
Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Fabrication d'un prototype avec des matériaux de réemploi pour améliorer la qualité acoustique de l'espace

Auteur : Desenclos, Corentin

Promoteur(s) : Calixte, Xavièra; Thienpont, Arnaud

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master : ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en "urban and environmental engineering"

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/17002>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège

Faculté des Sciences Appliquées

Fabrication d'un prototype avec des matériaux de réemploi pour améliorer la qualité acoustique de l'espace

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master
Ingénieur Civil Architecte par **DESENCLOS Corentin**

Promoteurs :
CALIXTE Xaviera – THIENPONT Arnaud

Jury :
LECLERCQ Pierre – SANON Anne

Abstract

This research focuses on improving the acoustic poor quality of an architectural room that exceeds the recommended reverberation time, leading to speech intelligibility issues. The proposed solution involves developing a product using recycled cardboard waste material from the room itself.

Four prototypes made from recycled cardboard were built and rigorously evaluated following a specific protocol aligned with industry standards. The aim was to identify the most effective prototype for enhancing the room's acoustic quality. The prototypes showed promising sound absorption capabilities and effectively reduced the reverberation time, improving speech intelligibility within the room. However, when compared to similar commercially available products, the cardboard-based prototypes showed slightly lower performance. Moreover, the installation of cardboard-based panels in public spaces must comply with fire safety regulations. Adherence to relevant standards and ensuring the safety of occupants are crucial considerations.

In summary, this research explores an innovative approach to enhance acoustic quality using recycled cardboard. The findings suggest the potential of this approach, but further refinements and evaluations under certified conditions are necessary to validate the results. Adherence to fire safety regulations is essential when implementing such solutions in public spaces. The development of cardboard-based prototypes offers a sustainable solution for improving the acoustic environment, but their performance and compliance with safety standards require careful consideration and ongoing research.

Résumé

Dans notre recherche, nous nous concentrons sur la qualité acoustique médiocre de la salle de projet. Celle-ci dépasse les recommandations acoustiques de la norme NBN S 01-400-2 concernant le temps de réverbération des espaces.

Ce travail répond donc à la question suivante : **Comment la fabrication d'un prototype utilisant des matériaux de réemploi peut contribuer à l'amélioration de la qualité acoustique de l'espace ?** Pour répondre à cette question, le présent document se décompose en quatre points majeurs :

- Dans un premier temps l'état de l'art présente succinctement les concepts de l'acoustique qui seront abordés, les normes en vigueur ainsi que les solutions de correction acoustique existantes.
- Puis la proposition présente le cas d'étude de la salle de projet, développe l'idéation et la création de 4 prototypes d'absorbants acoustiques : **boîtes à œufs**, **millefeuille**, **tubes** et **copeaux**. On y trouve également l'élaboration du protocole de mesure selon la norme NBN ISO 354.
- Les résultats illustrent les performances d'absorption des prototypes et mettent en avant les performances des prototypes en **millefeuille** et en **copeaux** de carton. Une deuxième partie des résultats établit des scénarios de correction acoustique dans la salle de projet et simule le comportement de la salle et son temps de réverbération.
- Enfin dans la discussion, nous abordons le fait que l'évaluation des coefficients d'absorption présente certaines limites en raison des différences dans la méthode de mesure par rapport à la norme. Cela rend compliqué la comparaison des prototypes avec les produits existants sur le marché. La réglementation incendie est également mentionnée comme un frein potentiel à l'utilisation de tels produits à ce stade de leur développement.

En conclusion, l'utilisation de carton recyclé pour la correction acoustique de la salle de projet s'est révélée prometteuse. Cependant, ces performances nécessiteraient d'être réévaluées dans des conditions certifiées. Les normes incendie en vigueur peuvent également limiter l'installation généralisée de panneaux absorbants en carton dans les espaces publics.

Mots clés :

qualité acoustique, absorbant acoustique, réemploi de carton, mesure acoustique

Remerciements

Je tiens à remercier mes promoteurs, Xaviera Calixte et Arnaud Thienpont, pour m'avoir accompagné tout au long de ce travail de fin d'étude. Je leur suis sincèrement reconnaissant pour la confiance qu'ils m'ont accordée pour choisir un tel sujet, l'autonomie qu'ils m'ont laissée et leur présence au moment clé de l'exercice. Je remercie également Anne Sanon, Docteur en acoustique vibratoire, de faire partie de mon jury, pour le temps, les remarques et les conseils reçus lors de la finalisation de ce travail.

Je remercie Angel Calderon pour m'avoir donné accès aux salles de mesure de l'université, pour m'avoir fourni du matériel, de l'aide dans la réalisation des prototypes et ses nombreux conseils tout au long de ce travail.

Je tiens également à remercier Clément Lagarrigue, directeur général de Metacoustic, pour le temps qu'il m'a accordé : cela m'a permis de lui présenter mon travail et de bénéficier de son point de vue, complémentaire à celui de mes encadrants.

Je remercie ma famille et mes proches pour leur soutien lors de ce semestre, notamment mes parents pour la relecture de mon travail. Je remercie tout particulièrement mes colocataires, Camille, Emma et Paul, pour la motivation et les encouragements mutuels échangés tout au long de cet exercice.

Mes plus sincères remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de fin d'études. Votre soutien a été précieux et a grandement enrichi mon expérience académique.

Table des matières

ABSTRACT	1
RESUME.....	2
REMERCIEMENTS.....	3
TABLE DES MATIERES.....	4
LISTE DES FIGURES.....	6
LISTE DES EXTRAITS	7
LISTE DES EQUATIONS.....	7
LISTE DES TABLEAUX	8
1 INTRODUCTION	9
1.1 HYPOTHESES DE DEPART ET CADRE DE L'ETUDE	9
2 PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE CE TRAVAIL	10
2.1 CONTEXTE.....	10
2.2 QUESTION DE RECHERCHE.....	10
2.3 OBJECTIFS GENERAUX	11
3 ETAT DE L'ART.....	12
3.1 LES PRINCIPES DE L'ACOUSTIQUES	12
3.1.1 <i>Onde sonore</i>	12
3.1.2 <i>Acoustique des espaces clos</i>	14
3.2 MESURES.....	20
3.2.1 <i>Répétabilité et reproductibilité des mesures</i>	20
3.2.2 <i>Mesures acoustiques</i>	21
3.3 AUTRE REGLEMENTATION : NORME INCENDIE	24
3.3.1 <i>NBN EN 13501-1 : Classement des produits et éléments de construction – Partie 1 : Classement à partir des données d'essais de réaction au feu</i>	24
3.3.2 <i>Règlement Sécurité Incendie des ERP - Chapitre III, Articles AM : Aménagements Intérieur, Décoration et Mobilier</i>	24
3.4 CARACTERISTIQUES ACOUSTIQUES DES MATERIAUX.....	25
3.4.1 <i>Matériaux de construction classique</i>	25
3.4.2 <i>Produit acoustique commun</i>	26
3.4.3 <i>Produit acoustique DIY</i>	27
3.5 ACOUSTIQUE ET REEMPLOI.....	28
3.5.1 <i>Isolation acoustique</i>	28
3.5.2 <i>Absorbant acoustique</i>	28
4 PROPOSITION – CADRE D'ETUDE.....	29
4.1 LA SALLE DE PROJET.....	29
4.1.1 <i>Description</i>	29
4.1.2 <i>Qualité acoustique</i>	30
4.2 PROTOTYPES	33
4.2.1 <i>Brainstorming</i>	33
4.2.2 <i>Evaluation de faisabilité</i>	37
4.2.3 <i>Conception des prototypes</i>	37
4.2.4 <i>Récapitulatif et caractéristiques des prototypes</i>	40
5 EXPERIMENTATION.....	42
5.1 MOYENS DISPONIBLES.....	42
5.1.1 <i>Source sonore</i>	42

5.1.2	<i>Matériel de mesure</i>	42
5.1.3	<i>Logiciel de traitement acoustique</i>	44
5.1.4	<i>Branchement du setup</i>	46
5.1.5	<i>Salles de mesure</i>	47
5.2	FIABILITE DU MATERIEL	48
5.2.1	<i>Le Microphone</i>	48
5.2.2	<i>La Source</i>	49
5.3	FIABILITE DES MESURES	50
5.3.1	<i>Répétabilité des mesures</i>	50
5.3.2	<i>Reproductibilité des mesures</i>	50
5.4	CHOIX D'UNE SALLE DE MESURE	53
5.4.1	<i>Chambres réverbérantes</i>	53
5.4.2	<i>Salle de bain</i>	56
5.4.3	<i>Bilan</i>	57
5.5	PROTOCOLE DE MESURE	58
5.5.1	<i>Disposition du matériel</i>	58
5.5.2	<i>Limiter les perturbations</i>	59
5.5.3	<i>Déroulé d'une mesure</i>	59
5.5.4	<i>Calcul du coefficient d'absorption</i>	59
5.6	PROTOCOLE DE SIMULATION	60
6	RESULTATS	62
6.1	TEMPS DE REVERBERATION -SDB-	62
6.1.1	<i>Configuration 1 : 2 panneaux soit 1 m²</i>	62
6.1.2	<i>Configuration 2 : 1 panneau soit 0.5 m²</i>	64
6.2	COEFFICIENT D'ABSORPTION -SDB-	66
6.2.1	<i>Configuration 1 : 2 panneaux soit 1 m²</i>	66
6.2.2	<i>Configuration 2 : 1 panneau soit 0.5 m²</i>	67
6.3	SIMULATION DE CORRECTION DE LA SALLE DE PROJET	68
6.3.1	<i>Coefficients d'absorption -sdb- pris en compte</i>	68
6.3.2	<i>Disposition des absorbants</i>	68
6.3.3	<i>Simulation des temps de réverbération</i>	70
7	DISCUSSION	74
7.1	RAPPEL DES HYPOTHESES PROPRES A L'EXPERIMENTATION	74
7.2	BILAN DES RESULTATS	75
7.2.1	<i>Temps de réverbération -sdb-</i>	75
7.2.2	<i>Coefficient d'absorption – sbd-</i>	75
7.2.3	<i>Simulation de correction de la salle de projet</i>	76
7.3	BILAN.....	77
7.4	LIMITES	77
7.5	AMELIORATIONS ET PERSPECTIVES	78
7.6	SUGGESTIONS DE QUESTIONS DE RECHERCHE COMPLEMENTAIRES	79
8	CONCLUSION	80
9	REFERENCES	81
	ANNEXES	83

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de la propagation d'une onde transversale (a) et longitudinale (b)	12
Figure 2 : Répartition des niveaux acoustiques	13
Figure 3 : Répartition du spectre de son	13
Figure 4 : Représentation des bandes de fraction d'octave	14
Figure 5 : Schéma champ direct et diffus	15
Figure 6 : Schéma de principe de la relation entre l'absorption, la réflexion et la transmission au travers d'une paroi	16
Figure 7 : Représentation des 4 premiers modes propres d'une corde tendue fixée à ses deux extrémités, (Expérience de Melde)	18
Figure 8 : Cabine alpha, (mecanum.com [9])	21
Figure 9 : Absorbants acoustiques surfaciques horizontaux et verticaux, (rockfon.com)	27
Figure 10 : Absorbants acoustiques en éléments suspendus, (rockfon.com)	27
Figure 11 : Panneau acoustique PAN-TERRE, (acoustix.be)	28
Figure 12 : Panneau absorbant PYT AUDIO, (pytaudio.com)	28
Figure 13: Perspective et dimensions de la salle de projet	29
Figure 14: La salle de projet – partie en double hauteur	30
Figure 15: Mesure du temps de réverbération de la salle de projet, (22/03/2023)	31
Figure 16: Position des points de mesure	32
Figure 17: Mesure du temps de réverbération ($T_{r\acute{e}el}$) de la salle de projet aux 3 emplacements, (22/03/2023)	32
Figure 18 : Aperçu de la matière première à disposition	33
Figure 19 : Schéma de principe en coupe du prototype en copeaux de carton	34
Figure 20 : Schéma de principe du prototype en millefeuille de carton	35
Figure 21 : Schéma de principe du prototype en tube de carton	35
Figure 22 : Schéma de principe en coupe du prototype en boîtes à œufs	36
Figure 23 : Schéma de principe en coupe du prototype en pate de papier carton	36
Figure 24 : Conception du cadre des prototypes	38
Figure 25 : Conception du prototype en boîtes à œuf	38
Figure 26 : Conception du prototype en tube	39
Figure 27 : Conception du prototype en millefeuille	39
Figure 28 : Conception du prototype en copeaux	40
Figure 29 : Ensemble des prototypes dans leur version finale	40
Figure 30: Enceinte de monitoring, FAR XM de ATD	42
Figure 31: Microphone, MCE 320	42
Figure 32: Conditionneur, Opus de 01dB	43
Figure 33: Carte son, Babyface de RME	43
Figure 34: Capture de l'interface de l'application Sonomètre	44
Figure 35: Icône du logiciel Room EQ Wizzard	44
Figure 36: Interface RT60 Decay du logiciel REW	45
Figure 37 : Interface RT60 du logiciel REW (barre)	45
Figure 38 : Interface RT60 du logiciel REW (points reliés)	46
Figure 39: Schéma de branchement	46
Figure 40: Photo des salles de mesure disponibles	47
Figure 41: Schéma de la mesure d'omnidirectionnalité du micro	48
Figure 42: Mesures de l'omnidirectionnalité du microphone, (07/03/2023, chambre sourde)	49
Figure 43: Mesure de la réponse en temps réel de l'enceinte (07/03/2023, chambre sourde)	49
Figure 44 : Mesure de la répétabilité (07/03/2023, chambre sourde)	50
Figure 45 : Mesure de la reproductibilité, (10/03/2023, chambre sourde)	51
Figure 46: Mesure de la reproductibilité, (15/03/2023, salle de bain)	52
Figure 47 : Echantillon de mousse absorbante	53
Figure 48 : Mesure de l'échantillon dans la grande chambre réverbérante	53
Figure 49 : Mesure de l'échantillon dans la grande chambre réverbérante, (10/03/2023)	54
Figure 50 : Mesure de l'échantillons dans la petite chambre réverbérante	55
Figure 51 : Mesure de l'échantillon dans la petite chambre réverbérante, (10/03/2023)	55

Figure 52 : Mesure de l'échantillon dans la salle de bain	56
Figure 53 : Mesure de l'échantillon dans la salle de bain, (15/03/2023)	56
Figure 54 : Aperçu de l'installation de mesure de la salle de bain	58
Figure 55 : Disposition des panneaux absorbants dans la salle de projet	60
Figure 56 : Mesure du prototype en millefeuille de carton, (salle de bain, configuration 1, 04/04/2023)	62
Figure 57 : Mesure du temps de réverbération -sdb- des prototypes, (salle de bain, configuration 1, 04/04/2023), [s]	63
Figure 58 : Mesure du prototype en tube de carton, (salle de bain, configuration 2, 04/04/2023)	64
Figure 59 : Mesure du temps de réverbération -sdb- des prototypes, (salle de bain, configuration 2, 04/04/2023), [s]	65
Figure 60 : Coefficients d'absorption -sdb-, (configuration 1)	66
Figure 61 : Coefficients d'absorption -sdb-, (configuration 2)	67
Figure 62 : Simulation des temps de réverbération -sdb- de la salle de projet, scénario 1 et 2	70
Figure 63 : Scénario 1, modélisation de l'ambiance intérieur de la salle de projet	71
Figure 64 : Simulation des temps de réverbération -sdb- de la salle de projet, scénario 3	72
Figure 65 : Scénario 3, modélisation de l'ambiance intérieur de la salle de projet	73

Liste des extraits

Extrait 1 : Représentation du temps de réverbération (Acoustique des salles [3])	16
Extrait 2 : Recommandations des performances acoustiques pour des équipements de service stationnaires et temps de réverbération de références pour des espaces avec différentes fonctions, (NBN S 01-400-2)	17
Extrait 3 : Diagramme d'Ishikawa, (Root Cause Analysis)	20
Extrait 4 : Nombre minimal de positions et de mesurages, (NBN ISO 3382-2)	22
Extrait 5 : Récapitulatif du classement de réaction au feu, (nullifire.com [13])	24
Extrait 6 : Article AM5, (RSI)	24
Extrait 7 : Article AM9, (RSI)	25
Extrait 8 : Tableau des coefficients d'absorption acoustique de matériaux de construction génériques, (acophile.fr)	25

Liste des équations

Equation 1 : Relation entre la fréquence fondamentale et l'harmonique de rang n	18
Equation 2 : Formule de Sabine	19
Equation 3 : Formule de Sabine corrigée	19
Equation 4 : Formule du coefficient moyen d'absorption	19
Equation 5 : Formule du calcul de l'aire d'absorption acoustique équivalente de l'éprouvette, (NBN ISO 354)	23
Equation 6 : Formule du coefficient d'absorption de l'éprouvette, (NBN ISO 354)	23

Liste des tableaux

Tableau 1 : Temps de réverbération de référence pour la salle de projet, (NBN S 01-400-2)	30
Tableau 2 : Evaluation qualitative des temps de construction des différents prototypes	37
Tableau 3 : Caractéristiques complémentaires des prototypes	41
Tableau 4 : Caractéristiques des salles de mesures	57
Tableau 5 : Coefficients absorption des différents types de surfaces par bande d'octave	61
Tableau 6 : Relevés des temps de réverbération -sdb- des mesure, (salle de bain, configuration 1, 04/04/2023), [s]	62
Tableau 7 : Moyennes des relevés des temps de réverbération -sdb- des mesures, (salle de bain, configuration 2, 04/04/2023), [s]	64
Tableau 8 : Coefficients d'absorption -sdb-, (configuration 1)	66
Tableau 9 : Coefficients d'absorption -sdb-, (configuration 2)	67
Tableau 10 : Moyenne des coefficients absorption -sdb- des prototypes retenus par bande d'octave	68
Tableau 11 : Relevé des surfaces par scénario	68
Tableau 12 : Simulation des temps de réverbération -sdb- après traitement acoustique de la salle de projet par bande d'octave	70
Tableau 13 : Simulation des temps de réverbération -sdb- du scénario 3 par bande d'octave [s]	72
Tableau 14 : Récapitulatif des temps de réverbération mesurés des configurations 1 et 2 [s]	75

1 Introduction

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous nous intéressons à la qualité acoustique de la salle de projet de la filière ingénieur architecte de l'université de Liège. C'est un espace qui présente un temps de réverbération dépassant les recommandations de la norme NBN S 01-400-2. Ce problème entraîne des difficultés d'intelligibilité de la parole, compromettant ainsi l'expérience auditive des occupants. Pour remédier à cette situation, notre objectif est de développer un produit novateur en utilisant les matériaux entreposés cette même salle. C'est pourquoi nous choisissons d'exploiter le carton, présent en grande quantité dans ce local.

Afin d'atteindre notre objectif, nous réaliserons et évaluerons quatre prototypes distincts, chacun mettant en œuvre une approche spécifique pour utiliser le carton recyclé de manière efficace. Les performances acoustiques de chaque prototype seront rigoureusement évaluées selon un protocole précis.

1.1 Hypothèses de départ et cadre de l'étude

Nous nous approchons des conditions certifiées selon les normes en vigueur pour évaluer les prototypes. Ces conditions de mesure prennent pour modèle la norme NBN ISO 354 relative aux essais d'absorption en chambre réverbérante.

Il convient de prendre en compte les réglementations relatives à la sécurité incendie lors de l'installation de ces panneaux absorbants dans un espace destiné à recevoir du public. Des adaptations supplémentaires relative au dispositif développé dans ce travail seraient nécessaires pour garantir la conformité aux normes incendie en vigueur.

2 Problématique et objectifs de ce travail

2.1 Contexte

L'acoustique est une discipline scientifique qui étudie les phénomènes liés à l'émission de son, sa propagation et ses effets sur l'environnement. Elle étudie la propagation de ces ondes mécaniques et décrit leur évolution dans un espace donné, comment elles sont réfléchies, absorbées ou diffusées par les différentes surfaces et structures présentes.

Depuis l'Antiquité, l'acoustique est une science qui a été étudiée dans le but d'améliorer le confort et l'audibilité. Les civilisations anciennes, comme la grecque et la romaine, ont reconnu l'importance de l'acoustique dans la conception de leurs bâtiments et de leurs espaces de performance. Ils utilisaient des techniques architecturales spécifiques pour optimiser la propagation du son dans leurs théâtres et leurs amphithéâtres, assurant ainsi une meilleure expérience auditive pour les spectateurs comme le souligne le reportage de François Canac [1].

Dans le contexte du confort des bâtiments, l'acoustique joue un rôle crucial. En effet, le confort d'un espace ne se limite pas à des paramètres physiques tels que la température ou l'éclairage, mais inclut également la qualité sonore de l'environnement. Une mauvaise qualité acoustique peut entraîner des problèmes tels que la réverbération excessive, les échos, les bruits indésirables ou la mauvaise intelligibilité de la parole. Cela peut avoir un impact négatif sur la communication, la concentration, la productivité, et même la santé et le bien-être des occupants.

De plus, dans un monde où le dérèglement climatique est une réalité préoccupante, il est devenu impératif de trouver des alternatives de production plus durables et respectueuses de l'environnement. Cela s'applique également au domaine de l'acoustique. Le recyclage et le réemploi de matériaux offrent des opportunités pour réduire l'impact environnemental de la fabrication de produits acoustiques, en favorisant une utilisation plus efficace des ressources et en limitant les déchets.

2.2 Question de recherche

C'est dans cette perspective que ce travail de recherche se concentre sur la question suivante :

Comment la fabrication d'un prototype utilisant des matériaux de réemploi peut contribuer à l'amélioration de la qualité acoustique de l'espace ?

