



UNIVERSITÉ DE NICE SOPHIA ANTIPOLIS

PROJET TUTEURÉ DE LICENCE DE PHYSIQUE

ANNÉE 2018

Acoustique des salles

Auteurs:

Dominique MARASCO
Thibaud DE GAULMYN
Pape souleman LO

Encadrants:

Olivier LEGRAND
Valérie DOYA

Projet réalisé au *laboratoire de la matière condensée de Nice*



May 21, 2018

Sommaire

1	Introduction	1
1.1	Présentation du sujet.	1
1.2	Problématique soulevée.	1
2	les théories acoustiques	3
2.1	La réverbération	3
2.2	Loi et absorption des salles	4
2.2.1	Equation Eyring-Norris et sabine	4
2.2.2	Coefficients d'absorption	5
3	Les modes d'une salle	6
3.1	Fréquence de résonance	6
3.1.1	Analyse résonance	7
3.2	Recouvrement modal	7
4	Résultats expérimentaux	9
4.1	Matériels utilisés	9
4.2	Analyse spectrale	9
4.2.1	Protocole	10
4.2.2	Mesure du signal	10
4.3	Analyse des résultats	11
4.3.1	Modes de résonances	11
4.3.2	Bande passante	11
4.4	Prochaines mesures	12
5	Conclusion	13
	Annexes	2
	Annexe 1	2
0.1	Spectre	2
0.2	Démonstration de la formule de la densité modale	3

Chapitre 1

Introduction

1.1 Présentation du sujet.

Dans notre rapport, nous présentons les principaux outils permettant de décrire le comportement acoustique dans une boîte que nous aurons conçu à l'atelier de l'Institut de physique de Nice. (figure 1.1).

Notre boîte aux dimensions métriques (nous préciserons les dimensions en temps voulu) a entièrement été réalisée à l'aide de trois planches de bois d'épaisseurs variables (1,1 cm 1,9 cm et 2,1 cm) découpées en respectant nos dimensions grâce au personnel de l'atelier dans le but d'avoir une boîte rectangulaire (six faces).

Chacune de nos trois planches d'origines possèdent des propriétés propres et par conséquent, cela va influencer le comportement des ondes incidentes créées par une impulsion sonore (coup de paume sur une des facettes de la boîte par exemple) lors de leurs contacts sur l'une des paroi.

Nous avons donc trois coefficients d'absorptions différents car les épaisseurs de chacune des facettes ainsi que leurs rigidités ne sont pas les mêmes (nous avons deux planches presque identiques mais chaque valeurs doivent être prise en compte pour gagner en précision lorsque que nous effectuerons des calculs).

Pour étudier la qualité acoustique de notre boîte, nous avons effectué plusieurs acquisitions de signal sonore (percussion sur une des facettes) en plaçant un microphone à plusieurs endroits de notre boîte que nous avons provoqué à différents endroits afin d'observer les modes de résonance qui se manifestent pour une certaine perturbation (à un certain endroit de la boîte).

Jusqu'à présent, nous n'avons réalisé que de simples tests sur la boîte. C'est pour cela que notre rapport sera majoritairement centré sur l'aspect théorique du projet.

Cependant, à la fin de chaque point théorique, nous dirons comment nous allons procéder expérimentalement afin de comparer nos résultats aux résultats théoriques. Nous ajouterons également en fin de rapport une partie dédiée à nos premiers tests expérimentaux.

1.2 Problématique soulevée.

Pourquoi étudier l'acoustique des salles ?

Tout d'abord, le fait d'étudier comment réagit la boîte de notre projet lorsqu'elle est soumise à une perturbation au niveau sonore est instructif pour comprendre les phénomènes liés au son, comme la réverbération par exemple, dans des salles à plus grandes échelles.

Les contraintes acoustiques que nous rencontreront lors de nos mesures nous permettrons de mieux comprendre le comportement des ondes sonores dans des lieux comme une salle de classe ou salle de spectacle qui ne demande pas la même optimisation acoustique.

Il s'agit donc de comprendre ce qui fait la qualité d'une salle sur le plan auditif.

Au delà de cela, il est nécessaire de concevoir une structure fermée pour étudier l'ensemble des phénomènes acoustiques dans les meilleurs conditions possibles. Plus l'isolation de notre boîte est bonne, meilleur sera la qualité de notre signal lors du traitement de donnée sur les logiciels mis à notre disposition (« RoomEQ Wizard », « Audacity »).

On ne traitera d'ailleurs pas le son de la même manière dans un lieu destiné à la parole comme une salle de réunion avec un lieu plutôt réservé à la musique comme une salle de concert ou un théâtre.



Figure 1.1: boîte en bois.

Chapitre 2

les théories acoustiques

2.1 La réverbération

Le temps de réverbération T (RT60) fut introduit au début du XXème siècle par W. C. Sabine, fondateur de l'acoustique architecturale, comme la durée au bout de laquelle le niveau sonore a chuté de 60 décibels après extinction de la source.

