
Sièges	théâtre (confortablement rembourrés)	0.25	0.32	0.28	0.31	0.33	0.30
Strapontins	encontrplaqués (position relevée)	0.15	0.13	0.15	0.12	0.06	0.06
Fauteuil	revêtu de velours	0.14	0.23	0.35	0.39	0.5	0.55
Sièges	siège dur, vide sur planchers bois	0.15	0.20	0.25	0.30	0.25	0.20
Fauteuil	très rembourrés, vide sur moquette	0.20	0.25	0.35	0.40	0.30	0.30
Tissus épais	sièges	0.40	0.60	0.80	0.88	0.82	0.70

<b>REVETEMENTS DE SOLS</b>		<b>125H</b>	<b>250H</b>	<b>500H</b>	<b>1kH</b>	<b>2kH</b>	<b>4kH</b>
		<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>	<b>z</b>
Tapis	doublé	0.1		0.25		0.4	
Tapis	non doublé	0.08		0.15		0.25	

Tapis	e = 11mm, posé sur béton	0.09	0.06	0.24	0.24	0.24	0.11
Tissus de coton	plissé de moitié (475 g/m <sup>2</sup> )	0.07	0.31	0.49	0.81	0.66	0.54
Tissus de coton	plissé au 7/8	0.03	0.12	0.15	0.27	0.37	0.42
Tapis	tapis, type SOMMER	0.02	0.04	0.07	0.14	0.25	0.37
Tapis	tapis, type SOMMER velours	0.03	0.07	0.18	0.32	0.62	0.68

**FIBRES AGGLOMERES "'Héraclith"**

		125H	250H	500H	1kH	2kH	4kH
		Z	Z	Z	Z	Z	Z
Plaque (25mm)	collée sur mur	0.025	0.04	0.21	0.55	0.72	0.82
Plaque (25mm)	collée à 20mm du mur	0.02	0.09	0.16	0.62	0.65	0.9
Plaque (25 mm)	collée à 20mm du mur+10mm plâtre perforé	0.07	0.21	0.58	0.37	0.3	0.2
Plaque (25mm)	à 30mm du mur + léger crépi au mortier	0.02	0.12	0.44	0.45	0.39	0.49
Plaque (25mm)	à 30mm du mur + papier collé	0.12	0.32	0.32	0.29	0.30	0.30
Plaque (25mm)	30 mm du mur+bande papier 1cm esp.26cm	0.03	0.54	0.45	0.39	0.38	0.36
Plaque (25mm)	à 30 mm du mur + enduit poreux 10mm	0.14	0.42	0.46	0.44	0.49	0.55
Fibres de bois	("Fibralith") e = 30mm, enrobées de ciment		0.18	0.3	0.67	0.61	

Matériaux	Nature et composition	Indice (a) d'absorption acoustique du matériau en fonction des fréquences					
		125H	250H	500H	1kH	2kH	4kH
		Z	Z	Z	Z	Z	Z
<b>FAUX- PLAFONDS</b>							
		125H	250H	500H	1kH	2kH	4kH
		Z	Z	Z	Z	Z	Z
Dalles fibres	fibres de roche micro perforées (e = 16mm)	0.52	0.43	0.68	0.95	0.82	0.74
Dalles satff	staff perforé + absorbant avec kraft		0.23	0.46	0.77	0.88	
Dalles	fibres de verre et résine, granité (e	0.10	0.45	0.85	0.70	0.60	0.50

fibres	= 18mm)						
Dalles fibres	fibres minérales (perforation et fissuration)	0.37	0.40	0.62	0.82	0.86	0.88
Lames	lames aluminium 5/10, espace 15 à 25mm	0.72	0.51	0.65	0.80	0.60	0.50