Plus précisément, cette question peut être décomposée en deux thématiques de recherche qui ont orienté la structure de notre travail :

- Est-il possible d'utiliser des matériaux de réemploi et quels sont les avantages acoustiques associés à leur utilisation ?
- Quelles sont les caractéristiques essentielles du prototype que nous devons exploiter et comment devons-nous l'évaluer ?

En explorant les possibilités offertes par le recyclage et le réemploi, nous cherchons à démontrer comment une approche durable peut être intégrée à la conception acoustique, tout en créant des espaces intérieurs confortables et respectueux de l'environnement.

2.3 Objectifs généraux

L'objectif de ce travail de fin d'étude sera donc de parvenir à évaluer plusieurs prototypes pour identifier une forme de panneau absorbant optimale sur base de matériaux de réemploi. Les sous-objectifs relatifs à ce travail de recherche sont les suivants :

- Concevoir différents types de prototypes absorbants

L'objectif est de concevoir et de développer une variété de prototypes utilisant du carton de réemploi présent dans la salle de projet, afin d'explorer différentes approches pour améliorer la qualité acoustique de l'espace. En expérimentant différentes configurations, matériaux et techniques, nous chercherons à trouver des solutions novatrices et efficaces.

- Mesurer les performances relatives de chaque prototype

Une fois les prototypes réalisés, nous procéderons à des mesures et des évaluations détaillées pour comparer les performances acoustiques de chaque prototype. À l'aide d'instruments de mesure précis, nous analyserons notamment la réverbération pour en calculer leur coefficient d'absorption respectif, afin de quantifier et de comprendre l'efficacité de chaque prototype.

- Proposer une solution de correction acoustique de la salle étudiée

Enfin, nous formulerons une solution concrète de correction acoustique spécifique à la salle étudiée en utilisant les prototypes les plus performants comme base. Cette solution sera comparée aux résultats d'une correction effectuée à l'aide de produits disponibles dans le commerce.

3 Etat de l'art

3.1 Les principes de l'acoustiques

3.1.1 Onde sonore

Notions élémentaires définies dans les cours de physiques du secondaire. Stéphane LANDEAU – chapitre IX – le son [2]

Les ondes sonores sont des variations de pression qui se propagent à travers un milieu élastique, tel que l'air, l'eau ou les solides. Elles sont générées par des sources sonores, telles que les instruments de musique, les voix ou les vibrations d'objets. Lorsque ces sources vibrent, elles créent des perturbations dans le milieu environnant, qui se propagent sous forme d'ondes mécaniques.

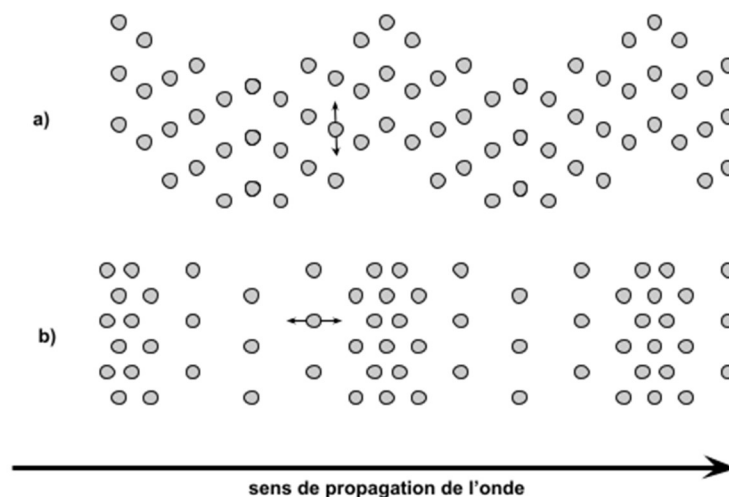


Figure 1 : Schéma de la propagation d'une onde transversale (a) et longitudinale (b)

Les ondes sonores se propagent de manière longitudinale (parallèle à sa direction) ou transversale (perpendiculaire à sa direction) selon le milieu dans lequel elle évolue. Dans l'air, la propagation des ondes sonores se fait par la compression et la détente successives des molécules constituant ce milieu élastique et s'effectue dans les 3 dimensions de façon sphérique.

Les ondes sonores ont 4 caractéristiques :

- l'amplitude correspond à l'intensité ou à la puissance du son, déterminant son volume ou son niveau sonore ;
- la fréquence (f) est le nombre de cycles sonores par seconde et détermine la hauteur du son. Les sons de haute fréquence sont perçus comme aigus et les sons de basse fréquence comme graves. La période (T) est l'inverse de la fréquence ;

- la vitesse de propagation des ondes sonores (c) dépend du milieu traversé. Elle est de l'ordre de 340 m.s⁻¹ dans l'air ;
- la longueur d'onde (λ) est le nombre de cycles sonores dans l'espace. Elle est égale au résultat de la multiplication de la vitesse de l'onde et de sa période. Ainsi les sons en hautes fréquences correspondent à de petites longueurs d'onde, tandis que les sons en basse fréquence correspondent à de grandes longueurs d'onde.

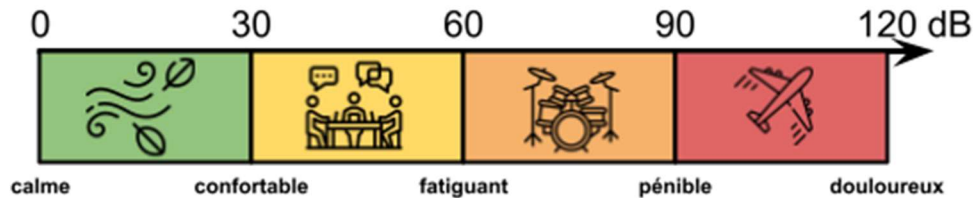


Figure 2 : Répartition des niveaux acoustiques

Les niveaux acoustiques varient de manière significative, allant de l'in audible au seuil de douleur, et sont mesurés en décibels (dB). Les sons inaudibles sont en dessous du seuil de détection, généralement inférieurs à 0 dB. Le seuil d'audibilité est défini égal à 0 dB pour une fréquence de 1 000 Hz. Le confort acoustique est généralement considéré entre 40 et 55 dB. Le seuil de gêne se situe généralement entre 70 et 90 dB, tandis que le seuil de douleur est autour de 120 dB. Ces mesures aident à évaluer et à concevoir des espaces respectant les niveaux sonores appropriés pour un confort et une sécurité auditifs optimaux.

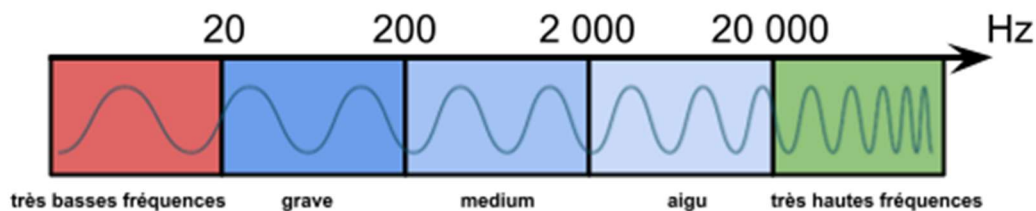


Figure 3 : Répartition du spectre de son

- les très basses fréquences, situés en dessous de la limite de perception humaine, se trouvent dans la plage des fréquences inférieures à 20 Hz. Les infrasons ont la particularité de pouvoir se propager sur de longues distances et de traverser des obstacles solides ;
- les sons audibles par l'oreille humaine couvrent généralement une plage de fréquences allant d'environ 20 Hz à 20 000 Hz. Cette plage est subdivisée en trois zones principales : les basses fréquences (20 Hz à environ 250 Hz), les fréquences moyennes (environ 250 Hz à 4 000 Hz) et les hautes fréquences (environ 4 000 Hz à 20 000 Hz) ;
- les très hautes fréquences, quant à eux, se situent au-delà de la limite supérieure de perception humaine, c'est-à-dire au-dessus de 20 000 Hz. Les ultrasons sont utilisés dans divers domaines, tels que l'imagerie médicale (échographie), la mesure de distance, etc.

Pour les mesures acoustiques, il est d'usage de travailler avec les fréquences normales. Celles-ci sont définies dans la norme NBN EN ISO 266 [3]. La Figure 4 reprend ces valeurs de bande d'octave ainsi que les fractions par tier d'octave.



Figure 4 : Représentation des bandes de fraction d'octave

Cette méthode de classification et de représentation permet de mieux représenter la perception logarithmique des fréquences pour l'être l'humain.

3.1.2 Acoustique des espaces clos

Les notions abordées dans les points suivants sont extraites du cours de monsieur Embrechts Jean-Jacques, notamment du chapitre 3 : « *Acoustique des salles* » [4]. Les illustrations sont inspirées du cours de monsieur Thienpont Arnaud (non publié).

3.1.2.1 Champ direct et diffus

En un point d'un espace clos, le niveau sonore résulte de deux types de propagations : le champ direct et le champ diffus :

- le champ direct fait référence aux sons qui atteignent l'auditeur directement depuis la source sonore, sans être réfléchis ou diffusés par des surfaces environnantes. Il s'agit des premiers sons entendus et sont généralement perçus comme les plus forts et les plus clairs. Le champ direct joue un rôle essentiel dans la compréhension de la parole et dans la perception des détails sonores ;
- le champ diffus est composé des diverses réflexions sur les parois du local. Ces sons réfléchis se mélangent au champ direct et contribuent à créer une ambiance sonore plus enveloppante et spatiale. Ainsi, les surfaces réfléchissantes telles que les murs, les plafonds, les sols et les objets dans une pièce peuvent, selon leurs caractéristiques, influencer plus ou moins fortement la répartition des sons diffus. Le champ diffus joue un rôle dans la perception de la profondeur, de la spatialité et de la réverbération d'un espace.

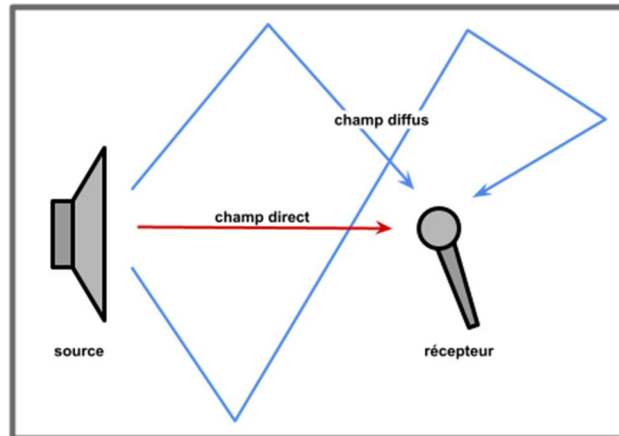


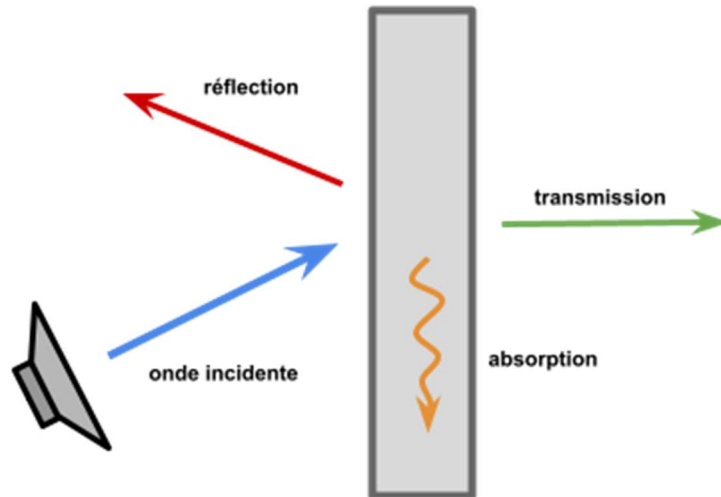
Figure 5 : Schéma champ direct et diffus

Il convient de souligner que la notion de bruit de fond est totalement subjective, et en ce qui concerne l'intelligibilité de la parole, le bruit de fond englobe tous les sons autres que la parole elle-même. Ainsi, dans un auditorium ou une salle de classe, la climatisation ou autres type installations plus ou moins bruyantes participent au développement d'un bruit de fond.

3.1.2.2 Absorption, réflexion et transmission

Lorsqu'une onde rencontre une paroi, elle se subdivise en 3 composantes : l'absorption, la réflexion et la transmission. Ces composantes décrivent le comportement des ondes sonores lorsqu'elles interagissent avec les surfaces en fonction des matériaux qui les composent.

- l'absorption est la capacité d'une surface à convertir l'énergie acoustique en énergie thermique plutôt que de la renvoyer. Plus un matériau est absorbant, plus il réduit l'écho et la réverbération dans une pièce ;
- la réflexion est la part de l'onde sonore qui est renvoyée par rebond sur une surface. Cette part de réflexion dépend des propriétés acoustiques de la surface, telles que sa rugosité, sa densité et l'angle d'attaque de l'onde. Dans certains cas, une réflexion contrôlée peut être souhaitée, comme dans les salles de concert, où des surfaces réfléchissantes sont utilisées pour améliorer la diffusion du son et créer une expérience acoustique immersive ;
- la transmission est la capacité des ondes sonores à traverser une paroi. Certains éléments, tels que les murs, les portes ou les fenêtres, peuvent transmettre le son d'une pièce à l'autre. La quantité de transmission dépend des propriétés d'isolation acoustique du matériau et de la façon dont il est installé. L'objectif est généralement de minimiser la transmission du son indésirable entre les espaces pour assurer une isolation acoustique adéquate.

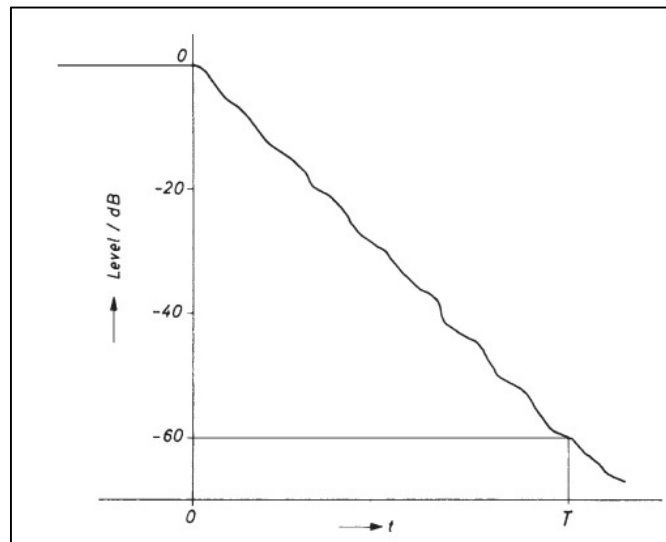


$$E_{(\text{onde incidente})} = E_{(\text{réflexion})} + E_{(\text{transmission})} + E_{(\text{absorption})}$$

Figure 6 : Schéma de principe de la relation entre l'absorption, la réflexion et la transmission au travers d'une paroi

Ces interactions dépendent de nombreux facteurs, parmi lesquels on retrouve la porosité, la rigidité et la densité du matériau qui compose la paroi, son épaisseur ou bien même l'angle d'incidence de l'onde sonore.

3.1.2.3 Temps de réverbération



Extrait 1 : Représentation du temps de réverbération (Acoustique des salles [3])

Le temps de réverbération décrit la durée pendant laquelle le son persiste dans un espace. Plus précisément, il est défini comme le temps nécessaire pour que le niveau sonore diminue de 60 décibels après l'arrêt de la source sonore. Il dépend de plusieurs facteurs, tels que la taille de la pièce, sa forme, les matériaux de surface, l'ameublement et la présence d'objets absorbants ou réfléchissants.

3.1.2.4 Confort acoustique : NBN S 01-400-2 : Critères acoustiques pour les bâtiments scolaires

La norme belge *NBN S 01-400-2* [5] définit des valeurs cibles pour atteindre un confort acoustique adéquat dans les établissements scolaires.

Plus précisément, cette norme définit des critères spécifiques pour différents aspects de l'acoustique, tels que le temps de réverbération, l'isolation acoustique, les niveaux sonores admissibles, etc. Ces recommandations couvrent divers espaces à l'intérieur des établissements scolaires, tels que les salles de classe, les auditoriums, les espaces communs, etc. Elles tiennent compte des besoins spécifiques de l'ensemble des utilisateurs, en veillant à ce que les conditions acoustiques soient adaptées à l'apprentissage, la communication et la concentration. Ce sera donc le point de départ de notre travail pour identifier les performances attendues de notre cas d'étude.

L'Extrait 2 est une partie du tableau issu de cette norme. On y trouve le temps de réverbération cible des espaces. Certains sont fixes et d'autres sont calculés d'après une formule mathématique.

Il est important de noter que ces valeurs sont uniquement indicatives et ne font pas l'objet d'une exigence stricte.

SALLES DE COURS	$L_{Aeq,nT,stat}$ [dB]	T_0 [s]
Ecole maternelle salles de jeux salles de repos	35 35	0.6 0.6
Ecole primaire, école secondaire, enseignement supérieur salles de classe ordinaires, espaces pour petits groupes, salles de séminaire, espaces pour cours privés, laboratoires de langues	35	$0,35 \times \lg(1,25 \times V)$
Salles de cours paysagères	40	0.8
Auditoires petit (≤ 50 personnes) grand (> 50 personnes)	35 30	$0,35 \times \lg(1,25 \times V)$ $0,35 \times \lg(1,25 \times V)$

Extrait 2 : Recommandations des performances acoustiques pour des équipements de service stationnaires et temps de réverbération de références pour des espaces avec différentes fonctions, (NBN S 01-400-2)

3.1.2.5 Approche statistique

L'approche statistique part des hypothèses suivantes :

- en tout point de la salle et à chaque instant, toutes les directions de propagation du son sont équiprobables ;
- en tout point de la salle et à chaque instant, la densité d'énergie sonore est égale.

En réalité, ces hypothèses sont difficiles à atteindre. En basses fréquences, la présence d'ondes stationnaires contredit cette notion. Cependant, à mesure que les fréquences augmentent, la multitude de modes propres rend les directions de propagation aléatoires et l'on constate une répartition plus équilibrée de l'énergie sonore.

3.1.2.6 Onde stationnaire

Lorsqu'une onde est émise, elle se propage jusqu'à ce qu'elle rencontre une paroi sur laquelle elle va se réfléchir. Lorsque sa longueur d'onde est proportionnelle aux dimensions de la pièce, elle se réfléchit sur elle-même. L'onde incidente et l'onde réfléchie se superpose alors pour donner naissance à une onde stationnaire. En certains points, les ondes s'annulent, donnant naissance à « nœuds » caractérisés par une pression nulle. Ces points restent fixes dans l'espace et dans le temps. Entre ces nœuds se situent les « ventres », qui à l'opposé, présente un niveau sonore mesuré supérieur à celui de l'onde incidente.

Ce phénomène peut être mis en évidence avec l'expérience de la corde de Melde [6]. Une corde tendue est mise en vibration, lorsque la longueur de la corde correspond à un multiple de la longueur d'onde de cette fréquence d'excitation, on observe une onde stationnaire comme illustré sur la Figure 7.

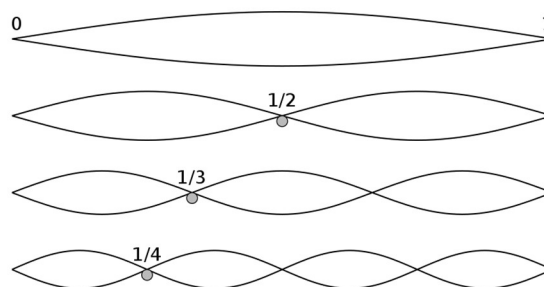


Figure 7 : Représentation des 4 premiers modes propres d'une corde tendue fixée à ses deux extrémités, (Expérience de Melde)

$$f_n = n \times f_0$$

Equation 1 : Relation entre la fréquence fondamentale et l'harmonique de rang n

- f_0 = fréquence fondamentale
- f_n = harmonique de rang n

La fréquence des modes propres d'une pièce dépend donc de ses dimensions. Etant de l'ordre du mètre, celles-ci sont donc situées dans les basses fréquences. Selon la relation décrite dans l'Equation 1, si 2 m séparent les murs parallèles d'une pièce, une onde stationnaire peut apparaître pour des fréquences de 85 Hz, 170 Hz, 255 Hz, 340 Hz, ...

La prise en compte mathématique des ondes stationnaires demande des outils de type méthode par éléments finis, et il n'est donc pas simple de modéliser et simuler le comportement complet de tels espaces.

3.1.2.7 Formule de Sabine

Dans le cadre de mesures acoustiques réalisées en chambre réverbérante, il est admis par la norme NBN ISO 354 [7] d'utiliser cette approche et les formules simplifiées qui en découlent.