Il est intéressant de remarquer sur la courbe (figure 2.1) que la décroissance n'est plus exponentielle à partir de 0,6 s. Il s'agit en fait de la contribution des modes basse fréquences de la salle dont le temps de réverbération est plus important que celui du reste des modes.

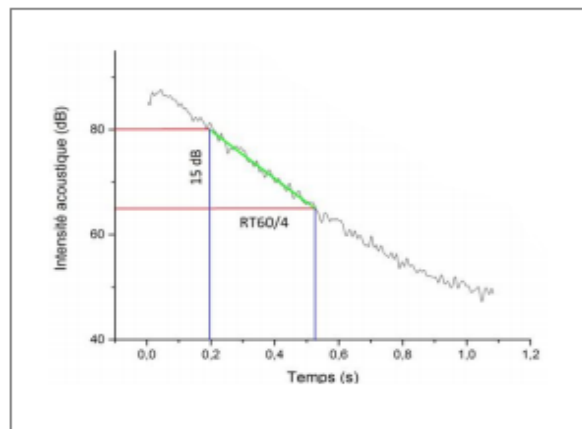


Figure 2.1: Intensité acoustique en fonction du temps

La réponse impulsionnelle de la boîte peut alors être modélisée comme une séquence obtenue par des réflexions parvenant au récepteur.

Statistiquement, la densité d'échos parvenant au récepteur varie avec le carré du temps. Au bout d'un certain délai, elle est telle que l'on peut considérer les échos sous un angle statistique. C'est le domaine que l'on appelle de la **réverbération**, elle influe sur la qualité acoustique d'une boîte.

Trop de réverbération diminue la compréhension des ondes sonores qui circule dans une même pièce (ex : Eglise) ; Trop peu nuit à l'effet d'harmonie de la musique.

Dans une salle de concert, la réverbération joue un rôle primordiale car elle doit être optimale quantitativement pour que l'harmonie de la musique soit clairement perceptible par les spectateurs mais il faut également que le spectre sonore soit équilibré c'est-à-dire éviter de privilégier certaines fréquences plutôt que d'autres.

Une première expression de ce temps de réverbération (approximé) en fonction des caractéristiques que nous démontrerons plus tard est fournie par la loi de Sabine :

$$RT60 = \frac{0,16V}{A} = \frac{0,16V}{\sum_i \alpha_i S_i}$$

V : Volume de la salle en m^3
A : Aire d'absorption équivalente de la salle
 α_i : Coefficient d'absorption de la paroi i
S_i : Surface de la paroi i en m^2

Les caractéristiques des parois ou des obstacles présentes dans la salle ont donc une influence sur le temps de réverbération. Par conséquent, les types de parois seront choisis en fonction du temps de la réverbération souhaité de la salle.

La formule de Sabine a été établie en ne considérant que le champ réverbéré (ou diffus) avec une répartition parfaitement homogène du champ réverbéré dans la salle. De plus, ce champ est constitué d'une infinité d'ondes planes arrivant dans toutes les directions.

Cette hypothèse n'est jamais observée en pratique mais l'on peut s'en approcher et rester dans le domaine de validité de cette formule sous certaines conditions qui sont les suivantes :

- La boîte doit être peu absorbante (pour observer au mieux la réverbération par réflexion des ondes sonores sur les facettes)
- Les dimensions de la boîte doivent être assez grandes (pour pouvoir observer le phénomène acoustique de manière nette et précise)
- La boîte doit être de forme simple (par exemple "parallélépipédique" pour simplifier au maximum les équations)
- L'absorption de la propagation des ondes sonores dans le fluide (air) doit être négligeable devant l'absorption due aux parois

2.2 Loi et absorption des salles

2.2.1 Equation Eyring-Norris et sabine

L'équation de réverbération de Sabine a été publiée en 1900. Elle fut établit de manière strictement empirique à l'aide de deux amphithéâtres, en modifiant le nombre d'élément se trouvant à l'intérieur tel que les coussins. Grâce à cela, Sabine fut capable de clarifier le rôle de l'absorption dans la réverbération de la salle. Il en conclut que le temps de réverbération était lié au volume de la salle et l'absorption.

Comme précédemment évoqué, lorsque le son est alimenté en permanence dans une pièce puis qu'il est coupé, il ne s'arrête pas instantanément mais diminue de manière progressive. La réverbération est provoqué par des réflexions sur les bords de la salle et s'accompagne d'un transfert d'énergie.

On considère qu'après une réflexion sur une paroi l'onde est atténuée d'un facteur $(1 - \alpha)$ où α est le coefficient d'absorption moyen (SI) que l'on précisera plus tard. D'un point de vue statistique, le front d'onde parcourt une distance $l = 4V/S$ entre deux réflexions consécutives. Ainsi, l'intensité sera réduite d'un facteur $(1 - \alpha)^{\frac{ct}{l}}$.

L'énergie de réverbération du signal est donnée par :

$$E(x) = E0 * e^{\ln(1-\alpha) * (\frac{ct}{l})} \quad (2.1)$$

Pour n réflexions et un temps $t = \frac{n}{N}$ avec $N = \frac{cS}{4V}$

D'après la définition du niveau de dépression acoustique, la décroissance de la densité d'énergie sonore peut être écrite en terme de décroissance linéaire comme :

$$L(x) = L0 + 4.3Nt \ln(1 - \alpha) \quad (2.2)$$

Le temps de réverbération RT60 sera alors définis comme :

$$T = \frac{-60}{4.34 \ln(1 - \alpha)} \quad (2.3)$$

L'équation de **Eyring-Norris** est une réécriture de cette équation pour une vitesse de propagation du son dans l'air à température ambiante $c = 340 \text{ m.s}$:

$$T = \frac{-24 \ln(10)V}{cS \ln(1 - \frac{A}{S})} \quad (2.4)$$

S : surface total en m^2

L'équation de **Sabine** est une approximation de la précédente équation pour une petite valeur de α .

Si $\alpha \ll 1$: $\ln(1 - \alpha) \approx -\alpha$

$$T = \frac{-24 \ln(10)V}{cS \ln(1 - \alpha)} \approx \frac{0,163V}{S\alpha} \approx \frac{0,163V}{A} \quad (2.5)$$

A : aire effective d'absorption m^2

Dans la suite de notre projet nous utiliserons l'équation de Sabine pour déterminer le temps de réverbération d'une perturbation au sein de notre boîte. Les coefficients d'absorptions des différents matériaux qui tapissent les parois (bois, fer, verre) entreront dans l'approximation faite d'une *faible d'absorption*.

2.2.2 Coefficients d'absorption

L'utilisation des équations précédentes est simple mais certaines quantités faisant appel à l'absorption des matériaux doivent être appliquées avec une grande précision.

L'aire effective d'absorption est une valeur propre à chaque pièce en fonction de ses dimensions et des matériaux utilisés. Elle peut être trouvée en considérant l'absorption apportée par chaque type de surface.

Pour l'obtenir, il est nécessaire de combiner les absorptions respectives des différents matériaux qui font partis de la pièce, les multiplier avec leur surfaces respectives puis de sommer les résultats .

$$S = \sum_i S_i \quad (2.6)$$

S_i : aire de la surface d'indice i

$$A = \sum_i S_i \alpha_i \quad (2.7)$$

α_i : coefficient d'absorption du matériau i où " i " représente le ième élément absorbant de la pièce

On définit ainsi le coefficient d'absorption moyen :

$$\alpha = \frac{A}{S} \quad (2.8)$$

Remarque : Pour des espaces de très grandes dimensions, il est nécessaire, afin d'obtenir des résultats précis, de prendre en compte l'absorption de l'air.

Le changement de la valeur de la vitesse du son selon la température de la salle est également à prendre en compte, on veillera donc à la mesurer avant chaque mesures.

Chapitre 3

Les modes d'une salle

Le son dans une pièce fermée se comporte fondamentalement de manière différente que dans un espace ouvert. Dans ce type d'espace, le son quitte la source et se déplace librement vers l'extérieur. Il est facile d'en déterminer le niveau de pression acoustique à n'importe quelle distance de la source.

Dans la plupart des espaces clos, le son de la source est réfléchi par les surfaces, le niveau de pression qui en résulte en tout point de l'enceinte est une combinaison du son direct et du son réfléchi.

Le niveau sonore sera différent en plusieurs points de l'espace et variera en fonction de la fréquence, ce phénomène engendre des résonances modales.

3.1 Fréquence de résonance

Les fréquences de résonances et les variations qu'elles créent sont en fonction des dimensions de l'espace choisi. Les pièces peuvent être considérées comme des récipients d'air, en tant que tels elles possèdent des résonances modales, des fréquences préférées où l'énergie est concentrée. Ces distributions d'énergies complexes existent dans un espace tridimensionnel dans toute la pièce.

Une solution de l'équation d'onde peut être utilisée pour calculer les fréquences de résonances pour une salle rectangulaire. On utilise un espace tridimensionnel x, y, z orthogonal pour symboliser l'espace de la pièce. Ces fréquences correspondent aux modes de notre salle.

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}} \quad (3.1)$$

L : longueur, W : largeur, H : hauteur

Cette équation donne la fréquence des modes axiaux, tangentiels et obliques de la salle rectangulaire. Afin de décrire une pièce, p, q, r doivent être entiers, il y a plusieurs combinaisons de ces nombres associés aux différents modes. Ces variables servent à identifier le mode axial, tangentiel, ou oblique et la fréquence qui lui est associée.