La formule de Sabine permet de calculer le temps de réverbération d'une salle en fonction de son volume et des caractéristiques des parois qui la composent. Cette formule est valide en admettant les hypothèses de l'approche statistique de la répartition du son.

$$T_r = \frac{0.163.V}{S.\bar{\alpha}}$$

Equation 2 : Formule de Sabine

La formule de Sabine peut être étendue pour tenir compte de l'absorption dans l'air. La formule de Sabine corrigée s'écrit :

$$T_r = \frac{0,163.V}{S.\bar{\alpha} + 4m.V}$$

Equation 3 : Formule de Sabine corrigée

- V = volume du local [m³]
- S = surface totale des parois [m²]
- m = coefficient d'atténuation du milieu de propagation [m⁻¹]
- $\bar{\alpha}$ = coefficient moyen d'absorption de la salle

Le coefficient moyen d'absorption de la salle se calcule de la manière suivante :

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^N (\alpha_i \cdot S_i)}{\sum_{i=1}^N S_i}$$

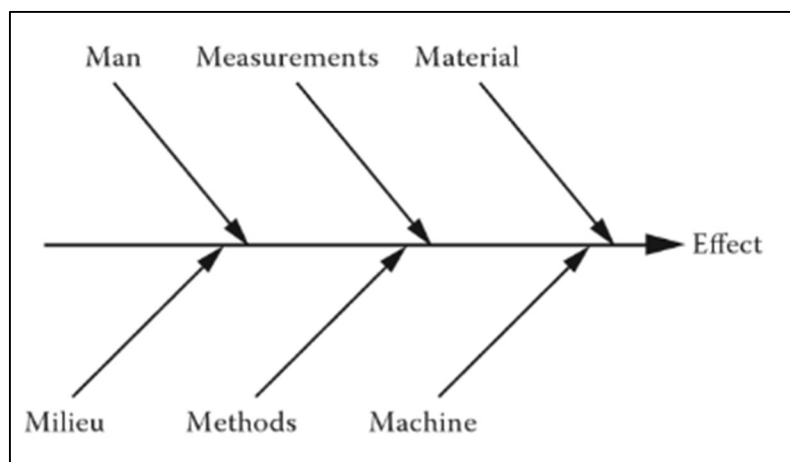
Equation 4 : Formule du coefficient moyen d'absorption

- α_i le coefficient d'absorption de chaque paroi i. Il est compris entre 0 (surface totalement réfléchissante) et 1 (totalement absorbante).
- S la surface de chaque paroi i.[m²]

3.2 Mesures

3.2.1 Répétabilité et reproductibilité des mesures

La méthode des 6 M décrite dans « *Root Cause Analysis : A Step-By-Step Guide to Using the Right Tool at the Right Time* », de Matthew A. Bzarsalou [8] est une approche utilisée dans le domaine de la gestion de la qualité pour analyser et identifier la cause d'une erreur. Les 6 M se réfèrent aux six facteurs ou catégories qui peuvent être identifiés comme étant à l'origine d'un problème ou d'un défaut de mesure. Le diagramme d'Ishikawa en arêtes de poisson illustre cette méthode :



Extrait 3 : Diagramme d'Ishikawa, (Root Cause Analysis)

- **Main-d'œuvre** : il s'agit du facteur humain impliqué dans le processus. Cela inclut les compétences, la formation, l'expérience et le comportement des personnes qui effectuent le travail.
- **Matériaux** : cela comprend les matières premières, les composants ou les produits utilisés dans le processus.
- **Méthodes** : cela fait référence aux procédures utilisés pour effectuer une tâche. Il s'agit de déterminer la manière dont les choses sont faites et de garantir qu'elles sont exécutées de manière efficace et conforme.
- **Moyens** : cela concerne les équipements, les machines, les outils ou les technologies utilisés dans le processus. Cela comprend également l'état et la performance de ces équipements.
- **Mesures** : cela se rapporte aux systèmes de mesure, aux instruments et aux méthodes utilisés pour évaluer et contrôler les performances et les résultats du processus.
- **Milieu** : cela se réfère à l'environnement dans lequel le processus se déroule. Cela inclut les conditions physiques, les paramètres environnementaux, les facteurs externes et internes qui peuvent influencer le processus.

3.2.2 Mesures acoustiques

3.2.2.1 Salles de mesures

Il existe différents types de salles de mesure acoustique conçues pour effectuer des tests et des analyses précises des caractéristiques acoustiques d'un espace. Parmi elles on retrouve :

- la salle anéchoïque ou chambre sourde : une salle anéchoïque est une pièce qui est conçue pour minimiser la réflexion sonore interne. Elle est recouverte de matériaux absorbants acoustiques spéciaux sur toutes les surfaces, y compris les murs, le sol et le plafond. Ces salles sont utilisées pour mesurer la directivité des enceintes, les réponses en fréquence des microphones et d'autres mesures nécessitant une absence totale de réflexions acoustiques ;
- la salle réverbérante : une salle réverbérante est une salle de grande dimension (de 200 m³ à 300 m³) conçue pour avoir une réverbération sonore contrôlée et uniforme. Elle est utilisée pour mesurer le temps de réverbération, l'absorption acoustique d'échantillons de matériaux (10 m³) et d'autres paramètres acoustiques liés à la réverbération ;
- la cabine alpha : une cabine alpha est un module de test acoustique spécialement conçu pour offrir une solution efficace et précise lors des tests de coefficients d'absorption en champ diffus. Avec sa configuration compacte (6 m³) et sa plage de fréquences limitée de 250 Hz à 10 000 Hz par ses dimensions, elle permet d'évaluer rapidement les performances acoustiques de petits échantillons (1 m²). Il s'agit donc d'une version de la salle réverbérante à une plus petite échelle.



Figure 8 : Cabine alpha, (mecanum.com [9])

Ces salles sont isolées acoustiquement de toute perturbation extérieure pour ne pas fausser les mesures réalisées à l'intérieur de celles-ci.

3.2.2.2 Procédures de mesures (Normes)

NBN ISO 3382-2 : Mesurage des paramètres acoustiques des salles – Partie 2 : Durée de réverbération des salles ordinaires

La norme NBN ISO 3382-2 [10] fournit des directives détaillées sur la manière de mesurer la durée de réverbération en utilisant des techniques telles que la méthode du bruit interrompu ou la réponse impulsionnelle intégrée. Elle définit également les conditions de mesure, les positions des microphones et des sources sonores, ainsi que les paramètres et les formules de calcul associés.

	Contrôle	Expertise ^a	Précision
Combinaisons de source et de microphone	2	6	12
Positions de source ^b	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Positions de microphone ^c	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Nombre de décroissances dans chaque position (méthode du bruit interrompu)	1	2	3

^a Lorsque le résultat est utilisé pour un terme de correction dans d'autres mesurages du niveau d'expertise, une seule position de la source et trois positions de microphone sont nécessaires.

^b Pour la méthode du bruit interrompu, des sources non corrélées peuvent être utilisées simultanément.

^c Pour la méthode du bruit interrompu, et lorsque le résultat est utilisé pour un terme de correction, une perche de microphone rotatif peut être utilisée à la place de plusieurs positions de microphone.

Extrait 4 : Nombre minimal de positions et de mesurages, (NBN ISO 3382-2)

Dans le cas de la mesure d'une réponse impulsionnelle une alternative a été développée pour remplacer l'utilisation d'un moyen tel qu'un coup de feu. Il s'agit d'utiliser un signal de type séquence de longueur maximale, autrement dit, un signal par balayage de fréquence plat : la méthode du SWEEP.

NBN ISO 354 : Mesurage de l'absorption acoustique en salle réverbérante

La norme NBN ISO 354 fournit des directives détaillées pour la réalisation des mesures d'absorption acoustique en utilisant une salle réverbérante spécifiée. Elle définit les conditions de mesure, les équipements nécessaires, les positions des matériaux à tester et les procédures de calcul pour déterminer les coefficients d'absorption acoustique. Cette formule est issue de la formule de Sabine présenté au paragraphe 3.1.2.6.

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3.V.\left(\frac{1}{c_2.T_2} - \frac{1}{c_1.T_1}\right) - 4.V(m_2 - m_1)$$

Equation 5 : Formule du calcul de l'aire d'absorption acoustique équivalente de l'éprouvette, (NBN ISO 354)

- V = volume du local [m³]
- c_i = vitesse du son aux conditions i [m.s⁻¹]
- T_i = durée de réverbération de la salle aux conditions i [s]
- m_i = coefficient d'atténuation du milieu de propagation, ce facteur s'annule si les conditions de température et de pressions sont les mêmes lors des deux essais.

Ainsi, il est possible d'en déduire la valeur du coefficient d'absorption α_s :

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S}$$

Equation 6 : Formule du coefficient d'absorption de l'éprouvette, (NBN ISO 354)

- A_T = aire d'absorption équivalente de l'éprouvette calculée [m²]
- S = aire couverte par l'éprouvette [m²]

C'est avec les indications de cette norme ainsi que cette formule que seront évalués les coefficients d'absorption des prototypes par la suite.

NBN ISO 11654 : Acoustique – Absorbant pour l'utilisation dans les bâtiments – Evaluation de l'absorption acoustique

La norme NBN ISO 11654 [11] indique la méthode à suivre pour mettre en forme les coefficients d'absorption α :

- $\alpha > 1$ indique que plus de 100% de l'énergie incidente est absorbée, ce qui est impossible physiquement. Il ne s'agit pourtant pas d'une erreur de mesure. Ces valeurs sont liées à un phénomène de diffraction des ondes sonores sur les bords de l'échantillon, qui s'apparente à une certaine forme d'absorption de l'énergie. Ces valeurs sont admises par la norme NBN ISO 354. En pratique, ces valeurs doivent être ramenées à 1.00 pour les calculs ;
- α est calculé à la seconde décimale et arrondi par pas de 0.05.

3.3 Autre réglementation : Norme incendie

3.3.1 NBN EN 13501-1 : Classement des produits et éléments de construction – Partie 1 : Classement à partir des données d'essais de réaction au feu

La norme NBN EN 13501-1 [12] permet de classer les différents matériaux et de leur attribuer un indice de réaction au feu. Cette classification est résumée dans l'Extrait 5 issu du site d'un spécialiste en protection incendie.

Classement des EUROCLASSES selon EN 13501-1			Exigences réglementaires françaises
Comportement au feu	Production de fumée	Gouttelettes enflammées	
A1	-	-	Incombustible
A2	s1	d0	M0
A2	s1	d1	M1
A2	s2 s3	d0 d1	
B	s1 s2 s3	d0 d1	
C	s1 s2 s3	d0 d1	M2
D	s1	d0	M3
	s2 s3	d1	M4 (non gouttant)
E	Non applicable	d1	M4
E	Non applicable	d2	Pas de classement
F	Non applicable	Non applicable	Pas de classement

Extrait 5 : Récapitulatif du classement de réaction au feu, (nullifire.com [13])

3.3.2 Règlement Sécurité Incendie des ERP - Chapitre III, Articles AM : Aménagements Intérieur, Décoration et Mobilier

Le RSI (Règlement Sécurité Incendie) [14] des ERP (Etablissement Recevant du Public) prescrit les recommandations relatives aux incendies dans les ERP en fonction des différents éléments de construction.

3.3.2.1 AM5 : Plafonds des dégagements non protégés et des locaux

§ 1. Les plafonds des dégagements non protégés et des locaux sont classés B-s3, d0 ou en catégorie M1.

Toutefois, il est admis que 25 % de la superficie totale de ces plafonds soient réalisés en produits ou éléments classés C-s3, d0 ou de catégorie M2 dans les dégagements et D-s3, d0 ou de catégorie M3 dans les locaux.

Extrait 6 : Article AM5, (RSI)

Les revêtements acoustiques placés au plafond d'une salle doivent répondre aux critères de la classe M3 s'il couvrent moins de 25% de sa surface. Au-delà ils doivent répondre aux critères de la classe M2.

3.3.2.2 AM 9 : Revêtements muraux tendus et éléments de décoration en relief fixés à l'intérieur des locaux ou dégagements

Dans les locaux ou dégagements, les revêtements muraux tendus et leurs éventuels intercalaires sont de catégorie M2.

Les éléments de décoration en relief fixés sur les parois verticales des locaux ou dégagements protégés ou non sont classés C-s3, d0 ou en matériaux de catégorie M2 lorsque la surface globale de tous ces éléments, projetée sur les parois verticales, est supérieure à 20 % de la superficie totale de ces parois.

Extrait 7 : Article AM9, (RSI)

Les revêtements acoustiques placés sur les parois verticales d'un local doivent répondre aux critères de la classe M2 s'ils couvrent plus de 20% de ces surfaces, sinon aucune réglementation n'est nécessaire.

3.4 Caractéristiques acoustiques des matériaux

3.4.1 Matériaux de construction classique

Tous les matériaux ne possèdent pas les mêmes propriétés d'absorption acoustique. En effet, l'absorption acoustique dépend de plusieurs facteurs, tels que la structure, la composition et l'épaisseur du matériau. Certains matériaux sont naturellement plus absorbants, tandis que d'autres ont une capacité d'absorption plus limitée. Le tableau de l'Extrait 8 issu du site internet www.acouphile.fr [15] recense une liste non-exhaustive des matériaux génériques rencontrés lors de l'évaluation de la qualité acoustique d'une salle.

Fréquence [Hz]	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Béton	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05
Enduit plâtre	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Vitrage de 2 à 4 mm	0.20	0.15	0.10	0.05	0.05	0.05
Vitrage > 4 mm	0.15	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00
Ouverture	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Moquette	0.10	0.15	0.30	0.35	0.60	0.85
Parquet en bois	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
carrelage	0.05	0.10	0.00	0.05	0.05	0.05

Extrait 8 : Tableau des coefficients d'absorption acoustique de matériaux de construction génériques, (acouphile.fr)

Nous constatons que les matériaux courants comme le plâtre, le béton et le carrelage offrent en général peu d'absorption, tandis que la moquette par exemple est très efficace. C'est pourquoi il est souvent nécessaire de recouvrir certaines surfaces avec des produits absorbants spécifiques conçu à cet usage.

3.4.2 Produit acoustique commun

Les matériaux absorbants acoustiques présents sur le marché offrent une grande diversité de choix en termes de performances et de caractéristiques. Il existe 3 grandes familles d'absorbants acoustiques :

- les panneaux acoustiques, composé d'un matériau poreux relativement fin. (medium – aigu) ;
- les résonateurs de Helmholtz, des pièges à son sur un principe de cavités. (medium) ;
- les panneaux à membre, aussi appelé « bass-trap » beaucoup plus épais. (grave).

Dans le cadre de ce travail, ce sont des absorbants poreux en panneaux que nous allons développer par la suite.

La porosité joue un rôle crucial dans l'absorption acoustique d'un matériau. Plus un matériau est poreux, plus il offre de possibilités d'absorber le son. Les pores agissent comme des voies permettant au son de pénétrer à l'intérieur du matériau et d'être dissipé sous forme de vibrations et donc d'énergie thermique. Cependant, il est important de noter que la densité du matériau peut également influencer son absorption acoustique. Il convient également de prendre en compte d'autres facteurs, tels que la taille et la forme des pores. En considérant la densité et la porosité d'un matériau, les concepteurs peuvent les sélectionner pour atteindre les performances d'absorption acoustique souhaitées dans un espace donné.

Parmi les panneaux acoustiques, on retrouve par exemple ceux en fibre tel que la laine de roche ou de verre, ainsi que ceux en mousse. Certains sont multicouches et donc composés de matériaux plus rigides comme le bois ou le métal perforé. De plus, ces matériaux peuvent être disponibles dans une variété de finitions et de formes, offrant ainsi des possibilités esthétiques pour s'adapter à différents styles architecturaux. Les Figure 9 et Figure 10 illustrent respectivement des surfaces de produits absorbant surfacique et des éléments acoustiques suspendus issus de la marque Rockfon **[16]**.



Figure 9 : Absorbants acoustiques surfaciques horizontaux et verticaux, (rockfon.com)



Figure 10 : Absorbants acoustiques en éléments suspendus, (rockfon.com)

3.4.3 Produit acoustique DIY

Les tutoriels DIY (Do It Yourself : Faites le vous-même) de fabrication de produits acoustiques sont assez répandus sur le web. De nombreux créateurs de contenus vulgarisent le fonctionnement des panneaux absorbants et exposent leur mode de conception de panneaux acoustiques maison avec un budget relativement limité et avec des matériaux de récupération. C'est le cas de Matthew Perks le créateur de la chaîne YouTube « *DIY Perks* » [17] qui a réalisé en 2016 une première vidéo sur le sujet intitulée : « *How to Make High Performance Sound Absorption Panels for \$5* » puis une seconde plus récemment en 2019 : « *High-Performance DIY Acoustic Panels (Build Guide)* ».

Ces nombreux tutoriels sont une source d'inspiration très riche pour la forme des différents prototypes de ce travail de recherche.

3.5 Acoustique et réemploi

3.5.1 Isolation acoustique

Dans le domaine du réemploi, la filiale PAN-TERRE de la société belge ACOUSTIX [18] basée à Herstal en Wallonie développe un matériau acoustique à base de papier recyclé. Ce produit se présente sous forme de panneaux acoustiques isolants de 16 mm d'épaisseur. Contrairement aux produits absorbants, le domaine qui nous concerne, celui-ci s'emploie pour l'isolation acoustique des parois des locaux. La Figure 11 montre la gamme de produit PAN-TERRE et les différents textiles de finitions proposés.



Figure 11 : Panneau acoustique PAN-TERRE, (acoustix.be)

3.5.2 Absorbant acoustique

L'entreprise française PYT Audio [19] basée en Vendée (85) développe des produits acoustiques absorbants à base de produit issus du recyclage. Certains de leurs produits sont fait avec une structure en carton recyclé et leur remplissage est en partie composé de fibre de PET (polytéréphtalate d'éthylène) recyclé.



Figure 12 : Panneau absorbant PYT AUDIO, (pytaudio.com)

4 Proposition – cadre d'étude

4.1 La salle de projet

4.1.1 Description

La salle de projet est une salle de travail mise à la disposition des étudiants de la filière ingénieur civil architecte de la faculté des sciences appliquées de l'université de Liège. Cette salle se situe au B52 sur le campus du Sart Tilman.

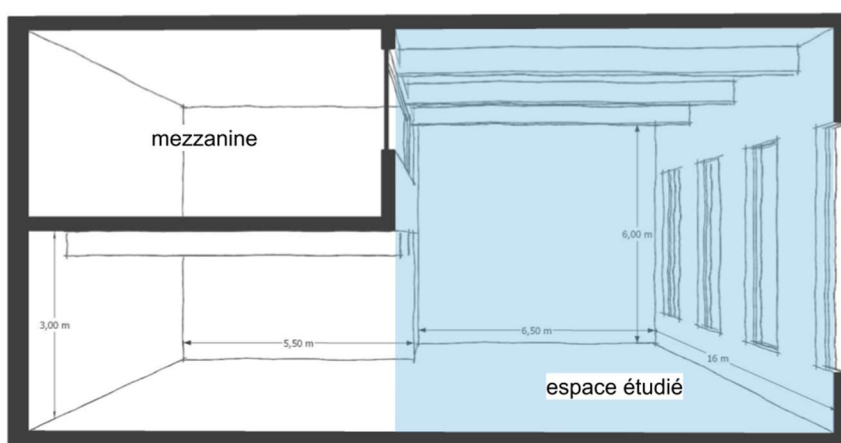


Figure 13: Perspective et dimensions de la salle de projet

La Figure 13 illustre l'agencement de ce local. C'est une salle séparée en deux parties, la première est située du côté de l'entrée, à gauche sur l'image, est séparée en deux espaces, un coin détente et un coin de travail ; la seconde constitue une grande salle disposant d'une double hauteur sous plafond. Sur sa longueur, la salle dispose sur la première partie d'une mezzanine cloisonnée sur sa quasi-totalité. Le revêtement sur la grande majorité des surfaces est le béton, on retrouve également un peu de plâtre et de grande surfaces vitrées.

La salle de projet accueille diverses activités, c'est une salle de TP pour la réalisation de maquettes de travail, une salle de réunion pour mener des travaux de groupe, une salle de cours pour les classes de grands effectifs ou imposée par les normes sanitaires. C'est aussi une salle de présentation et de jury dans le cadre de certains projets d'architecture.

Cet espace joue également le rôle de grande salle commune qui sur le temps du midi accueille une grande partie des différentes promotions de la filière pour se restaurer dans la convivialité profiter du grand espace que profère cette salle.

La fréquentation de cette salle varie en fonction de l'heure de la journée et du calendrier universitaire. En moyenne, d'après nos observations, nous estimons qu'il y a environ 20 à 30 personnes lors des cours ou des présentations orales, tandis que pendant la pause déjeuner, ce nombre peut atteindre 40 personnes.

4.1.2 Qualité acoustique

4.1.2.1 Attentes et besoin de la salle

Au paragraphe 3.1.2.4, nous avons pris connaissance de la norme NBN S01-400-2 relative au temps de réverbération recommandé des salles en fonction de leur occupation. La salle de projet, par son aménagement visible sur la Figure 14 de ses différents usages, fait l'objet d'une réflexion quant à la catégorie où la placer. Elle peut être considérée comme :

- une salle de classe ;
- un atelier ;
- un foyer que nous pouvons assimiler à une salle de restauration.



Figure 14: La salle de projet – partie en double hauteur

Tableau 1: Temps de réverbération de référence pour la salle de projet, (NBN S 01-400-2)

Type de l'espace	Temps de réverbération de référence [s]
Atelier	0.8
Salle de restauration	1
Formule	$0.35 \times \log (1.25 \times V) = 1.1$

Le Tableau 1 reprend les valeurs des temps de réverbération recommandées par cette norme. Les valeurs données pour les ateliers et les salles de restauration sont fixes. Or la double hauteur de notre salle impacte significativement le volume de celle-ci qui est d'environ 625 m². Ainsi la formule utilisée pour d'autres espaces nous indique un temps de réverbération cible de 1.1 s.

Pour rappel, cette norme est une recommandation et non une contrainte stricte pour la conception des espaces. Nous adopterons comme objectif pour la suite de répondre à cette valeur cible.

4.1.2.2 Temps de réverbération mesuré

La salle de projet est une salle aux grandes dimensions comme reporté sur la Figure 13. Sa double hauteur lui donne un volume conséquent et une acoustique particulière, accentuée par la nature de son revêtement. Nous allons donc mesurer ce temps de réverbération pour identifier l'écart par rapport à la recommandation.

Des mesures de la salle ont été réalisées dans les conditions suivantes :

- la salle était vide pendant les enregistrements ;
- la source sonore présentée par la suite est placée à l'avant de la salle, dans l'optique de reproduire la configuration d'une présentation de jury ;
- la mesure se fait par balayage de fréquence à l'aide d'un SWEEP (ex : 100 Hz à 8 000 Hz en 8 s) commandé et traité par le logiciel *Room EQ Wizzard*.



Figure 15: Mesure du temps de réverbération de la salle de projet, (22/03/2023)

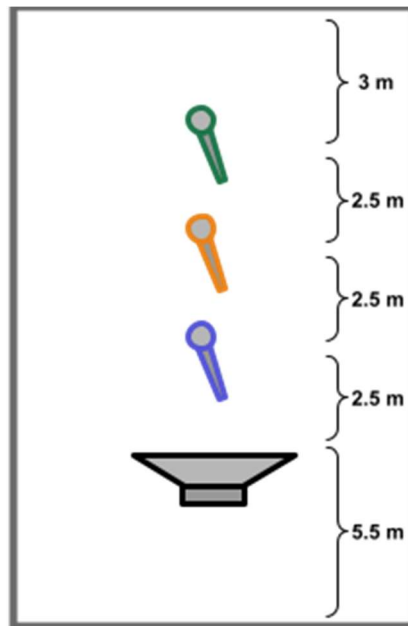


Figure 16: Position des points de mesure

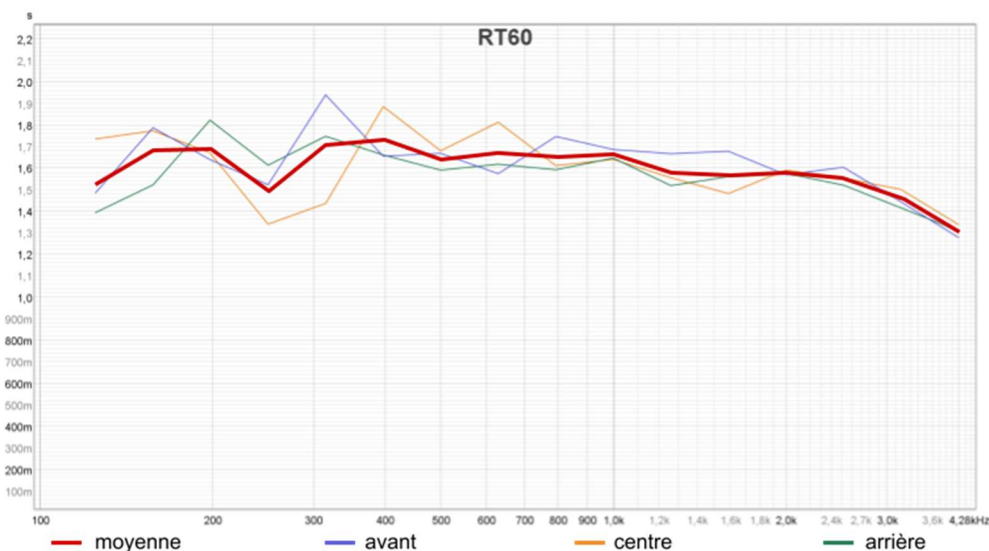


Figure 17: Mesure du temps de réverbération ($T_{réel}$) de la salle de projet aux 3 emplacements, (22/03/2023)

Conformément à la norme NBN ISO 3382-2 présentée au paragraphe 3.2.2.2, les mesures ont été réalisées en 3 points. Ils sont identifiés sur la Figure 16, respectivement espacés de 2, 4 et 6 mètres de la source sonore. Contrairement aux indications de cette même norme, les mesures ont été effectuées dans la salle meublée avec une source unidirectionnelle. Donc l'ensemble du mobilier présent dans la salle participe à l'atténuation du temps de réverbération.

Les résultats des mesures montrent que pour les 3 positions enregistrées le temps de réverbération est supérieur à 1,5 s sur une grande partie du spectre observé. Ce temps de réverbération reste largement supérieur aux attentes de performances acoustiques soulignées au paragraphe 4.1.2.1. Il est recommandé de ne pas dépasser 1,1 s, or ici le dépassement est de l'ordre de 0,5 seconde.

4.2 Prototypes

4.2.1 Brainstorming

4.2.1.1 Matériaux disponibles

La salle de projet est une source de matière de réemploi que nous allons exploiter pour la réalisation d'absorbant acoustique. Nous y trouvons en grande quantité du carton de différentes épaisseurs et sous toutes les formes : carton alvéolé, carton brun, carton plume, papier carton, ... Il y a également un grand nombre de maquettes stockées depuis plusieurs années et de maquettes de travail entreposées sur les différentes étagères.

L'atelier de la salle de projet est également encombré de nombreuses chutes de bois, de planches d'OSB, de MDF, et de palettes de transport. Des tubes en cartons y sont également stockés comme on peut le voir sur la Figure 18.

Complétons cette liste de ressources avec l'ajout de tubes cartonnés et des boîtes à œuf. En effet, les boîtes à œuf sont souvent mentionnées comme une solution pour corriger la réverbération d'un espace de manière économique. Cette idée reçue attire notre attention et nous allons vérifier cela.



Figure 18 : Aperçu de la matière première à disposition

4.2.1.2 Idéation des prototypes

Très vite la conception d'un cadre est devenue une solution pour répondre au besoin de conserver l'ensemble des types de prototypes dans les mêmes dimensions, ce qui sert également par la suite à conserver les mêmes conditions de mesure pour tous.

L'inventaire de l'ensemble des matériaux à disposition fait naître plusieurs idées de conceptions :

- **Copeaux** de carton

Ce premier concept vient mettre en œuvre la création d'un matériau « labyrinthique ». L'idée est de déchirer le carton en petit copeaux, puis de les piéger dans un caisson avec une grille qui permet de laisser le son s'y introduire et s'y dissiper.

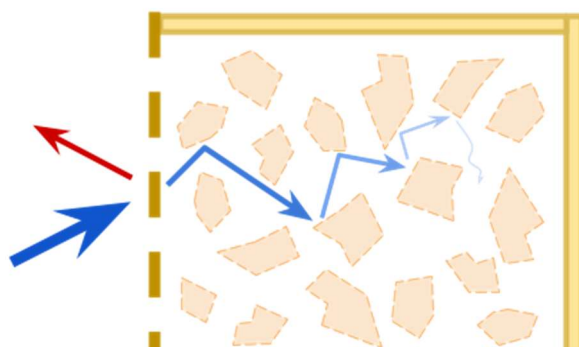


Figure 19 : Schéma de principe en coupe du prototype en **copeaux** de carton

Le schéma de la Figure 19 illustre le principe recherché pour dissiper cette énergie sonore. L'onde sonore incidente qui arrive sur la surface du prototype est en partie réfléchi (flèche rouge). Ensuite elle, va également « rebondir » sur l'ensemble des copeaux de carton pour s'y frayer un chemin. A chaque « rebond » c'est une partie de son énergie qui est transmise aux copeaux qui l'absorbent.

Tous les types de cartons sont donc possibles à mettre sous cette forme, nous ferons donc un mélange de carton plume, carton brun et carton alvéolé déchiré en copeaux d'une taille allant de 3 à 5 cm en moyenne.

- Millefeuille de carton

Pour ce concept, des tranches de carton sont empilées parfaitement alignées pour afficher une face à l'aspect d'un mur alvéolé composé de milliers de trous. Ces tranches font la longueur du caisson et créent de longues cavités très étroites. Le carton employé ici doit donc être alvéolé.

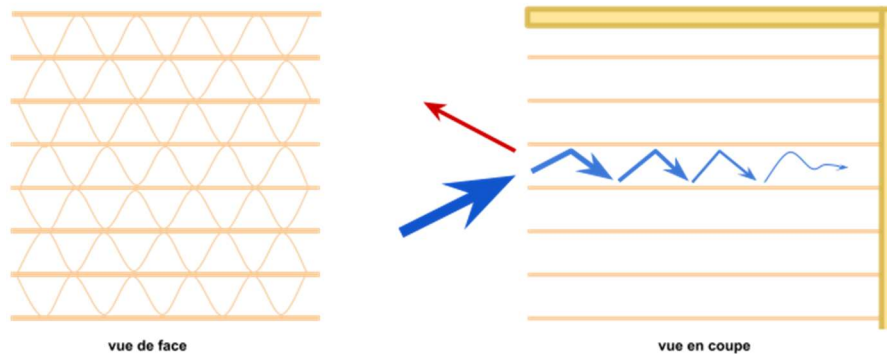


Figure 20 : Schéma de principe du prototype en *millefeuille* de carton

Le schéma de la Figure 20 montre les rebonds successifs qu'effectuerait l'onde sonore sur la longueur longue du trou d'un diamètre de quelques millimètres. Ce qui à nouveau entraîne une absorption relativement importante. Cependant, ceci doit être nuancé car l'angle de l'onde incidente joue un rôle important dans cette configuration.

- Disposition en tubes de carton

Le prochain prototype exploite la géométrie des tubes de carton pour bénéficier des caractéristiques absorbante du carton. Ceci permet de démultiplier la surface de carton que l'onde peut rencontrer.

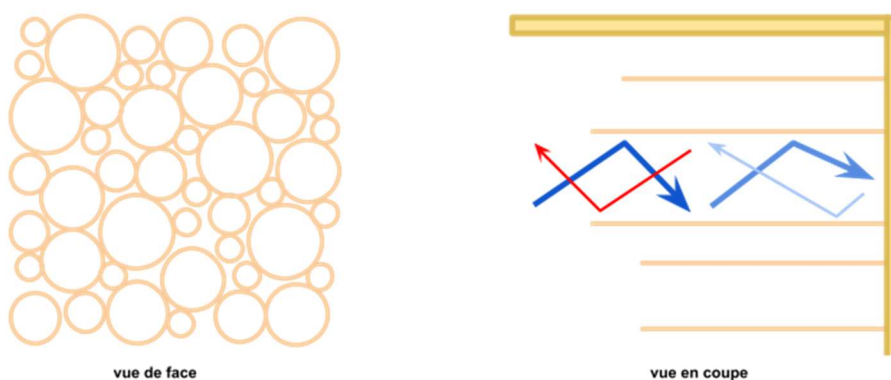


Figure 21 : Schéma de principe du prototype en *tube* de carton

Comme la Figure 21 le montre, son fonctionnement se rapproche du concept du carton en *millefeuille*, mais les sections des tubes étant bien plus grandes que celles des alvéoles, l'impact sur l'absorption sera normalement beaucoup moins important sur ce prototype.

- Montage en **Boîtes à œufs**

Les boîtes à œufs, par leur surface en papier carton particulière sont théoriquement relativement efficaces pour absorber les très hautes fréquences. De plus, leur géométrie crée de petites cavités, ce qui augmente la surface du matériau et donc le nombre de rebonds potentiels.

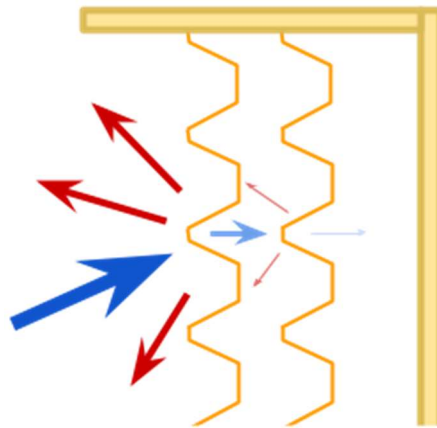


Figure 22 : Schéma de principe en coupe du prototype en **boîtes à œufs**

L'épaisseur des boîtes à œufs implique une capacité d'absorption intéressante dans très hautes fréquences uniquement. Pour étendre cette plage d'absorption, nous plaçons donc deux couches de boîtes espacées de quelques centimètres, suivant le principe que plus il y aurait de couches empilées, plus cette plage de fréquence s'étendrait dans les mediums.

- Moulage de pâte de papier carton

L'idée de ce prototype est de reprendre le concept des **boîtes à œufs** en modelant des tuiles plus en pâte de papier et de carton dissous dans de l'eau puis séchées. Cela permettrait de produire des tuiles plus épaisses que les boîtes à œuf. Ces tuiles pourraient également avoir une géométrie complexe et être microperforée. Il est important de noter que ce concept il demande un temps considérable de réalisation pour fabriquer les tuiles.

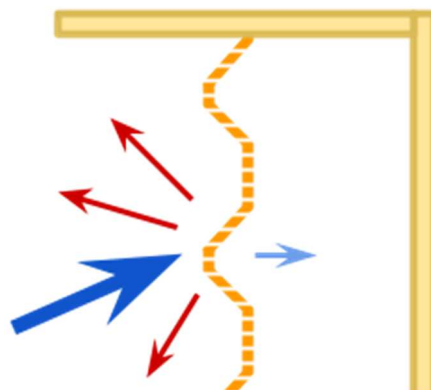


Figure 23 : Schéma de principe en coupe du prototype en pâte de papier carton

4.2.2 Evaluation de faisabilité

Il est nécessaire de prendre en compte qu'une seule et unique personne allait devoir concevoir l'ensemble des prototypes, et donc il est important de limiter leur temps de conception pour être sûr de leur fabrication dans les temps. En termes de ressources il faut être vigilant à rester dans des volumes de matière disponible et manipulable.

Tableau 2 : Evaluation qualitative des temps de construction des différents prototypes

	Type	Temps de conception	Quantité de matériaux	Moyen de fixation
0	Cadre	++	++	clous/vis
1	Boîtes à œufs	+	++	agrafes
2	Tubes	++	+++	agrafes
3	Copeaux	++++	+++	grilles/équerres/vis
4	Millefeuille	+++	++++	colle blanche
5	Panneau en pâte de carton	+++++	+++++	clous/vis/agrafes

L'évaluation réalisée dans le Tableau 2 fait ressortir que le type de prototype en pâte de carton est potentiellement le plus complexe à réaliser. Le mode opératoire pour réaliser la pâte puis la faire sécher dans des moules, à construire également, dans un espace de séchage improvisé ne faciliterait pas leur création.

Les 4 premiers prototypes ainsi que le cadre sont donc sélectionnés pour être réalisés.

4.2.3 Conception des prototypes

4.2.3.1 Cadre

C'est le cadre des prototypes qui a déterminé les dimensions de l'ensemble des panneaux. Une grande plaque d'OSB de 0.7 cm d'épaisseur aux dimensions et de 77 cm par 134 cm a servi de fond pour créer 2 panneaux de 0.5 m² environ. Deux chutes de MDF de 1.2 cm coupées en bandes de 15 cm permettent de créer les bords. Des bouts de petits tasseaux servent dans les coins à relier les éléments entre eux avec des vis. Ainsi, le cadre est assez résistant pour supporter les futures manipulations et transports. Ce concept est fortement inspiré de la vidéo de la visite de l'atelier de *Music City Acoustics* présentée au paragraphe 3.4.3.



Figure 24 : Conception du cadre des prototypes

4.2.3.2 Boîtes à œufs

Le prototype en **boîtes à œufs** est de loin le plus rapide à réaliser. Les boîtes sont assemblées entre elles sur deux épaisseurs avec des agrafes et sont ensuite agrafées à une feuille de carton aux dimensions du cadre. Cela permet de les manipuler sans arracher les points de fixation.



Figure 25 : Conception du prototype en **boîtes à œuf**

4.2.3.3 Tubes

Celui en **tubes** demande un peu plus de temps de confection. En effet, il est important de répartir les rouleaux de différents diamètres assez équitablement entre les deux panneaux. Ceux-ci varient de 4 cm à 15 cm en diamètre et ont une hauteur variée entre 7 cm et 15 cm. L'ensemble du réseau de rouleaux est ensuite agrafé ensemble.



Figure 26 : Conception du prototype en *tube*

4.2.3.4 Millefeuille

Le *millefeuille*, qui se compose de fines tranches de carton parfaitement alignées, est le prototype le plus consommateur de matières premières. Le carton alvéolé est choisi pour ce prototype en raison de sa caractéristique unique. Il est constitué de ces alvéoles qui, une fois assemblées, forment un réseau de longs tubes en tranches. Les tranches sont d'une largeur de 12 cm à 15 cm puis encollées ensemble. Le carton utilisé est donc le même que le carton récupéré dans le but de réaliser des maquettes de travail pour les différents ateliers du cursus. Mais la grande quantité de carton nécessaire a impliqué la récupération de cartons en dehors de la salle de projet. Ce n'est donc pas un déchet produit exclusivement dans la salle de projet, même s'il s'agit bien du même matériau de réemploi.

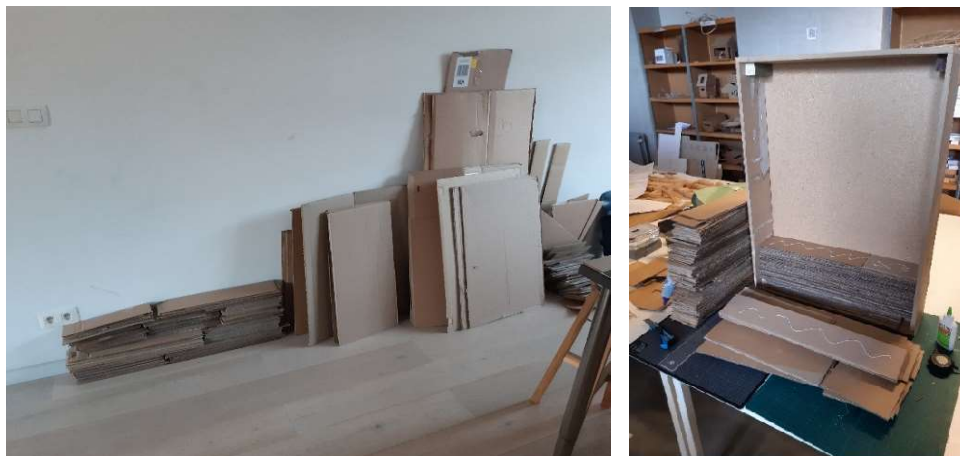


Figure 27 : Conception du prototype en *millefeuille*

4.2.3.5 Copeaux

Le prototype en copeaux de carton est celui qui a nécessité la création d'un caisson relativement étanche pour empêcher les morceaux de s'échapper sur les bords. Initialement, un grillage et un tissu tendu étaient prévus pour maintenir les morceaux de carton dans le cadre, mais des grilles perforées issues du désossement de panneaux absorbants ont été trouvées au labo d'acoustique. Pour simplifier le montage-démontage du prototype, des équerres en aluminium ont été usinées pour les maintenir en place. C'est le prototype qui a pris le plus de temps à être conçu, surtout pour déchirer des copeaux de carton de manière manuelle. Toutefois, ce procédé pourrait être simplifié à l'aide d'une broyeuse.

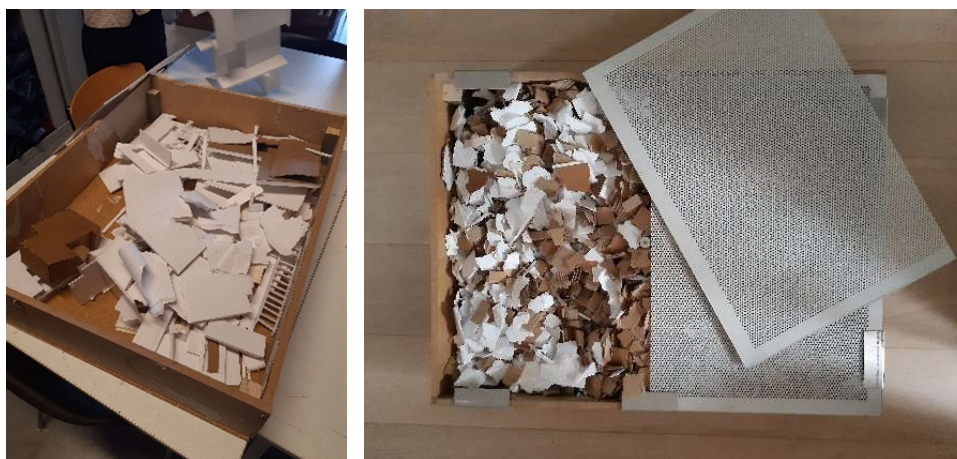


Figure 28 : Conception du prototype en copeaux

4.2.4 Récapitulatif et caractéristiques des prototypes

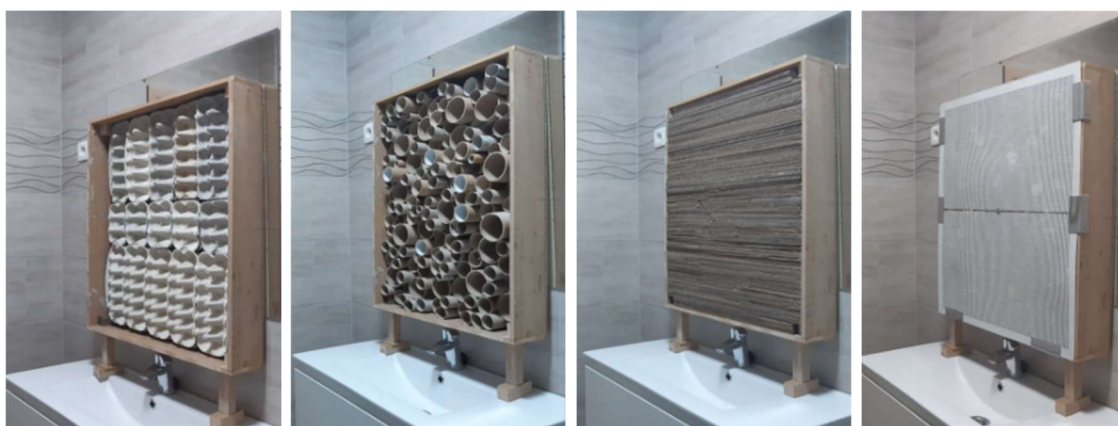


Figure 29 : Ensemble des prototypes dans leur version finale

Tableau 3 : Caractéristiques complémentaires des prototypes

	Masse [kg]		Temps de construction [h]	Coût [€]	Esthétisme
	A	B			
Cadre	6.4	6.2	4	2	-
Boîtes à œufs	7.3	7.0	3	1	-
 Tubes	8.5	8.2	4	1	+
Millefeuille	11.9	11.9	10	12	++
Copeaux	12.9	12.5	12	2	++

Le Tableau 3 reprend l'ensemble des caractéristiques des prototypes pour les comparer selon leur poids, leur temps de construction et leur aspect esthétique final.