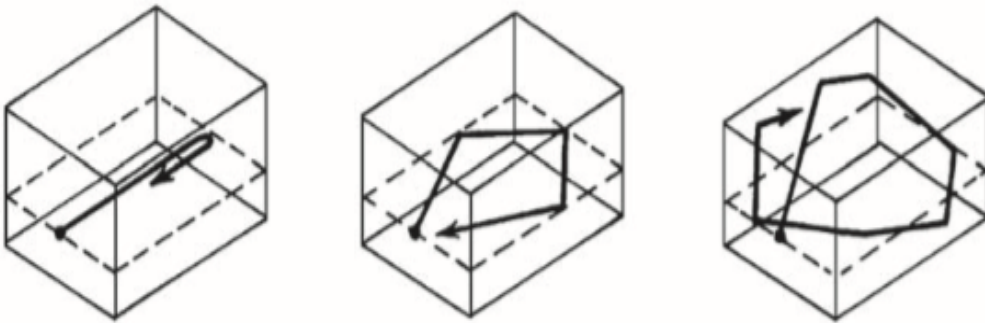


Figure 3.1: schéma démonstratif du mode axial, oblique et tangentiel

3.1.1 Analyse résonance

La distribution exacte des fréquences de résonances dépend des dimensions de la salle. La densité de résonance augmente avec la fréquence de manière irrégulière mais il est possible de la trouver en dérivant une fonction lissée des résultats.

Cette équation approxime le nombre de résonance dans une salle rectangulaire :

$$N(f) = \frac{4\pi}{3} V \left(\frac{f}{c}\right)^3 + \frac{\pi}{4} S \left(\frac{f}{c}\right)^2 + \frac{L}{8} \frac{f}{c} \quad (3.2)$$

c : vitesse du son 340 m.s^{-1}

V : volume salle en m^3

S : surface salle $2(LH + LW + WH)$ en m^2

L : longueur des bords $4(L + W + H)$

On dérive alors N par rapport à la fréquence afin d'obtenir :

$$\Delta N = 4\pi V \frac{f^2}{c^3} + \frac{\pi}{2} S \frac{f}{c} + \frac{L}{8c} \quad (3.3)$$

Δf : bande passante

Les résonances sont plus importantes dans une petite salle où la densité est basse, on peut le voir en particulier à basse fréquence.

En l'occurrence, dans une grande pièce, la densité modale est relativement grande sauf pour les très petites fréquences et les résonances jouent un rôle moins important.

3.2 Recouvrement modal

A haute fréquence, l'identification des modes est un processus pratiquement impossible du fait de la largeur de leur bande. On passe alors à une description statistique de ces phénomènes.

Cette vision nous conduit à utiliser de nouvelles grandeurs pour décrire les caractéristiques de la salle comme la densité modale et le temps de réverbération.

Les modes normaux (perpendiculaire à la surface d'une facette) déterminent les résonances de la pièce, la bande passante est définie comme tous les points de demi-puissance (-3 DB) de chaque côté d'un pic de résonance.

Voici ci-dessous la formule de la densité modale (démontrée en annexe 0.3) :

$$\Delta f = \frac{2,2}{T} \quad (3.4)$$

T : temps de réverbération RT60

Comme la densité modale augmente avec le carré de la fréquence, on peut trouver à partir de quelle fréquence une approche statistique est valide. On définit le recouvrement modal par le nombre moyen de modes présents dans une bande passante de Δf .

$$M(f) = \frac{dN(f)}{df} \Delta f \approx 4\pi V \frac{f^2}{c^3} \Delta f \quad (3.5)$$

La fréquence de Schroeder est la fréquence au-dessus de laquelle il y a un recouvrement modal suffisant pour justifier une approche statistique même pour l'excitation de son pur. Au-dessus de cette fréquence le recouvrement modal dépasse approximativement trois.

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (3.6)$$

T : temps de réverbération RT60

V: volume de la salle m^3

2000 : constante liée à la vitesse du son à $c = 343m/s$ pour une température $20^\circ C$, et un mode axial.

Le principal problème de l'étude acoustique est qu'une seule approche analytique ne peut couvrir une gamme aussi large de longueur d'onde que représentent les sons audibles. En considérant l'acoustique des petites pièces, le spectre audible peut être divisé en plusieurs régions. Cette séparation dépendra des dimensions de la pièce.

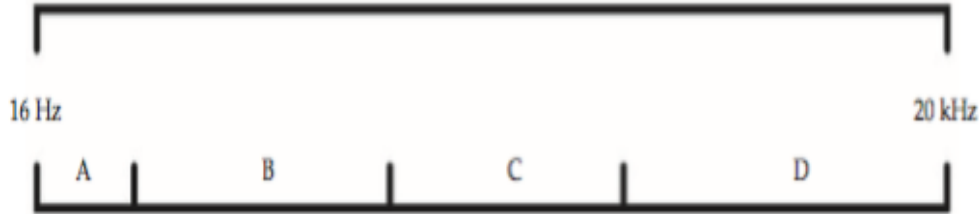


Figure 3.2: Spectre audible d'une pièce

La démarcation de chaque région est faite par la formule des fréquences de résonances décrite plus haut, dans le cas d'un mode axial.