Le cadre à lui seul pèse un peu plus de 6 kg. On peut en déduire le poids de chaque remplissage. De fait, les prototypes en **copeaux** et en **millefeuille** sont les plus denses, ce qui a des conséquences dans l'évaluation de leurs performances.

L'estimation du temps passé pour la production de chaque prototype est relativement en accord avec les estimations faites lors de l'idéation au Tableau 2.

La production des prototypes a coûté moins de 20 €, le prix d'une boîte de vis à bois, d'un paquet d'agrafes de bureau et quelques tubes de colle blanche.

Pour ce qui est de l'esthétisme, ce jugement n'est pas objectif, cependant le niveau de finition peut avoir une importance puisqu'il a pour destination d'être disposé sur de plus ou moins grandes surfaces, ce qui pourrait participer à l'appréciation de l'espace. L'objectif est d'améliorer la qualité acoustique de la salle de projet, mais pas au détriment de l'ambiance visuelle de celle-ci. Pour pallier cette éventualité, la solution de recouvrir les panneaux d'une toile est une possibilité, à l'image des produits disponibles dans le commerce. Cette solution n'a pas été adoptée, puisque cela engendrait des frais supplémentaires et du temps de manipulation sans impact sur les performances acoustiques, excepté en très haute fréquence.

5 Expérimentation

5.1 Moyens disponibles

5.1.1 Source sonore

Pour la réalisation des différents essais, une source sonore peut être employée, notamment dans la méthode de mesure par balayage de fréquence, la méthode du sweep. L'université ne dispose plus de sources omnidirectionnelles. Nous avons à disposition une enceinte de monitoring *FAR XM* de *ATD*. Ce matériel dispose d'un amplificateur intégré et a la particularité d'avoir une courbe d'émission plate, indispensable dans le cadre de mesure acoustique.



Figure 30: Enceinte de monitoring, FAR XM de ATD

5.1.2 Matériel de mesure

Pour la réalisation des mesures acoustiques, du matériel de mesure est nécessaire.

Un microphone à électret MCE320 est mis à notre disposition. C'est un micro omnidirectionnel possédant une sensibilité de 10mV/Pa.



Figure 31: Microphone, MCE 320

Ce microphone nécessite un conditionneur pour délivrer un signal de sortie lisible pour la carte son. Nous avons également un conditionneur *Opus* de *01dB* à notre disposition pour convertir le signal en sortie du microphone.



Figure 32: Conditionneur, *Opus* de *01dB*

La carte son *Babyface* de la marque *RME*, est un matériel de mesure personnel. Il s'agit de matériel de mesure professionnel datant des années 2010 avec une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz, ce qui est amplement suffisant dans le cadre de nos mesures acoustiques.



Figure 33: Carte son, *Babyface* de *RME*

Ne disposant pas d'un sonomètre calibré, nous utiliserons le microphone d'un smartphone pour évaluer le niveau d'intensité acoustique à l'aide de l'application *Sonomètre* par *Splent Apps* afin de calibrer la carte son. Nous discuterons par la suite de ce choix et de la calibration relative.



Figure 34: Capture de l'interface de l'application Sonomètre

5.1.3 Logiciel de traitement acoustique

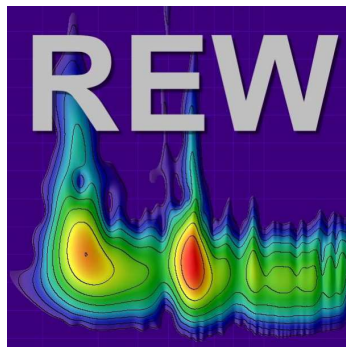


Figure 35: Icône du logiciel Room EQ Wizzard

Le logiciel utilisé est Room EQ Wizzard, REW. Il s'agit d'un logiciel gratuit qui utilise la méthode du sweep pour réaliser des mesures de réponses de salle et identifier leurs modes propres. Ce logiciel permet d'afficher les courbes des temps de réverbération par bandes de fréquences en tiers d'octave et de comparer les mesures entre-elles. Il dispose d'un site internet, d'une documentation très complète et d'une communauté qui réalise une grande quantité de guides à suivre pour s'appropriier le logiciel.

Ce logiciel est installé sur un ordinateur portable personnel (ACER Aspire E-15). Aucune spécificité particulière n'est nécessaire pour utiliser le logiciel, fonctionnel sous Windows XP avec 2 Go RAM nécessaire.

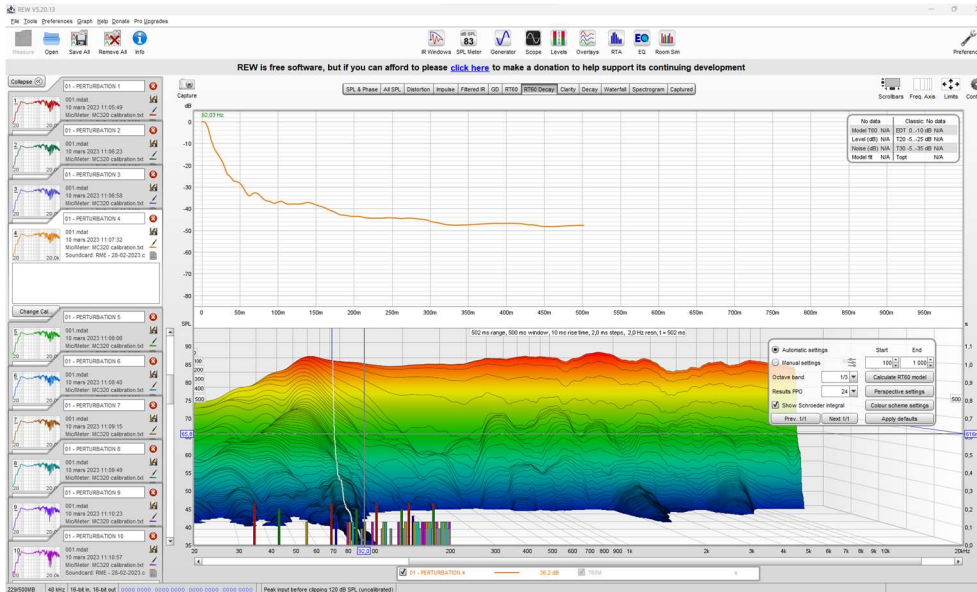


Figure 36: Interface RT60 Decay du logiciel REW

Le logiciel est capable de fournir une grande variété d'analyses du signal enregistré. L'interface de la Figure 36 montre en partie basse un graphique « waterfall ». Ce graphique illustre sur 3 dimensions le niveau sonore en fonction du temps et par fréquence. C'est de ce graphique que pour chaque bande de fréquence une « tranche » est découpée dans le « waterfall » pour tracer la courbe sur la partie supérieure de cette même figure. Et ainsi, comme indiqué dans la norme NBN ISO 354, le logiciel mesure le T20, le temps que met le signal enregistré pour décroître de 20 dB. Multipliée par 3, cette valeur correspond au temps de réverbération à la fréquence sélectionnée. L'opération est répétée pour l'ensemble des bandes de tiers d'octave pour générer un graphique comme sur la Figure 37, avec en abscisse les bandes de fréquences et en ordonnée le temps de réverbération correspondant en millisecondes dans ce cas.

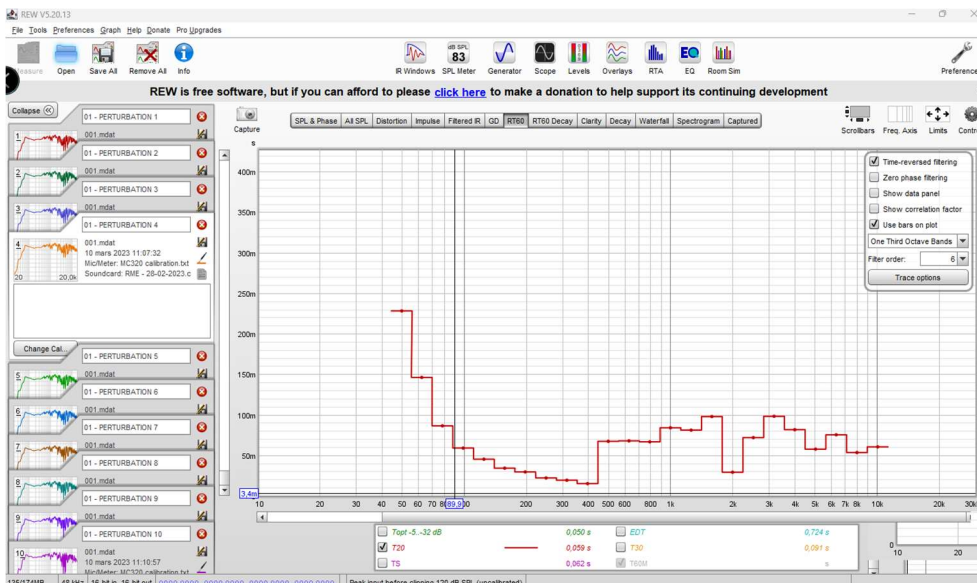


Figure 37 : Interface RT60 du logiciel REW (barre)

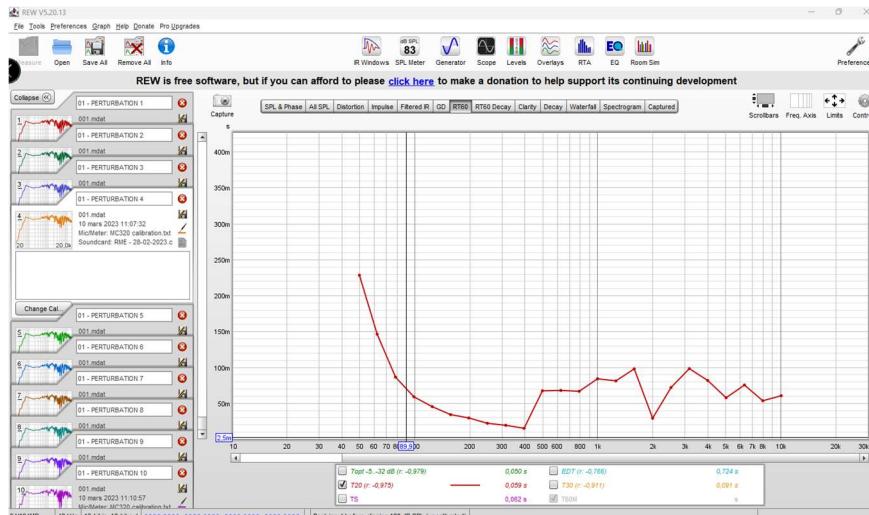


Figure 38 : Interface RT60 du logiciel REW (points reliés)

Les mesures sont réalisées sur l'ensemble du spectre, mais les calculs sont résumés par bande de tiers d'octave comme spécifié dans les normes. Par la suite, les graphiques en barres seront délaissés pour les graphiques en points reliés par souci de lisibilité lors de la superposition des différents essais comme sur la Figure 38.

5.1.4 Branchement du setup

Les différents composants cités aux points précédents sont donc reliés entre eux selon le schéma de la Figure 39.

REW est installé sur l'ordinateur portable, et la carte son RME y est reliée par un câble USB double (alimentation et données). En sortie de la carte son, l'enceinte de monitoring, est reliée à une connexion ligne XLR symétrique. Le microphone est relié au conditionneur par un câble spécifique. La sortie du conditionneur est un câble coaxial qui nécessite un adaptateur pour se connecter à l'entrée ligne XLR de la carte son. Le conditionneur et l'enceinte ont chacun leur propre câble d'alimentation.

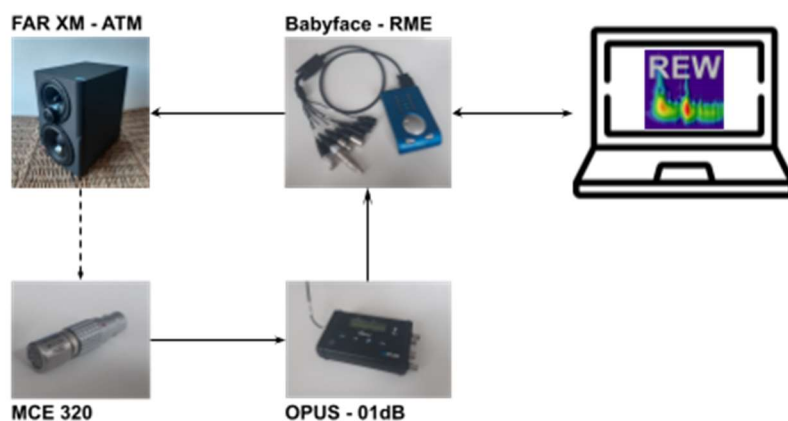


Figure 39: Schéma de branchement

5.1.5 Salles de mesure

Parmi les salles de mesures présentées au paragraphe 3.2.2.1, l'Université dispose de plusieurs d'entre elles : deux chambres réverbérantes et une chambre anéchoïque que nous avons la possibilité d'utiliser. Nous avons également besoin d'une alternative aux chambre réverbérantes : une salle de bain. Ces salles sont présentées ci-dessous :

- la chambre anéchoïque sert pour la réalisation des mesures de calibration et de vérification du matériel. Le temps de réverbération dans cette chambre est de l'ordre de 50 ms ;
- les chambres réverbérantes sont les salles qui servent à mesurer les performances des prototypes en absorption. Le temps de réverbération dans ces salles est d'environ 15 s et 30 s . Cependant nous rencontrerons des difficultés de mesure dans ces salles et une alternative à celles-ci doit donc être trouvée ;
- la salle de bain, pour des raisons qui seront abordées par la suite, est utilisée comme à une chambre réverbérante de petite dimension. Le choix de cette salle répond au besoin d'une salle aux caractéristiques de réverbération similaire à la chambre réverbérante, par son revêtement en carrelage, et le besoin d'un volume nettement plus petit. Son temps de réverbération est de l'ordre de la seconde. Cette approche est inspirée des cabines alphas, présentées au paragraphe 3.2.2.1. Ainsi, il est attendu que les dimensions de la pièce rendent une part du spectre mesuré inexploitable comme le sont les cabines alphas sous 250 Hz .



Figure 40: Photo des salles de mesure disponibles

5.2 Fiabilité du matériel

Les moyens à disposition sont du matériel qui en moyenne date des années 2010, il est donc nécessaire de vérifier si celui-ci est toujours opérationnel et fiable. Nous réalisons une série de mesure de vérification pour contrôler le microphone et la source sonore.

5.2.1 Le Microphone

Vérifions l'omnidirectionnalité du micro en position verticale. Un microphone est dit omnidirectionnel si pour une distance fixe et un signal identique, la valeur de sortie du micro est égale pour chaque angle mesuré. Cette expérience se fait dans la chambre anéchoïque pour ne mesurer que le son direct. Le schéma de la Figure 41 illustre l'expérience avec une résolution de 45°. La source sonore est placée à 2 m du microphone et la puissance du signal émis est évaluée à 80 dB.

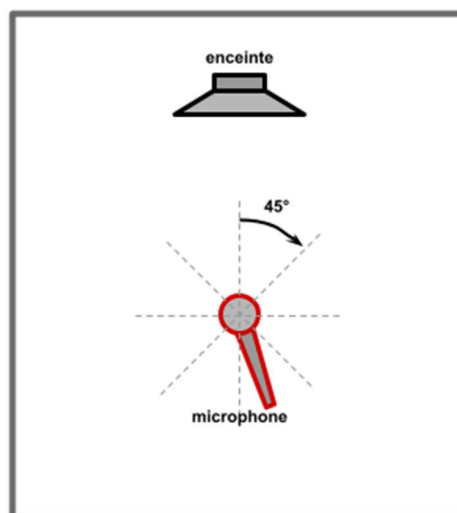


Figure 41: Schéma de la mesure d'omnidirectionnalité du micro

Nous réalisons donc les 8 mesures et encodons les résultats dans un tableau. En faisant une moyenne sur toute la gamme de fréquences pour chaque point de mesure, nous obtenons le graphique de la Figure 42 en représentation polaire.

Le graphique représente pour chaque angle de mesure exprimé en degré, l'amplitude du signal électrique transmise par le microphone en dBu. En rouge, nous pouvons lire la référence si le microphone était parfaitement omnidirectionnel (-30.8 dBu). En bleu la moyenne en sortie du microphone par angle de mesure. Nous observons des écarts un peu plus importants de 135° (-31.3 dBu) à 225° (-30.2 dBu). Cet écart exprime une légère imprécision de la mesure de ± 0.5 dBu, ce qui sera acceptable dans le cadre de nos mesures.

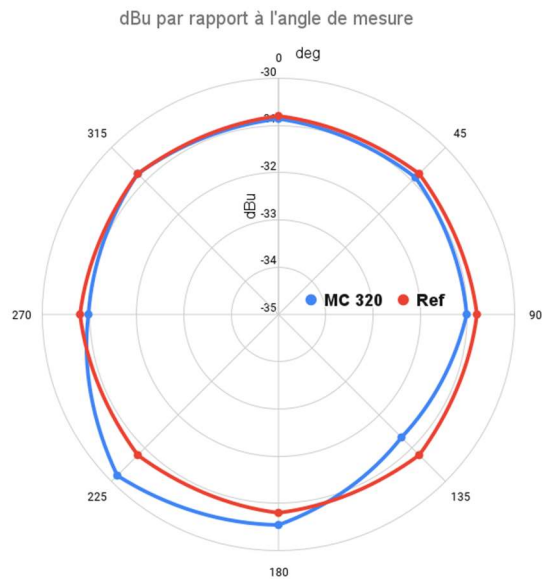


Figure 42: Mesures de l'omnidirectionnalité du microphone, (07/03/2023, chambre sourde)

5.2.2 La Source

L'enceinte monitorée est l'élément qui émet le sweep pour réaliser la mesure. Il est nécessaire de vérifier que celui-ci ne déforme pas le signal sur une bande de fréquence particulière, ce qui biaiserait l'analyse des performances des prototypes.

Pour vérifier ces performances, nous utilisons la configuration précédente en chambre réverbérante. Le microphone est à 2 m de l'enceinte de monitoring. Celle-ci est configurée en mode FLAT, pour n'appliquer aucun filtre. A l'aide de REW, nous pouvons générer un bruit rose et lancer une analyse en temps réel (RTA pour Real Time Analysis).

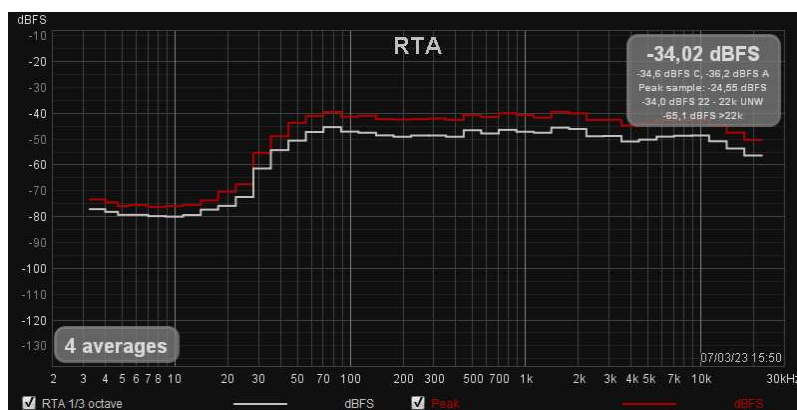


Figure 43: Mesure de la réponse en temps réel de l'enceinte (07/03/2023, chambre sourde)

Sur le graphique de la Figure 43 qui représente par bande de tiers d'octave le niveau sonore en dBFS. C'est une capture de la RTA où nous observons que de 100 Hz à 10 000 Hz, le graphique en barre de la réponse de l'enceinte est

relativement plat, ce qui correspond à la plage de mesure que nous souhaitons évaluer. La réponse de l'enceinte est suffisamment linéaire en fréquence pour envisager des mesures.

5.3 Fiabilité des mesures

5.3.1 Répétabilité des mesures

Dans la continuité des vérifications de fiabilité des mesures, la répétabilité des mesures est un point à souligner. La répétabilité des mesures signifie qu'entre deux mesures strictement identiques, les valeurs enregistrées sur le logiciel sont les mêmes. Et à nouveau, nous réalisons ces vérifications dans la chambre sourde pour éliminer toute perturbation extérieure. Les mesures enregistrées ici sont 3 mesures successives réalisées lors du test de l'omnidirectionnalité du microphone à l'angle initial de 0°.

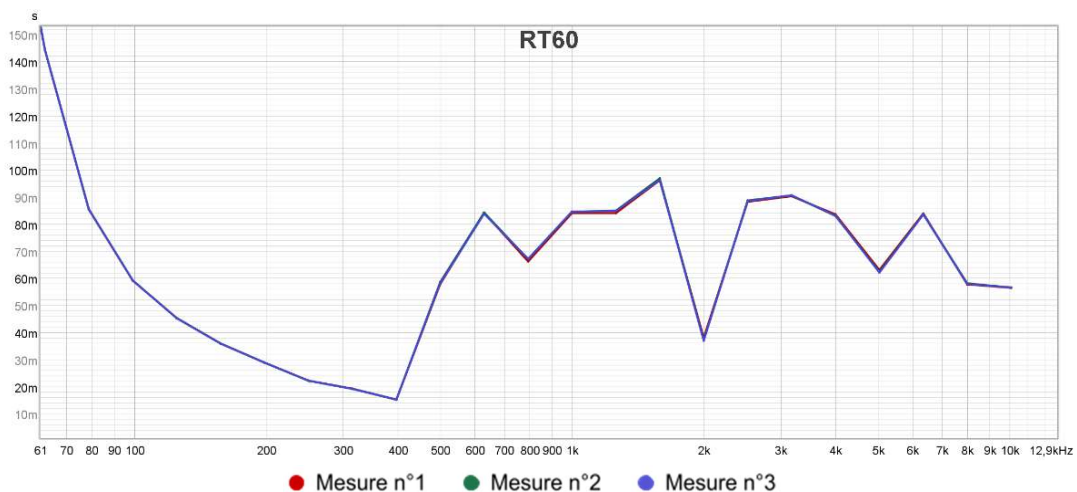


Figure 44 : Mesure de la répétabilité (07/03/2023, chambre sourde)

Le graphique de la Figure 44 illustre le temps de réverbération en secondes en fonction des fréquences par bande de tiers d'octave. On observe que les 3 courbes se superposent exactement. Un décalage de 1 ms est relevé autour de 1 kHz, mais ce n'est pas significatif. Nous pouvons affirmer que le matériel ne présente pas de défaut de répétabilité.

5.3.2 Reproductibilité des mesures

Pour évaluer la reproductibilité du processus de mesure, il est intéressant de suivre la méthode des 6 M énoncée au paragraphe 3.2.1 :

- **Main-d'œuvre** : une seule est unique personne réalise les mesures.
- **Matériaux** : l'objectif de la mesure est de comparer les matériaux entre eux, ce paramètre doit donc être l'unique cause d'une variation de mesure en sortie de chaîne.

- **Méthodes** : la procédure suivie pour mesurer les prototypes successivement est une grande source d'incertitude liée à la manipulation des prototypes.
- **Moyens** : Le matériel reste le même du début à la fin des mesures.
- **Mesures** : idem pour les paramètres de mesures.
- **Milieu** : la salle de bain est dans une configuration identique pendant toutes les mesure. Cependant, des perturbations sonores extérieures peuvent être amenées à perturber les mesures.

La principale composante source d'erreur dans notre protocole sur laquelle nous avons le contrôle est donc liées aux manipulations. Pour mener cette vérification, nous installons le matériel dans la chambre sourde et réalisons plusieurs essais. Pour répondre aux perturbations extérieures, chaque fois qu'une vibration ou un son extérieur sera ressenti pendant la mesure, celle-ci sera annulée puis réitérée.

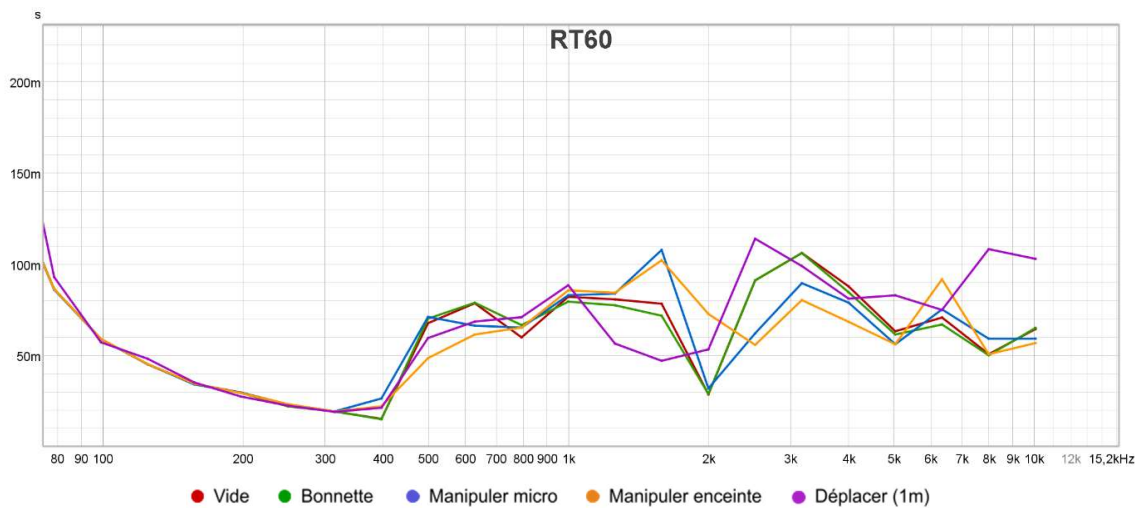


Figure 45 : Mesure de la reproductibilité, (10/03/2023, chambre sourde)

Entre chaque essai, une manipulation est opérée. Sur le graphique de la Figure 45, nous pouvons comparer les réponses aux différentes perturbations en milliseconde par bande de tiers d'octave :

- en rouge, la mesure de référence du setup ;
- en vert, enlever et remettre la bonnette de protection du microphone ;
- en bleu, bouger et replacer le microphone à son emplacement ;
- en jaune, de même avec l'enceinte de monitoring ;
- en rose, déplacer le microphone d'un mètre.

Il est important de comparer chaque essai avec le précédent, puisque l'essai $n-1$ représente la condition initiale de l'essai n .

La manipulation sur la bonnette apporte une perturbation de moins de 10 ms. Les manipulations sur la source et le microphone montrent un delta maximum de 40 ms à 2 kHz. C'est qui n'est pas non plus significatif. Le déplacement d'un mètre du microphone apporte un écart de 60 ms à 8 kHz. L'ensemble de ces perturbations traduisent un impact non-significatif de ces manipulations. Cependant, par l'absence de réverbération dans la pièce, ces perturbations sont peut-être moins présentes. C'est pourquoi un second test de reproductibilité est mené dans la salle de bain.

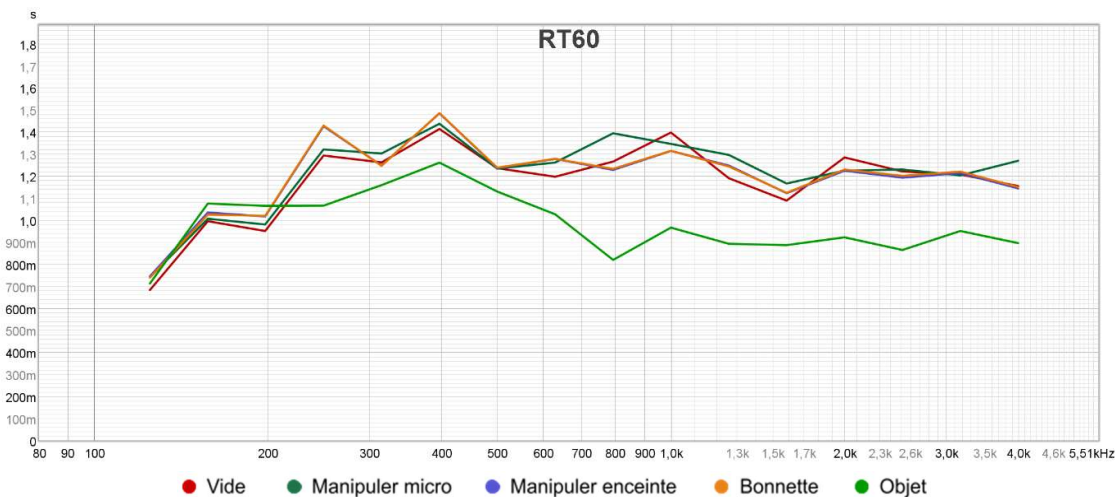


Figure 46: Mesure de la reproductibilité, (15/03/2023, salle de bain)

A nouveau, entre chaque essai, une manipulation est opérée. Sur le graphique de la Figure 46, nous pouvons comparer les réponses aux différentes perturbations :

- en rouge, la mesure de référence du setup ;
- en vert, bouger et replacer le microphone à 10 cm de son emplacement ;
- en bleu, de même avec l'enceinte de monitoring ;
- en jaune, enlever la bonnette de protection du microphone ;
- en vert clair, laisser un objet dans la pièce (serviette sur le radiateur).

Cette fois-ci, les écarts sont plus importants, pour un déplacement de 10 cm du microphone et de l'enceinte de monitoring, jusqu'à 140 ms d'écart peut être mesuré (800 Hz). Et bien sûr, l'ajout d'une serviette sur le radiateur réduit drastiquement le temps de réverbération de la pièce, surtout au-delà de 800 Hz.

Ces évaluations permettent d'affirmer qu'il est important de s'assurer que pendant la session de mesure, le protocole prévoit une solution afin de faire face à toute maladresse qui viendrait perturber l'installation, notamment le positionnement du microphone.

5.4 Choix d'une salle de mesure

Pour identifier la salle de mesure la plus propice pour caractériser les prototypes, nous faisons des tests dans la salle réverbérante et la salle de bain. Ces tests se déroulent avant la réalisation des prototypes, nous pouvons les faire à l'aide d'un échantillon de mousse absorbante récupéré dans le laboratoire d'acoustique. Il s'agit de deux blocs de mousse expansée de 5 cm d'épaisseur dont la marque n'est pas connue. La surface totale de cet échantillon est d'environ 0.5 m². L'objectif ici est donc de vérifier si la mesure de chaque pièce avec et sans l'échantillon varie significativement.



Figure 47 : Echantillon de mousse absorbante

5.4.1 Chambres réverbérantes

5.4.1.1 Grande chambre réverbérante



Figure 48 : Mesure de l'échantillon dans la grande chambre réverbérante

Le graphique de la Figure 49 nous montre l'influence de la présence de l'échantillon dans la chambre réverbérante en bleu, comparé à la mesure de la chambre vide en rouge. Il ressort tout de suite que les mesures ne se passent pas correctement. Le temps de réverbération de la salle vide calculé n'est que de 4 s, et sur certaines bandes de fréquences il est de 0 s. Plusieurs essais ont été réalisés mais un problème identique se manifeste systématiquement autour des mêmes bandes de fréquences.

La problématique peut venir du fait que le temps de réverbération dans la salle soit trop long. En effet, le temps de calcul nécessaire pour observer une décroissance de 20 dB du niveau sonore dans cette salle est d'environ 10 s. Or, le logiciel a un temps d'enregistrement d'un peu moins de 5 s après la fin de l'émission du signal. Cette valeur n'étant pas adaptable et le logiciel étant conçu pour un usage relativement commun, il n'est pas capable de performer dans la grande chambre réverbérante.

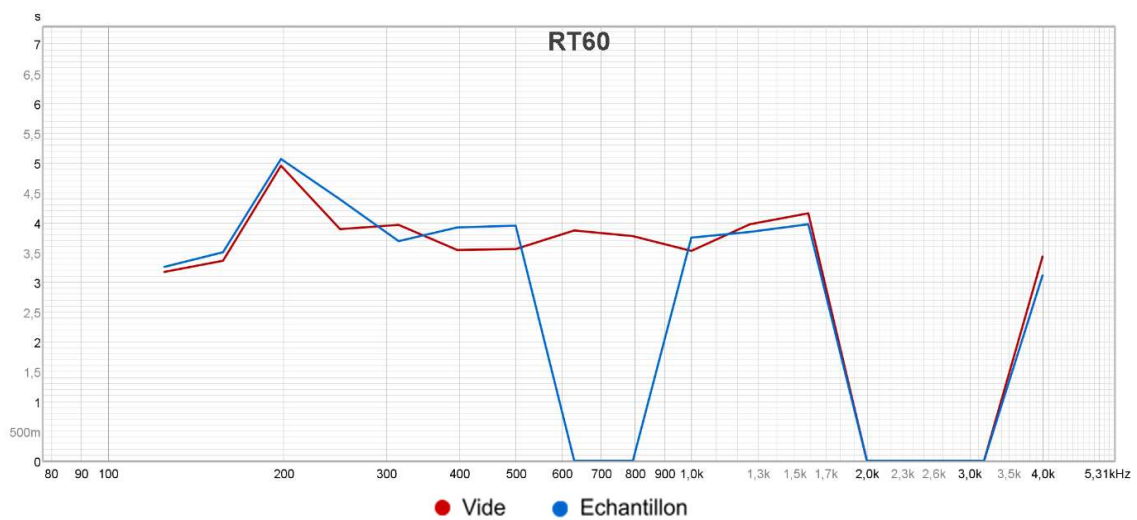


Figure 49 : Mesure de l'échantillon dans la grande chambre réverbérante, (10/03/2023)

5.4.1.2 Petite chambre réverbérante

Une chambre réverbérante plus petite est disponible à côté de la première. Celle-ci sert normalement pour mesurer la transmission d'une paroi entre deux pièces. Mais son revêtement étant similaire à la première et ses dimensions plus restreintes, le temps de réverbération y est de 15 s environ. Ce qui pourrait suffire à réduire le temps de décroissance de 20 dB du niveau sonore sous les 5 s.



Figure 50 : Mesure de l'échantillons dans la petite chambre réverbérante

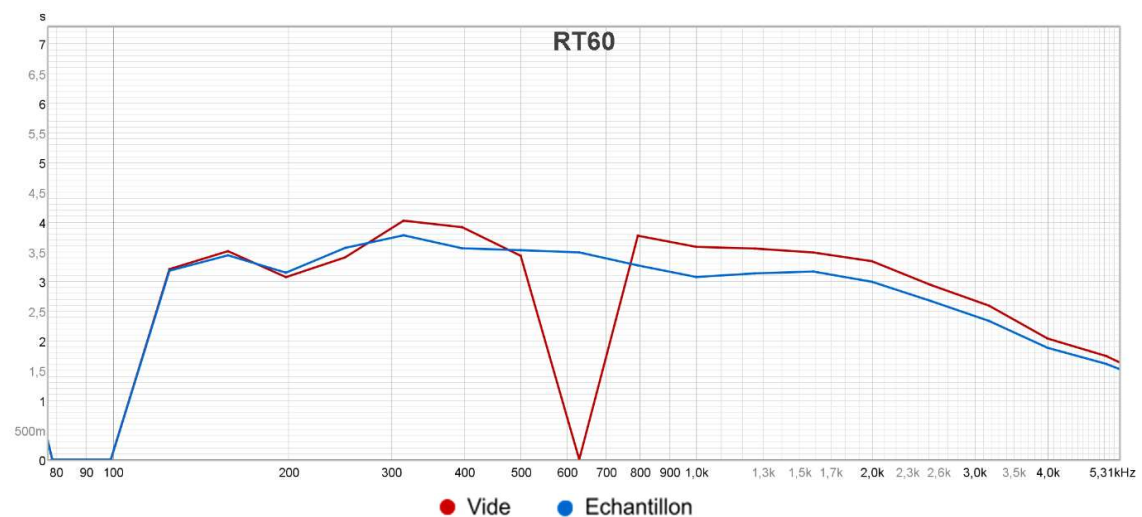


Figure 51 : Mesure de l'échantillon dans la petite chambre réverbérante, (10/03/2023)

Mais comme nous le montre le graphique de la Figure 51, des anomalies apparaissent tout de même après le traitement des mesures.

De plus, sur une grande partie des deux analyses précédentes, la courbe bleue, qui représente la réponse de la salle avec l'échantillon est bien sous la courbe rouge initiale, puisqu'une petite surface d'absorbant est présente dans la pièce. Mais dans les basses fréquences, l'inverse se produit, ce qui n'est physiquement pas possible. Nous pouvons en déduire que la qualité réverbérante des salles acoustiques n'est pas adaptée à l'utilisation du logiciel *REW* avec la méthode par balayage de fréquence. Une pièce plus ordinaire serait plus efficace. C'est pour cette raison que nous choisissons d'explorer la possibilité de réaliser les mesures dans une salle de bain

5.4.2 Salle de bain

La norme NBN ISO 354 mentionnée au paragraphe 3.2.2.2 indique la surface de l'échantillon d'absorbant à positionner dans une chambre réverbérante. Celle-ci doit être comprise entre 10 m² et 12 m² pour la pièce d'un volume entre 150 m³ et 200 m³. Proportionnellement, pour une pièce de 15m², l'échantillon devrait atteindre une surface d'environ 1 m². La salle de bain fait environ 12m² et semble propice et remplit les conditions de réverbération grâce à ses parois couvertes de carreaux de carrelage. Cela semble donc convenir pour mener à bien les mesures des prototypes de 1m² et pouvoir leur attribuer un coefficient d'absorption relatif.



Figure 52 : Mesure de l'échantillon dans la salle de bain

Note : Exceptionnellement, la source sonore utilisée était une enceinte personnelle, sa courbe de réponse n'est donc peut-être pas aussi plate que celle de l'enceinte, mais dans le cadre de cet essai, nous en faisons abstraction.

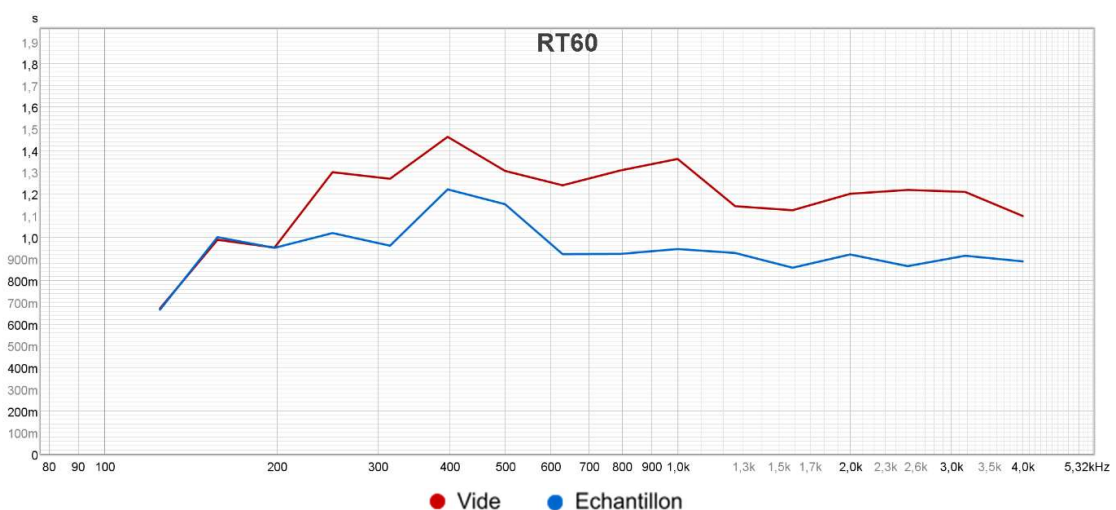


Figure 53 : Mesure de l'échantillon dans la salle de bain, (15/03/2023)

Cette fois-ci, nous observons tout de suite une courbe sans anomalie. Le temps de réverbération de la salle de bain est donc beaucoup moins important, mais l'écart entre les deux mesures indique une diminution du temps de réverbération de la pièce de plus de 100 ms en moyenne (au-delà de 200 Hz). Cette différence est significativement suffisante, d'autant plus que la surface des prototypes est plus importante.

5.4.3 Bilan

Tableau 4: Caractéristiques des salles de mesures

Salle	Volume [m ³]	Surface échantillon [m ²]	Tr vide [s]	Delta Tr mesuré [s]
Grande chambre réverbérante	300	$10 \leq X \leq 15.5$ $(10 \leq X \leq 300/200)^{2/3}$	~30	-
Petite chambre réverbérante	150	$10 \leq X \leq 12$	~15	-
Salle de bain	15	$0.75 \leq X \leq 0.9$	1.2	> 0.1

Le Tableau 4 regroupe les caractéristiques des 3 salles de mesures ainsi que le delta mesuré. Seule la salle de bain nous permet de lire un delta cohérent avec nos attentes et un delta suffisamment important pour pouvoir caractériser les prototypes.

Cependant, il est attendu que dans certaines gammes de fréquences, à cause de ses très faibles dimensions et du fait que ses parois soient strictement parallèles, il est possible que nous observions des anomalies. Sa largeur la plus étroite étant de 2 m, cela correspond au quart d'une onde stationnaire de 680 Hz.

5.5 Protocole de mesure

5.5.1 Disposition du matériel

Sur le schéma de l'installation du matériel dans la salle de bain de la Figure 54, deux emplacements sont identifiés pour positionner les prototypes. Un au-dessus de l'évier en bleu et le second sur la porte en rouge. Nous réalisons les mesures dans deux configurations distinctes ;

- configuration 1, la mesure est faite avec un panneau à chaque emplacement, totalisant 1m² d'absorbant ;
- configuration 2, la mesure est réalisée en évaluant chacun leur tour les deux panneaux du prototype sur la position du lavabo en bleu.

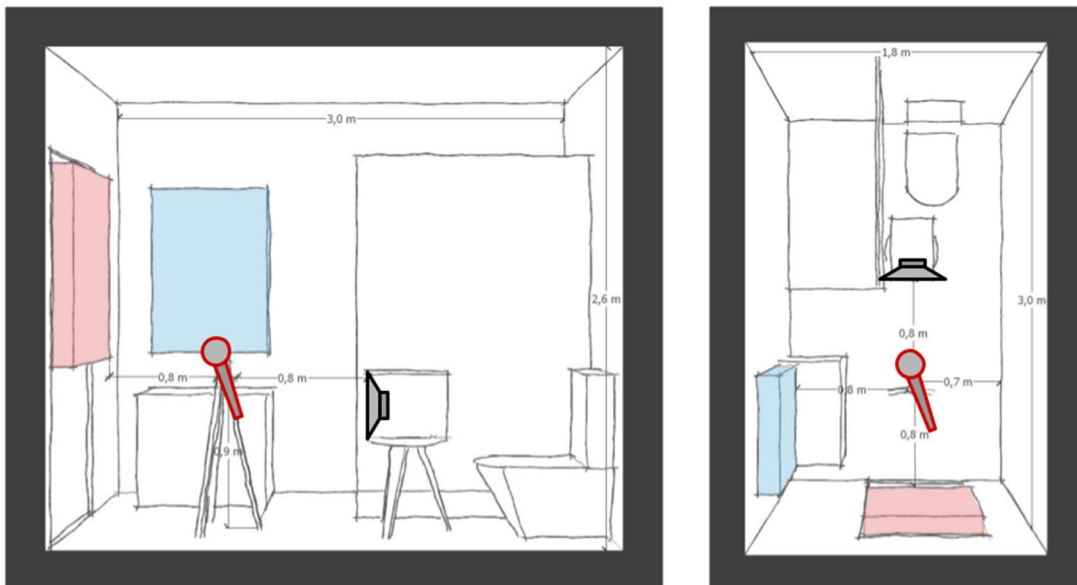


Figure 54 : Aperçu de l'installation de mesure de la salle de bain

Pour s'adapter à la configuration de la pièce, plusieurs entorses sont donc effectuées par rapport à la norme NBN ISO 354 mentionnée précédemment :

- nous positionner le micro dans une position centrale. Il est recommandé de positionner le micro à une distance d'au moins 1 m de chaque paroi. Dans notre configuration cas, cette condition est presque respectée ;
- les panneaux sont positionnés sur deux parois orthogonales ;
- la source sonore n'est pas omnidirectionnelle.