Région A : Il n'y a pas de support résonnant pour le son dans la pièce, cela signifie qu'il ne sera pas amplifié par les résonances de la pièce car il n'y en a pas.

$$\text{Transition : } F2 = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2}} = \frac{171,5}{L}$$

Région B : Les dimensions de la pièce sont comparables à la longueur d'onde du son étudié. Les modes de résonances dominent.

$$\text{Transition correspondant à la fréquence de Schroeder : } Fs = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$$

Région C : Zone de transition entre l'acoustique des ondes (Région B) et l'acoustique des rayons (région D)

$$\text{Transition en : } F3 = 4F2$$

Région D : L'acoustique géométrique s'applique avec les réflexions spéculaires et l'approche de l'acoustique des rayons. La description statistique peut être utilisée.

Chapitre 4

Résultats expérimentaux

4.1 Matériels utilisés

- Deux planches de bois d'épaisseurs 1,1 cm et de dimension 84,4x59,9 cm (facette latérale)
- Deux planches de bois d'épaisseurs 1,9 cm et de dimension 59,9x71,6 cm (facette latérale)
- Deux planches de bois d'épaisseurs 2,1 cm et de dimension 84,4x71,6 cm (facette supérieur et inférieur)
- Un microcravate
- Enceinte bluetooth
- Un ordinateur possédant les logiciels *Audacity* pour l'acquisition d'un signal et *Room EQ Wizard* pour le traitement de donnée.

Remarque : Ci-dessus, les dimensions de chaque planches correspond au dimension INTERNES de la boîte car nos expériences réalisées à l'aide du microphone se feront dans le volume interne de celle-ci. La largeur sera notée H , la longueur notée L et hauteur notée W .

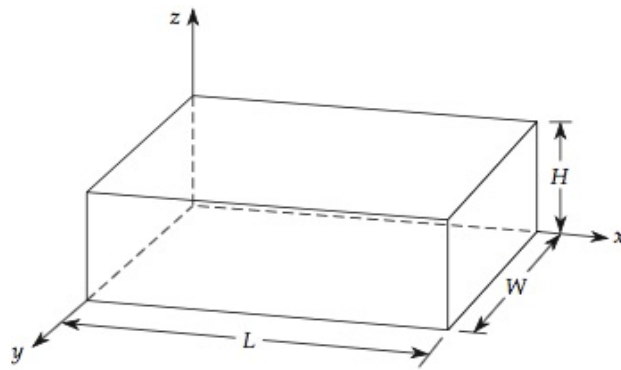


Figure 4.1: Orientation de la boîte sur un repère cartésien

4.2 Analyse spectrale

A basse fréquence en réponse à une contrainte qui comprend un large éventail de fréquences, l'identification des modes se fait de manière simple car ils se trouvent suffisamment espacés.

A plus hautes fréquences, lorsque les densités de résonances augmentent par intervalle de fréquence, elles se recouvrent et ne peuvent plus être résolues. Comme nous l'avons précédemment évoqué, dans ce cas l'approche statistique se révèle plus appropriée que l'approche modale.

On cherchera dans la suite, grâce à l'analyse des signaux recueillis avec notre micro, à mettre en avant ce phénomène de recouvrement modal et à trouver les fréquences des modes.

4.2.1 Protocole

- On se place dans un cadre limitant le plus possible toutes interférences sonores pouvant nuire aux enregistrement des signaux de réponse, mais également avoir un bruit de fond le plus faible possible pour mieux distinguer la décroissance de l'intensité sonore (temps réverbération).
- On veille à rendre la boîte le plus hermétique possible, afin d'éviter toute fuite des signaux qui modifierait les mesures et l'observation des fréquences des modes.
- On utilise une unique contrainte sonore regroupant le plus grand nombre de fréquence possible et que l'on peut répéter de manière identique tous au long des expériences (ex: pendule avec une masse, signal sonore, rampe de fréquence)
- On change alternativement l'endroit où l'on applique la contrainte ainsi que la position du micro dans la boîte pour mesurer différentes expressions des modes.
- le micro est relié, pour toutes les mesures, à un ordinateur afin de conserver les réponses de la salle et traiter les résultats.

4.2.2 Mesure du signal

Dans cette partie, nous présentons les premières mesures faites sur la boîte pour une série de contrainte (ref. Annexes 0.2.) que l'on choisit d'appliquer sur les bords extérieurs.

Le micro est placé sur la ligne centrale à 15 cm du couvercle dans le sens de sa longueur. On observe sur le logiciel *Room EQ Wizard* la réverbération au sein de la boîte en réponse à la première impulsion donnée sur l'une des facettes.