L'ensemble de ces entorses par la nature même de la salle de mesure biaisent partiellement les valeurs mesurées. Les différentes variables mesurées seront désormais notées avec l'indice *-sdb-* pour expérimental.

5.5.2 Limiter les perturbations

Afin de limiter les perturbations pendant les mesures, il est nécessaire de :

- déterminer d'une plage de mesure calme ;
- marquer au sol et sur les murs l'emplacement du matériel. Il faut avant chaque mesure vérifier que les pieds du micro sont toujours bien au même emplacement ;
- chaque mesure est une moyenne de 4 SWEEP consécutifs ;
- chaque mesure est réalisée 3 fois.

5.5.3 Déroulé d'une mesure

Les mesures doivent se faire de la façon suivant afin de limiter les erreurs et les oublis :

- montage du prototype ;
- photo du prototype ;
- mesure du panneau A ;
- mesure du panneau B ;
- mesure des deux panneaux ;
- enregistrement des mesures.

5.5.4 Calcul du coefficient d'absorption

Le calcul des coefficients d'absorption des prototypes se fait selon les deux méthodes décrites dans la norme NBN ISO 354 mentionnée au paragraphe 3.2.2.2.

Dans un premier temps, ces coefficients sont calculés à l'aide des configurations de mesure. Puis une moyenne des résultats est faite pour en déduire des coefficients d'absorption -sdb- unique par bande d'octave qui serviront lors des simulations.

5.6 Protocole de simulation

5.6.1.1 Scénarios

Trois scénarios sont déterminés pour simuler la correction de la salle de projet :

- scénario 1 : Correction avec des produits Rockfon pour atteindre l'objectif fixé au paragraphe 4.1.2.1, à savoir 1.1 s ;
- scénario 2 : Correction avec les prototypes sur des surfaces identiques au scénario 1 ;
- scénario 3 : Correction en limitant les surface de prototype pour répondre aux normes incendies mentionnée au paragraphe 3.3.2.

5.6.1.2 Disposition des absorbants

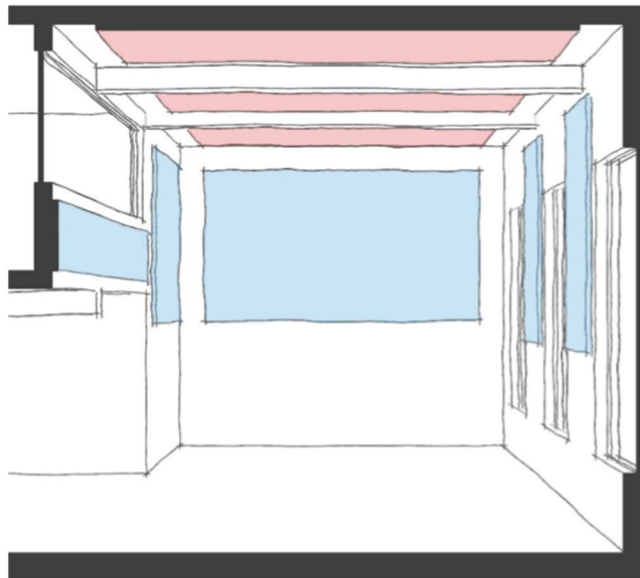


Figure 55 : Disposition des panneaux absorbants dans la salle de projet

Le cas d'étude pour la réalisation des simulations de correction de temps de réverbération est la salle de projet présentée au paragraphe 4.1.

La Figure 55 illustre une disposition possible des produits absorbants sur les différentes parois de la salle de projet. Cette disposition peut se faire sur les murs identifiés en bleu et au plafond en rouge pour recouvrir une partie des surfaces réfléchissantes. Ces zones identifiées permettent de pouvoir globalement bien répartir l'installation de produit absorbant, tout en restant à une hauteur suffisante pour éviter toute dégradation ou gêne lors d'un aménagement extérieur.

Deux types de produits sont donc sélectionnés par solution en fonction du mode de fixation conformément aux fiches techniques des produits Rockfon présentés paragraphe 3.4.2.

5.6.1.3 Coefficients d'absorption pris en compte

Tableau 5 : Coefficients absorption des différents types de surfaces par bande d'octave

Type de revêtement	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Béton brut	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05
Enduit plâtre	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Verre 2 à 4 mm	0.20	0.15	0.10	0.05	0.05	0.05
Verre > 4 mm	0.15	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00
Ouverture	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Rockfon Panneaux de plafond	0.40	0.65	0.90	1.00	1.00	1.00
Rockfon Panneaux muraux	0.20	0.70	1.00	1.00	1.00	0.70
Prototype	-	-	-	-	-	-

Les coefficients d'absorption sont issus des produits présentés au paragraphes 3.4.1. Ceux des prototypes seront calculés à la suite des mesures de leurs performances.

6 Résultats

6.1 Temps de Réverbération -sdb-

6.1.1 Configuration 1 : 2 panneaux soit 1 m²



Figure 56 : Mesure du prototype en *millefeuille* de carton, (salle de bain, configuration 1, 04/04/2023)

Tableau 6 : Relevés des temps de réverbération -sdb- des mesure, (salle de bain, configuration 1, 04/04/2023), [s]

Fréquence	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Vide	0.53	0.70	0.69	0.76	0.83	1.00	1.53	1.15	1.15
Cadre	0.51	0.77	0.72	0.76	0.74	0.81	1.24	1.10	1.02
Tube	0.50	0.80	0.72	0.82	0.87	0.77	1.14	0.95	0.97
Boîtes à œufs	0.52	0.80	0.70	0.73	0.66	0.76	1.00	0.74	0.73
Copeaux	0.52	0.78	0.70	0.73	0.65	0.76	0.86	0.81	0.83
Millefeuille	0.49	0.81	0.71	0.67	0.77	0.78	0.81	0.81	0.73

Fréquence	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000
Vide	1.20	1.36	1.27	1.19	1.22	1.29	1.25	1.19	1.13
Cadre	1.08	1.03	1.01	1.07	1.15	1.08	1.09	0.97	0.91
Tube	1.00	1.11	0.99	1.00	1.02	0.95	0.96	0.90	0.87
Boîtes à œufs	0.82	0.87	0.77	0.82	0.89	0.89	0.88	0.82	0.76
Copeaux	0.81	0.88	0.74	0.75	0.81	0.76	0.79	0.75	0.73
Millefeuille	0.89	0.92	0.76	0.68	0.86	0.78	0.76	0.75	0.72

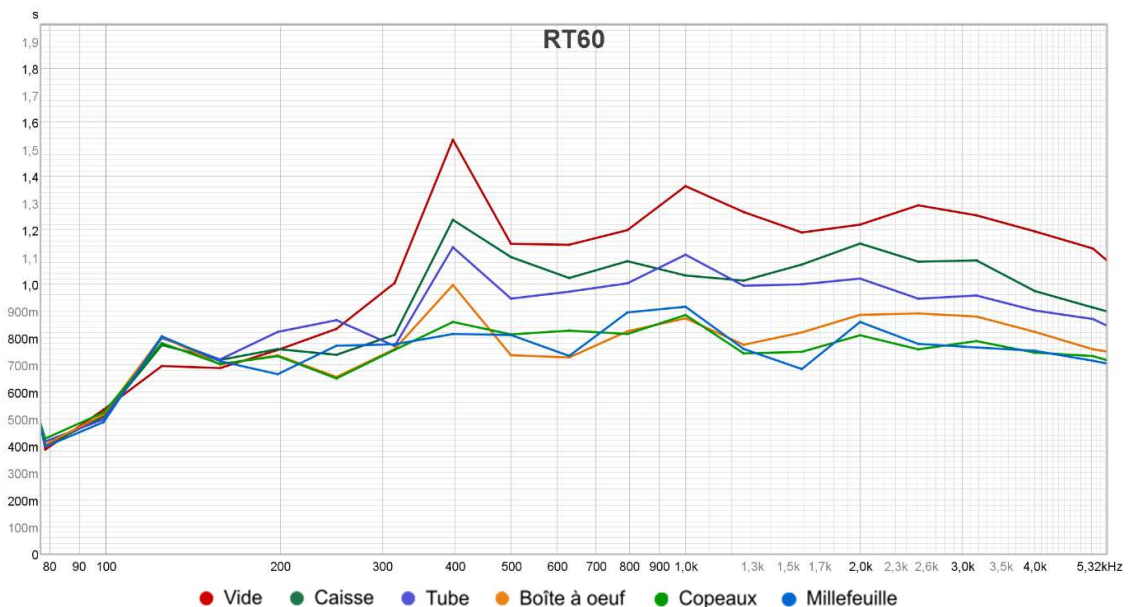


Figure 57 : Mesure du temps de réverbération -sdb- des prototypes, (salle de bain, configuration 1, 04/04/2023), [s]

L'ensemble de mesures de la configuration 1 montre une amélioration globale du temps de réverbération sur la majorité des bandes de fréquences. Il ressort que le prototype en copeaux de carton et celui en millefeuille sont les plus efficaces, suivis de près par le prototype en boîtes à œuf. En moyenne, le temps de réverbération est réduit de 200 ms au-delà de 400 Hz.

En dessous de cette fréquence ainsi qu'à 400Hz, les valeurs sont anormalement plus importantes, notamment à 150 Hz.

6.1.2 Configuration 2 : 1 panneau soit 0.5 m²

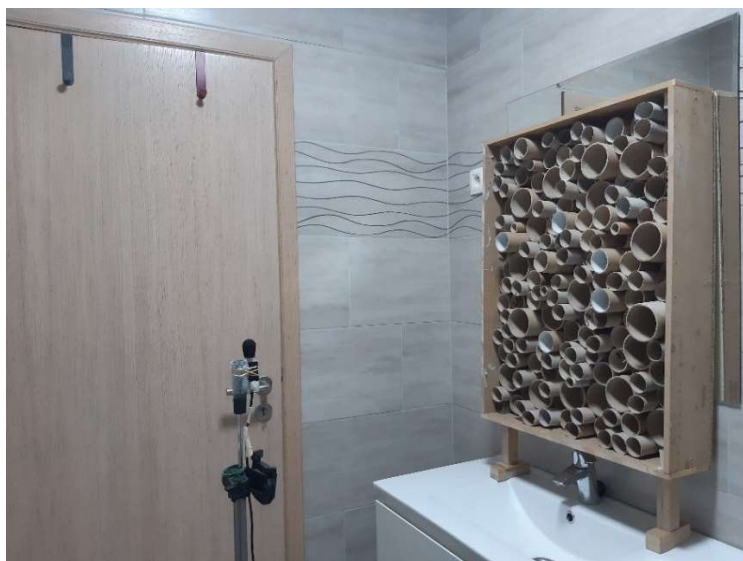


Figure 58 : Mesure du prototype en **tube** de carton, (salle de bain, configuration 2, 04/04/2023)

Tableau 7 : Moyennes des relevés des temps de réverbération -sdb- des mesures, (salle de bain, configuration 2, 04/04/2023), [s]

Fréquence	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Vide	0.53	0.70	0.69	0.76	0.83	1.00	1.53	1.15	1.15
Cadre	0.52	0.73	0.72	0.81	0.89	0.98	1.41	1.07	1.17
Tube	0.47	0.74	0.70	0.81	0.96	1.00	1.24	1.10	1.00
Boîtes à œufs	0.50	0.74	0.70	0.79	0.88	0.94	1.14	0.88	0.94
Copeaux	0.50	0.73	0.70	0.80	0.90	0.89	0.90	0.90	1.05
Millefeuille	0.50	0.76	0.72	0.89	1.01	1.00	0.87	0.88	0.95
Fréquence	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000
Vide	1.20	1.36	1.27	1.19	1.22	1.29	1.25	1.19	1.13
Cadre	1.14	1.17	1.13	1.11	1.17	1.19	1.16	1.09	1.00
Tube	1.05	1.16	1.07	1.02	1.07	1.06	1.03	1.00	0.93
Boîtes à œufs	0.98	0.99	0.94	0.92	1.08	1.04	0.99	0.96	0.91
Copeaux	0.95	1.00	0.91	0.88	0.99	0.94	0.92	0.92	0.85
Millefeuille	0.99	1.03	0.94	0.89	1.01	0.99	0.95	0.89	0.85

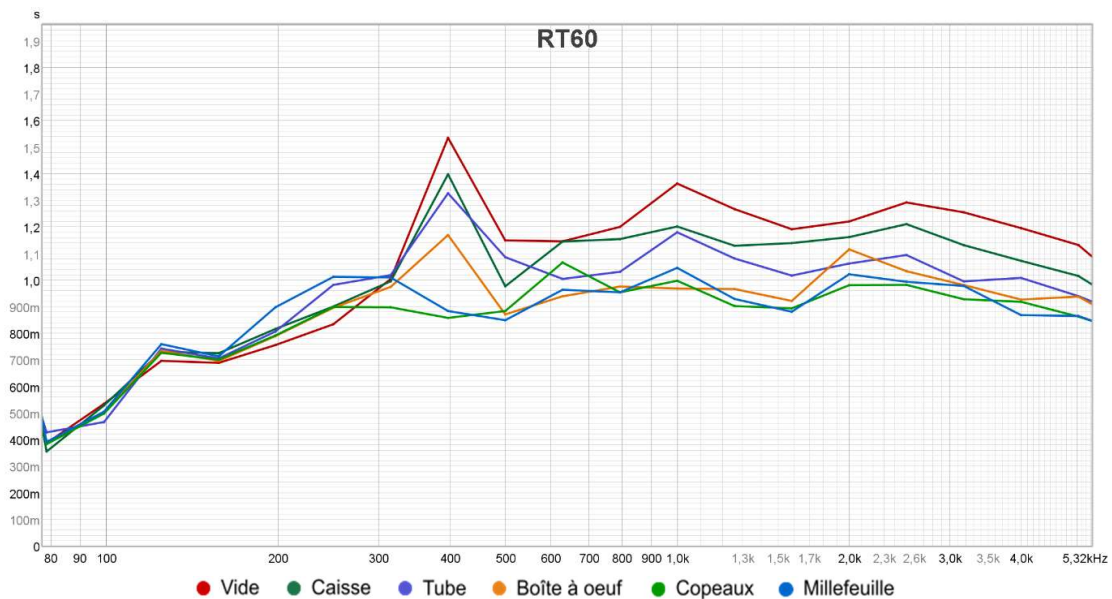


Figure 59 : Mesure du temps de réverbération -sdb- des prototypes, (salle de bain, configuration 2, 04/04/2023), [s]

Dans cette deuxième configuration de mesure, la surface du prototype dans la pièce est divisée par deux, nous observons donc une réduction du temps de réverbération moins importante dans ces conditions. En effet, il n'est plus que de 150 ms en moyenne, contre 200 ms auparavant. Le carton en copeaux et le millefeuille sont toujours les prototypes les plus performants.

A nouveau, nous observons des perturbations de mesure en dessous de 400 Hz.

6.2 Coefficient d'absorption -sdb-

6.2.1 Configuration 1 : 2 panneaux soit 1 m²

Tableau 8 : Coefficients d'absorption -sdb-, (configuration 1)

Fréquence	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Cadre	0.25	-0.35	-0.15	0.00	0.40	0.60	0.40	0.10	0.25
Tube	0.35	-0.45	-0.15	-0.25	-0.10	0.75	0.55	0.45	0.40
Boîtes à œufs	0.15	-0.50	-0.05	0.10	0.80	0.80	0.85	1.20	1.25
Copeaux	0.10	-0.40	-0.05	0.10	0.85	0.80	1.25	0.90	0.85
Millefeuille	0.45	-0.50	-0.15	0.45	0.25	0.70	1.40	0.90	1.20
Fréquence	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000
Cadre	0.20	0.60	0.50	0.25	0.10	0.35	0.30	0.45	0.50
Tube	0.40	0.40	0.55	0.40	0.40	0.70	0.60	0.65	0.65
Boîtes à œufs	0.95	1.00	1.25	0.95	0.75	0.85	0.85	0.95	1.10
Copeaux	0.95	1.00	1.40	1.25	1.05	1.35	1.15	1.25	1.20
Millefeuille	0.70	0.90	1.30	1.55	0.85	1.25	1.25	1.20	1.25

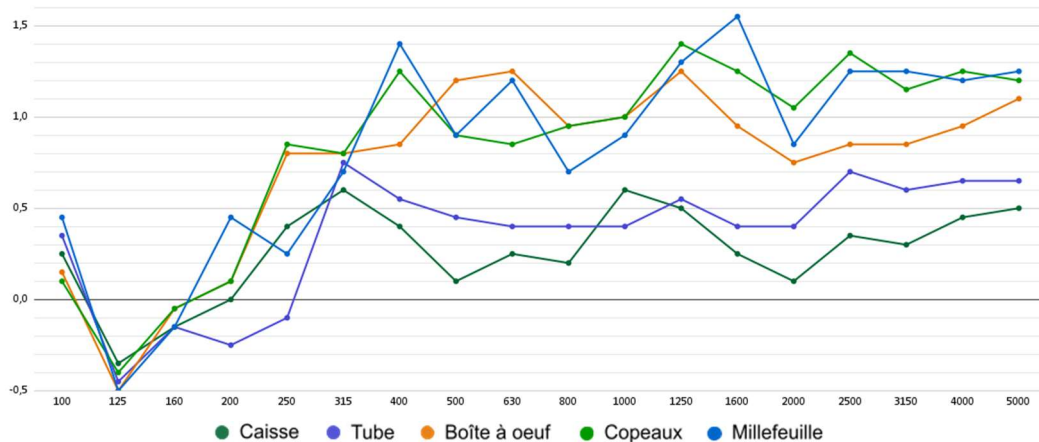


Figure 60 : Coefficients d'absorption -sdb-, (configuration 1)

Les valeurs très basses et négatives calculées en basses fréquences sont liées aux perturbations des mesures sous 400Hz à cause des dimensions de la salle.

Cette méthode de calcul génère ici des coefficients d'absorption supérieurs à 1, ce qui est possible, comme expliqué au paragraphe 3.2.2.2 avec la norme NBN ISO 11654. Cependant, ces valeurs sont censées être relativement proche de 1.00. Or nous observons ici des coefficients supérieurs à 1.5.

6.2.2 Configuration 2 : 1 panneau soit 0.5 m²

Tableau 9 : Coefficients d'absorption -sdb-, (configuration 2)

Fréquence	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Cadre	0.15	-0.30	-0.35	-0.45	-0.35	0.15	0.30	0.30	-0.10
Tube	1.30	-0.40	-0.15	-0.40	-0.80	0.00	0.75	0.20	0.65
Boîtes à œufs	0.55	-0.40	-0.10	-0.25	-0.35	0.35	1.15	1.35	0.95
Copeaux	0.55	-0.30	-0.15	-0.35	-0.45	0.65	2.30	1.20	0.35
Millefeuille	0.55	-0.60	-0.25	-1.00	-1.00	0.00	2.50	1.35	0.90
Fréquence	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000
Cadre	0.25	0.60	0.50	0.30	0.15	0.30	0.30	0.40	0.55
Tube	0.60	0.65	0.75	0.70	0.55	0.85	0.85	0.80	0.95
Boîtes à œufs	0.95	1.35	1.35	1.25	0.50	0.95	1.05	1.05	1.05
Copeaux	1.10	1.35	1.55	1.45	0.95	1.40	1.45	1.25	1.45
Millefeuille	0.85	1.15	1.35	1.40	0.85	1.15	1.25	1.40	1.40

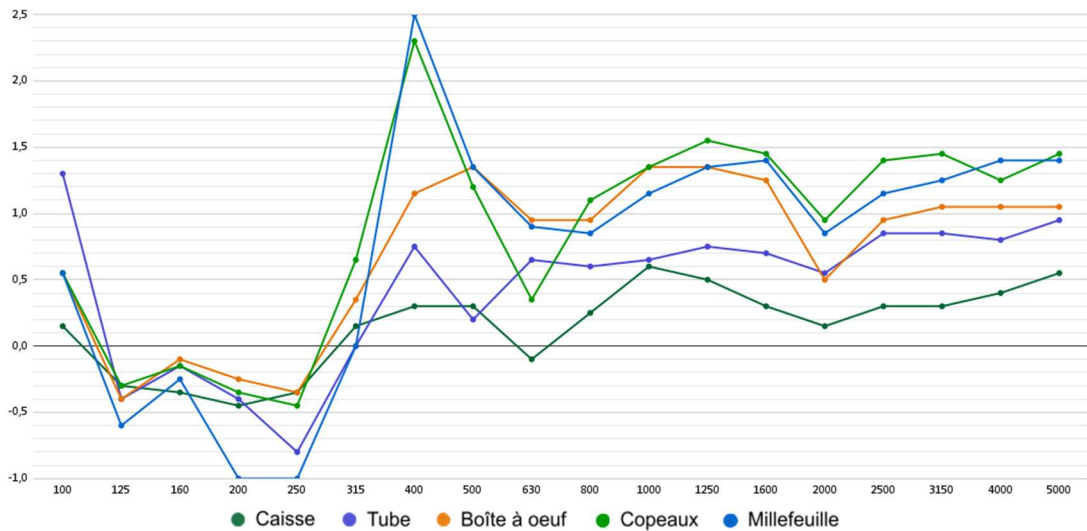


Figure 61 : Coefficients d'absorption -sdb-, (configuration 2)

De nouveau, les mêmes remarques que pour la configuration 1 sont applicables. Avec cette fois un pic à 2.5, ce qui est très excessif.