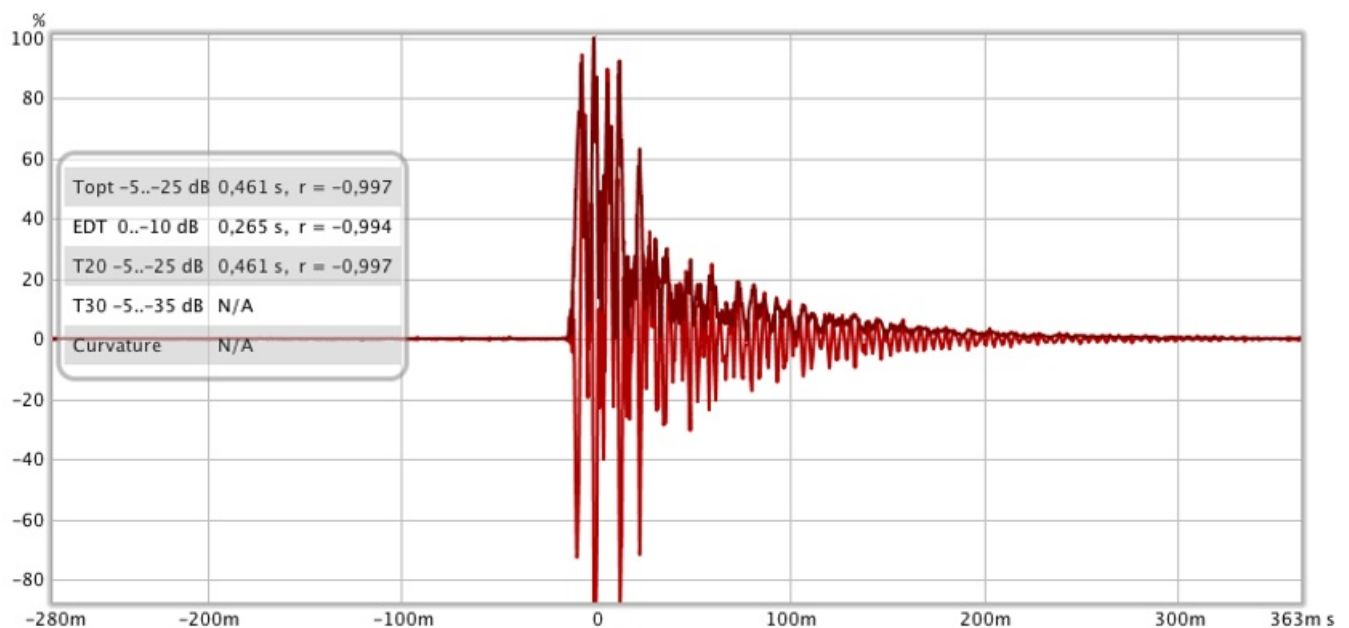


Figure 4.2: Première réponse impulsionnelle de la boîte (zoom) avec le micro placé à 15 cm au centre du plafond

On remarque clairement que l'impulsion brève engendre une perturbation de 5 à 10 ms pour enfin décroître exponentiellement en intensité. Ceci est dû au phénomène de réverbération durant environ 300 ms (RT60) qui se manifeste dans des endroits clôt. Plus les parois sont rigides, plus la réverbération sera apparente.

C'est se que nous allons démontrer prochainement lorsque nous aurons à disposition des carreaux de carrelage (rigidité élevé) que nous pourrons mettre sur les parois interne de notre boîte afin de tester le même phénomène.

4.3 Analyse des résultats

4.3.1 Modes de résonances

On effectue un zoom du signal mesuré de la figure suivante. A de faibles fréquences nous sommes capable de distinguer les premiers modes de résonance. Pour cela, on utilise l'équation des fréquences de résonances que l'on a précédemment démontré dans le chapitre 2.

On pourra ainsi par lecture du spectre vérifier la présence des modes de notre signal à l'aide des fréquences de résonances prédites par l'équation.



Figure 4.3: Première fréquence de résonance

Les premiers modes s'expriment à partir de 200 Hz, et correspondent aux premiers modes axiaux.

L'ordre d'enchainement des différents modes n'est pas constant mais dépend de la valeur des variables p, q et r. C'est-à-dire que des modes tangentiels pourront apparaitre avant certains modes obliques.

Pour un volume interne de (L= 80,4 cm , W= 69,8 cm , H= 58,2 cm).

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{W^2} + \frac{r^2}{H^2}}$$

On peut identifier les 10 premiers modes pour les combinaisons (p,q,r) :

(1,0,0) : F = 213,3 Hz , (0,1,0) : F = 245,7 Hz , (0,0,1) : F = 294,7 Hz

(1,1,0) : F = 325,4 Hz , (1,0,1) : F = 363,8 Hz , (0,1,1) : F = 383,7 Hz

(2,0,0) : F = 426,6 Hz , (1,1,1) : F = 440,8 Hz , (0,2,0) : F = 491,4 Hz

(2,1,0) : F = 493,9 Hz

On constate que les pics de résonances correspondent bien aux fréquences prédites, avec un petit décalage de fréquence pour certaines valeurs.

Ce décalage est dans notre expérience crée par notre couvercle qui ne permet pas une étanchéité parfaite avec les autres parois de la boîte.

4.3.2 Bande passante

On peut également déterminer la bande passante Δf . On sait que la valeur de la bande passante est inversement proportionnelle au temps de réverbération, ce qui fait que plus une salle est isolée, plus la bande passante est large.

Les modes AXIAUX ont en général une bande passante de 6-5 Hz en -3Db de leur valeur maximal. Ce type de modes se produisent entre deux surfaces parallèles.

Les modes TANGENTIELS ont seulement la moitié de l'énergie des modes axiaux, leur pics sont donc tracé à -3Db de ceux des axiaux. Ce type de mode se produit quand le son se reflète sur quatre surfaces. Vu que les modes tangentiels impliquent quatre réflexions au lieu de deux alors ils auront une ampleur inférieur à celle d'un mode axial, ce qui implique une plus grande absorption d'énergie acoustique.

Les modes OBLIQUES ont eux un quart de l'énergie des axiaux soit -6Db. Ces modes impliquent cette fois-ci six réflexions sur les six faces de la boîte donc l'ampleur de ces derniers se verra encore diminuer par rapport aux deux autres types de modes.

On choisit d'étudier le premier mode axial de notre signal :

Le premier mode a une fréquence de résonance de 224,15 Hz et 131,73 Db (figure: 4.4). Si on se place en -3Db et +3Db, on obtient les valeurs : **f1 = 222,08 Hz** et **f2 = 226,29 Hz**

$$\Delta f = f_1 - f_2 = 222,08 - 226,29 = 4,21 \text{ Hz}$$



Figure 4.4: Les deux valeurs de la bande passante

4.4 Prochaines mesures

Dans la suite de notre projet, nous continuerons à effectuer des mesures en changeant la position de notre micro dans la boîte (ref. Annexes 0.1) pour voir comment les modes s'expriment et avec quelles intensités. On pourra également modifier les natures des contraintes que l'on applique pour les comparer aux mesures déjà obtenus.

Nous étudierons de manière plus précise les données caractéristiques de notre expérience comme les coefficients d'absorptions et les aires d'absorptions, en tapissant certaines parois internes avec des matériaux aux propriétés absorbantes différentes comme le verre et le fer. Ainsi nous pourrions constater les changements qui s'opèrent sur la valeur du temps de réverbérations et sur les spectres des signaux .

Enfin nous chercherons à quantifier de manière plus précise le nombre et la densité des modes qui s'expriment dans notre boîte, Mais également étudier le recouvrement de ces modes pour des hautes et basses fréquences.

Chapitre 5

Conclusion

Notre projet a pour objectif d'étudier le comportement acoustique des salles. Pour cela, notre boîte conçue en bois nous permet d'effectuer différentes expériences nécessaires à la compréhension des multiples phénomènes acoustiques s'appliquant au sein de celle-ci.

Nous réalisons cela dans une telle boîte pour mieux saisir l'importance des paramètres acoustiques mis en jeu dans une salle à plus grande échelle aux usages variés (concert, conversation, Eglise, etc).

Jusqu'à présent, nous nous sommes plus penché sur l'aspect théorique du projet ainsi que la prise en main des différents logiciels dont nous avons besoin pour étudier les propriétés acoustiques de la caisse. Cela nous a permis de mieux cerner en amont les étapes que nous devons effectuer pour mener à bien notre projet.

Comme vu dans la partie expérimentales, nous n'avons pas pu manipuler dans des conditions optimales en raison de bruits de fond et de problèmes d'isolation non remarqués lors de la conception de la boîte.

Par conséquent, en réglant ces problèmes à ce stade de notre projet, nous allons pouvoir améliorer nos mesures expérimentales dans le but de nous rapprocher le plus possible des valeurs théoriques souhaitées.

Nous pourrions ensuite poursuivre sur de nouvelles expériences comme apporter quelques modifications à la boîte (recouvrir une paroi de verre ou de métal, ajouter des objets dans la boîte, etc) pour observer comment varie la réponse impulsionnelle.

Remerciements

Nous tenons tout particulièrement à remercier notre encadrant Olivier LEGRAND pour l'aide et les conseils qu'il nous a apporté jusqu'à présent.

Son enseignement rend notre projet passionnant et cela nous motive à aller plus loin dans l'étude du comportement acoustique de notre boîte.

Nous voulons également remercier Valérie DOYA pour sa contribution au sein de notre projet ainsi que l'équipe de l'atelier qui nous ont été indispensable pour la conception de la boîte.

Annexes

Annexe 1

Les deux graphes ci-dessous représentent l'intensité sonore d'une impulsion créée en tapant sur une facette latérale de la boîte en fonction de la fréquence.

0.1 Spectre

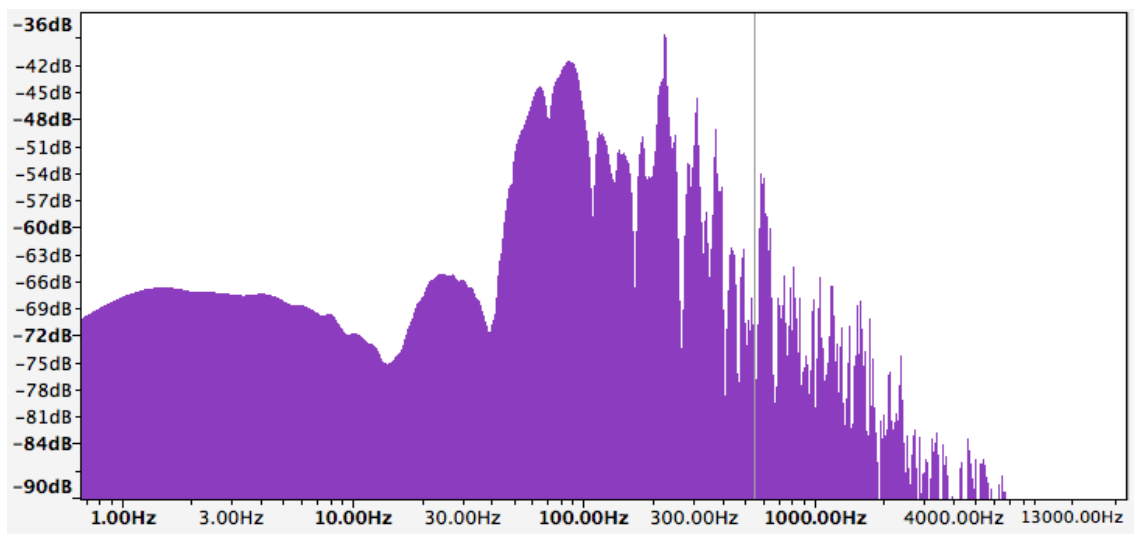


Figure 5.1: Spectre de la première réponse impulsionnelle de la boîte

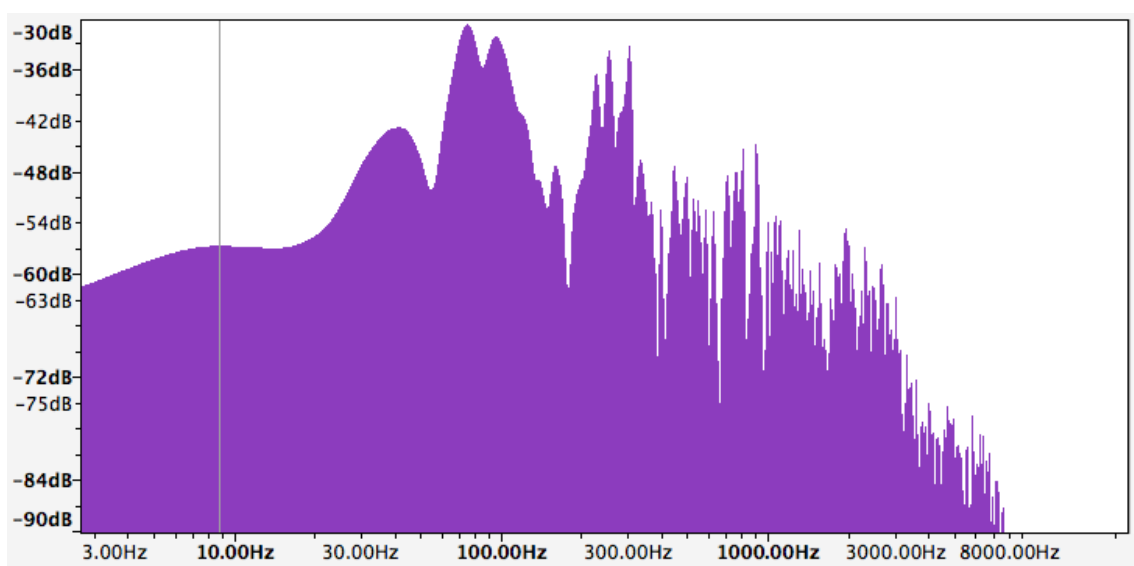


Figure 5.2: Spectre de la deuxième réponse impulsionnelle de la boîte

0.2 Démonstration de la formule de la densité modale

Démonstration de : $\Delta f = \frac{2,2}{T}$

$$W(t) = W_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = W_0 e^{-2\pi \Delta f t}$$

L'égalité précédente est vérifiée uniquement si le système décroît exponentiellement.

$$-60 = 10 \frac{\ln\left(\frac{W(t)}{W_0}\right)}{\ln(10)} = 10 \frac{\ln\left(-\frac{t}{\tau}\right)}{\ln(10)}$$

$$\Leftrightarrow 6 \ln(10) = \frac{t}{\tau}$$

$$\Leftrightarrow T = \tau \cdot 6 \ln(10)$$

$$\Leftrightarrow T = \frac{6 \cdot \ln(10)}{2\pi} \cdot \frac{1}{\Delta f}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\Delta f = \frac{2,2}{T}} \quad \text{A.N. } \frac{6 \ln(10)}{2\pi} \approx 2,198$$