6.3 Simulation de correction de la salle de projet

6.3.1 Coefficients d'absorption -sdb- pris en compte

Tableau 10 : Moyenne des coefficients absorption -sdb- des prototypes retenus par bande d'octave

Type de revêtement	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Prototype Copeaux	-	-	1,05	1,20	1,00	1,25
Prototype millefeuille	-	-	1,15	1,05	0,85	1,30

À la suite des résultats des calculs des coefficients d'absorption des prototypes, nous faisons la moyenne des résultats des deux configurations. Les valeurs du Tableau 10 complètent celles du Tableau 5 qui présente les coefficients d'absorption des surfaces déjà présentes dans la salle de projet.

Etant négatifs sous 400 Hz, ces coefficients ne seront pas pris en compte par la suite. De plus, ces valeurs sont toutes étonnamment hautes.

6.3.2 Disposition des absorbants

Le Tableau 11 établit l'inventaire des surfaces qui caractérise les parois de la salle pour les 3 scénarios. La première section du tableau recense les revêtements déjà présents dans la salle de projet. La seconde recense deux produits issus du marché. Et la troisième, les deux prototypes retenus suites aux mesures précédentes.

Tableau 11 : Relevé des surfaces par scénario

Type de revêtement	Surface [m ²]			
	Initial	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Béton brut	325.8	245.8	285.8	281.8
Enduit plâtre	51.5	51.5	51.5	51.5
Verre 2 à 4 mm	29.5	29.5	29.5	29.5
Verre > 4 mm	39.8	39.8	39.8	39.8
Ouverture	31.5	31.5	31.5	31.5

Rockfon Panneaux de plafond	-	20	-	
Rockfon Panneaux muraux	-	35	-	
Prototype Copeaux	-	-	20	0
Prototype Millefeuille	-	-	35	44

Comme expliqué au paragraphe 5.6.1.2, les absorbants peuvent être placés au plafond et aux murs de la salle.

Pour le premier scénario, nous choisissons de positionner 20 m² au plafond. C'est assez peu puisque la position de l'éclairage et des poutres ne favorise pas une intervention simple sur cette surface. 35 m² sont aussi répartis sur l'ensemble des murs périphériques à partir de 2 m du niveau du sol. En effet, la salle servant d'atelier et étant amenée à être assez modulaire, il est important de ne pas obstruer les parois accessibles en cas de réaménagement de l'espace. De plus, les panneaux étant relativement fragiles par leur composition de carton, cela limite les potentielles dégradations, qu'elles soient volontaires ou accidentelles.

Pour le second scénario, la configuration est donc la même en remplaçant les panneaux au plafond par des panneaux du prototype en **copeaux**, et ceux sur le mur en prototype de **millefeuille**.

Le troisième scénario vise à répondre aux normes incendies. Au plafond, l'absorbant doit au moins être M3, ce qui n'est pas possible sans traitement. Sur les murs, 20% peuvent être recouverts sans imposer de classification aux éléments, nous pouvons donc y placer jusqu'à 44m².

6.3.3 Simulation des temps de réverbération

6.3.3.1 Scénario 1 et 2

Tableau 12 : Simulation des temps de réverbération -sdb- après traitement acoustique de la salle de projet par bande d'octave

$Tr_{sdb}[s]$	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Cible	1.54	1.32	1.10	1.10	1.10	1.10
Initial	2.20	2.47	2.51	2.53	1.77	1.48
S1 : Rockfon	1.66	1.29	1.09	1.07	0.93	0.92
S2 : Prototypes	2.18	2.45	1.26	1.27	1.15	1.00

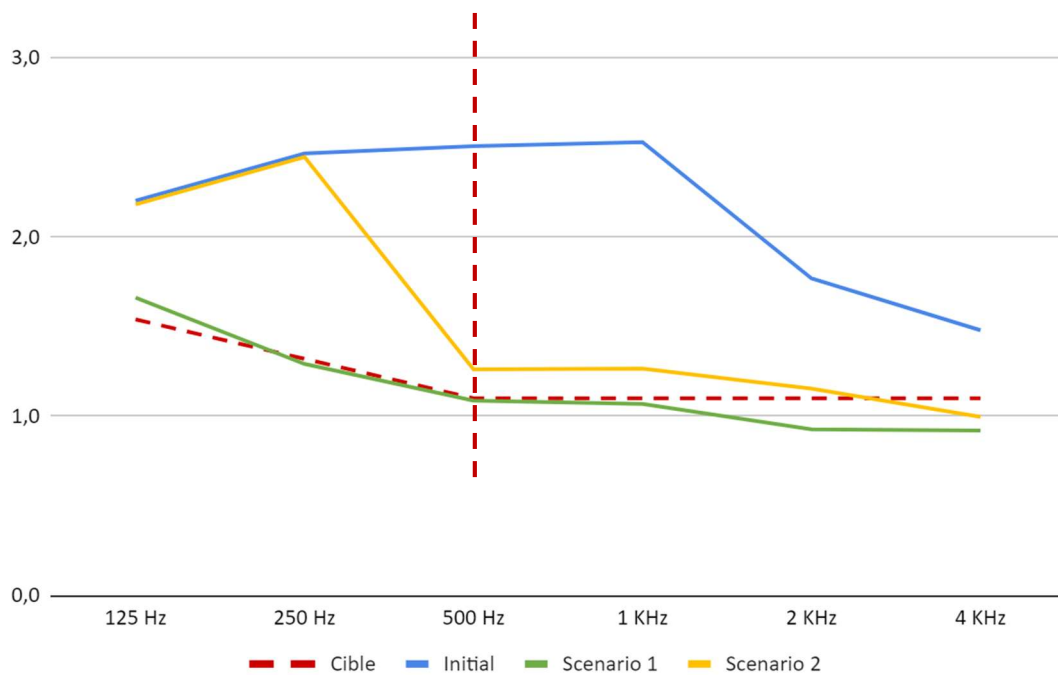


Figure 62 : Simulation des temps de réverbération -sdb- de la salle de projet, scénario 1 et 2

Le graphique de la Figure 62 met en évidence en rouge le temps de réverbération cible détaillé au paragraphe 4.1.2.1 ainsi que, en bleu, celui calculé initialement dans cette salle de projet. En vert, nous avons le temps de réverbération -sdb- calculé à la suite du recouvrement d'une partie des parois de la salle de projet avec les produits Rockfon (55 m²). Et en jaune ce temps de réverbération -sdb- pour une même surface équivalente de recouvrement par des panneaux de prototype en carton.

La ligne verticale représente la limite en dessous de laquelle les coefficients d'absorption -sdb- des prototypes ne sont pas fiables. Pour cette représentation graphique, les valeurs de temps de réverbération initial de la salle ont donc été conservées.

Entre 500 Hz et 1 000 Hz, le temps de réverbération -sdb- ramené vers 1.3 s, ce qui est toujours supérieur à la recommandation, au-delà, cette réduction atteint l'objectif de 1.1 s.



Figure 63 : Scénario 1, modélisation de l'ambiance intérieur de la salle de projet

6.3.3.2 Simulation d'une correction totale

Tableau 13 : Simulation des temps de réverbération -sdb- du scénario 3 par bande d'octave [s]

$Tr_{sdb}[s]$	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Cible	1.54	1.32	1.10	1.10	1.10	1.10
Initial	2.20	2.47	2.51	2.53	1.77	1.48
Scénario 3	2.18	2.45	1.43	1.43	1.30	1.09

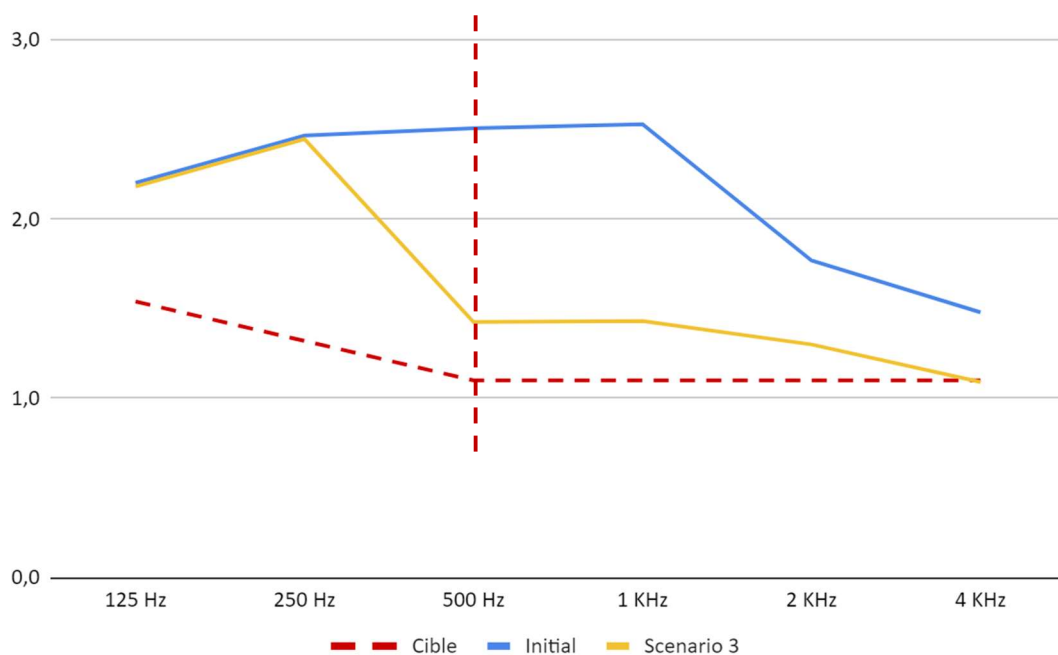


Figure 64 : Simulation des temps de réverbération -sdb- de la salle de projet, scénario 3

Si cette fois nous simulons 44m² de panneaux en **millefeuille** de carton, le temps de réverbération de la salle est de 1.43 s à 1 000 Hz. C'est au-dessus de la recommandation mais tout de même 1,1 s de moins qu'initialement.



Figure 65 : Scénario 3, modélisation de l'ambiance intérieur de la salle de projet

7 Discussion

Pour rappel, la question de recherche vise à identifier comment la fabrication d'un prototype utilisant des matériaux de réemploi peut contribuer à l'amélioration de la qualité acoustique de l'espace.

- l'objectif premier de ce travail de recherche est d'identifier la forme de prototype en carton la plus performante en termes d'absorption pour limiter le temps de réverbération dans des conditions similaires ;
- le second est d'estimer une solution de traitement acoustique de la salle de projet en exploitant les résultats des prototypes les plus performants.

7.1 Rappel des hypothèses propres à l'expérimentation

Les hypothèses dans le cadre de ce travail sont rappelées ci-dessous :

- le microphone n'étant pas calibré conventionnellement, mais uniquement avec la courbe de réponse générique du constructeur, les valeurs sont susceptibles d'être biaisées. Cependant, les prototypes étant évalués dans les strictes mêmes conditions permettent une comparaison relative entre-eux justifiée ;
- l'absence d'un sonomètre pour calibrer le niveau de pression acoustique délivré par la source sonore unidirectionnelle n'est pas un problème puisque le principe de mesure du temps de réverbération se base sur la mesure d'une décroissance de 20 dB. Que ce soit entre 90 dB et 70 dB ou 80 dB et 60 dB, le même temps de décroissance sera mesuré, à condition d'avoir un niveau de bruit ambiant inférieur ou égal à la borne inférieure de cette mesure ;
- la source sonore n'étant pas omnidirectionnelle, cela peut entraîner des répercussions notamment lors de la mesure du temps de réverbération de la salle de projet ;
- les mesures ont été réalisées avec le logiciel REW qui utilise la méthode de mesure par balayage de fréquence en émettant un SWEEP, une méthode validée par la norme NBN ISO 354 ;
- l'ensemble des mesures effectuées ont été réalisées dans des conditions expérimentales proches des recommandations des différentes normes, notamment en ce qui concerne la norme NBN ISO 354 pour les dimensions des prototypes et de la salle de mesure. La salle de bain présente donc des modes propres dans les basses fréquences, ce qui rend les mesures sous 400 Hz difficiles à comparer à des produits présents sur le marché. Cependant, le premier objectif qui vise à identifier le prototype le plus performant est atteint puisque les mesures sont réalisées dans les strictes mêmes conditions.

7.2 Bilan des résultats

7.2.1 Temps de réverbération -sdb-

Lors des mesures dans les deux configurations, la réduction du temps de réverbération est maximale pour deux des prototypes, celui en copeaux et celui en millefeuille. Contrairement aux prototypes en boîtes à œufs et en tubes, ils disposent d'une épaisseur relativement importante. C'est le facteur majeur qui participe à l'amélioration de l'absorption acoustiques d'un matériau.

Les valeurs mesurées à 125 Hz et 250 Hz ne peuvent pas être exploitées correctement. Comme attendu les dimensions de la salle de bain et l'alignement des parois favorisent l'apparition d'ondes stationnaires dans les basses fréquences. C'est pourquoi par la suite leur bande d'octave respective correspondante ne seront pas évaluées.

Tableau 14 : Récapitulatif des temps de réverbération mesurés des configurations 1 et 2 [s]

	Fréquence	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Configuration 1 : 1 m ²	Prototype Copeaux	0.78	0.65	0.81	0.88	0.81	0.75
	Prototype Millefeuille	0.81	0.77	0.81	0.92	0.86	0.75
Configuration 2 : 0.5 m ²	Prototype Copeaux	0.73	0.90	0.90	1.00	0.99	0.92
	Prototype Millefeuille	0.76	1.01	0.88	1.03	1.01	0.89

7.2.2 Coefficient d'absorption – sbd-

Pour les coefficients d'absorption, les valeurs ne sont donc valides qu'à partir de 500 Hz car les dimensions de la salle de mesure font entrer en jeu le mode propre de la pièce.

Cependant les performances évaluées à plus de 100% d'absorption laissent à penser que les coefficient alpha-sdb- sont probablement surévaluées. Ceci s'explique par toutes les entorses faites à la norme NBN ISO 354, à commencer par le choix de la salle de bain comme salle de mesure avec ses dimensions discutables.

Le panneau composé de copeaux de carton est légèrement plus performant pour les bandes d'octave 500 Hz et 4 000 Hz. Entre ces deux bandes, c'est le panneau en millefeuille de carton qui est le plus efficace.

Rappel du Tableau 10 : Moyenne des coefficients absorption -sdb- des prototypes retenus par bande d'octave

Fréquence	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Copeaux	-	-	1.05	1.20	1.00	1.25
Millefeuille	-	-	1.15	1.05	0.85	1.30

7.2.3 Simulation de correction de la salle de projet



Rappel de la Figure 65 : Scénario 3, modélisation de l'ambiance intérieur de la salle de projet

Le temps de réverbération cible défini est de 0.8 s. La simulation réalisée a été faite avec l'ajout de 200 panneaux d'absorbant acoustique en millefeuille de carton de 0.5 m² chacun. Ces absorbants sont répartis sur l'ensemble des parois verticales. Ainsi, le plafond ne subit pas d'intervention. A l'aide de la formule de Sabine, nous simulons le temps de réverbération de la salle à l'aide de l'approche statistique. Les résultats sont repris dans le Tableau 13.

Rappel du Tableau 13 : Simulation des temps de réverbération -sdb- du scénario 3 par bande d'octave

Fréquence	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Cible	1.12	0.96	0.80	0.80	0.80	0.80
Initial	2.20	2.47	2.51	2.53	1.77	1.48
Traitement Prototypes	2.20	2.47	0.75	0.71	0.85	0.65

7.3 Bilan

La simulation indique qu'avec 55 m² panneaux de prototypes en millefeuille de carton, la qualité acoustique de la salle atteindrait la cible fixée par la norme de recommandation NBN S01-400-02. Cependant, cette cible semble assez contraignante, la salle de projet n'est pas une salle de cours ordinaire, il serait plus juste d'accorder une tolérance au temps de réverbération acceptable dans la salle. C'est pourquoi le placement d'uniquement 44 m² de surface murale pour répondre aux réglementations incendies, comme illustré sur la Figure 65, montre une nette amélioration de la situation. De plus, la simulation ne prend pas en compte le mobilier présente dans la pièce.

Les prototypes développés permettent de répondre à la question de recherche qui est de créer un absorbant acoustique pour une salle spécifique en utilisant des matériaux présents dans cette salle. La motivation derrière cette idée est de réemployer le carton, un déchet produit dans la salle et de limiter la production d'une mousse ou d'une laine absorbante conventionnelle. En ajoutant en plus de ça une dimension économique. La fabrication totale n'aura coûté qu'une dizaine d'euros pour un total de 4 x 2 x 0.5 m² de prototypes. Et un temps de production de 3 semaines à raison de 3 jours par semaine. Ce temps de production est à relativiser puisqu'il s'agissait de prototypes, une deuxième version des prototypes verrait l'efficacité de production croître significativement.

7.4 Limites

La limite majeure reste donc l'impossibilité de réaliser les mesures exactement dans les conditions dictées par la norme NBN ISO 354 avec du matériel et des logiciels adéquats. Les fréquences inférieures à 400 Hz sont donc difficiles à analyser. De plus, le calcul des coefficients d'absorption -sdb- restent relatif aux conditions de mesures dans la salle de bain.

Une autre limite concerne la résistance au feu. Selon la disposition et la surface de recouvrement de ceux-ci, un classement M3 voire M2 peut être exigé pour répondre aux recommandations françaises du RSI des ERP (ou son règlement similaire en Belgique) :

- au plafond : les panneaux absorbants devront être testés pour répondre au critère M3, et M2 si leur surface dépasse 25 % (24 m²) ;
- sur les parois verticales : un classement M2 est nécessaire si leur surface dépasse 20 % (44 m²).

7.5 Améliorations et perspectives

A la suite de plusieurs discussions et présentations de mes résultats auprès de mes encadrants, d'experts dans le domaine et d'usagers, plusieurs remarques d'améliorations ont émergées.

Afin de rendre comparable ces prototypes et leur coefficient d'absorption avec ceux de produits présents sur le marché. Nous pourrions pour cela évaluer l'un de ces produits selon mon protocole dans des conditions similaires. Cela permettrait de recalibrer et de pouvoir pondérer les coefficients -sdb- expérimentaux calculés dans ce travail de recherche.

Il serait pertinent également de faire le chemin inverse et de mesurer conformément à un prototype assemblé de 10 m² dans les conditions exigées par la norme NBN ISO 354. Un logiciel adapté serait nécessaire, ou alors, il faudrait développer une routine de programme pour pouvoir automatiser le calcul du temps de réverbération pour en déduire un coefficient d'absorption officiel.

Enfin, des perspectives ont été mentionnées quant à l'amélioration des prototypes.

- celui en **millefeuille** de carton pourrait se décliner en plusieurs versions de différentes épaisseurs comprenant une lame d'air plus ou moins épaisse. Ceci permettrait ainsi de l'évaluer en diminuant sa densité tout en gardant les caractéristiques d'épaisseur globale avec un plenum à l'arrière ;
- celui en **copeaux** de carton peut faire varier deux caractéristiques. L'actuel prototype est réalisé à base de morceaux de différentes tailles et de cartons de toutes sortes : carton plume, carton alvéolé et carton brun, le tout de différentes épaisseurs. Créer différentes densités de cette matrice influencerait sa densité et donc ses propriétés d'absorption.

7.6 Suggestions de questions de recherche complémentaires

Plusieurs perspectives de développement de recherches complémentaires peuvent s'inscrire à la suite de ces travaux :

- la possibilité de développer différentes variantes des prototypes en **millefeuille** et en **copeaux** de carton dans le but d'identifier une configuration optimale du prototype d'absorbant acoustique en carton ;
- la notion de résistance au feu est un point essentiel à résoudre si l'objectif devient à terme, la création d'un produit commercialisable correspondant aux normes en vigueur dans un large champ d'application ;
- le développement d'un processus de fabrication industrielle et donc une étude de faisabilité de production à grande échelle est envisageable pour traiter davantage la gestion l'approvisionnement en matières premières issues du réemploi.

8 Conclusion

La salle de projet est un espace où les étudiants ingénieur-architecte se rencontrent pour suivre des cours, participer à des séances de travail en groupe ou bien même se restaurer le midi. Sa double hauteur et la nature de ses revêtements lui confèrent un temps de réverbération simulé de 2 s en moyenne. Cela représente un dépassement largement supérieur à la recommandation évaluée à 1.1 s à l'aide de la norme NBN S01-400-2. Dans le but d'apporter une solution de traitement acoustique de cette salle, nous menons le développement de produits absorbants utilisant des matériaux présents dans cette même salle.

Dans ce but, différents prototypes d'absorbant acoustiques sont réalisés pour être comparés puis évalués. Ces prototypes prennent la forme de 2 caissons de bois dans lesquels viennent s'insérer 4 types de remplissage en cartons : les **boîtes à œufs**, le **millefeuille**, les **tubes** et les **copeaux**.

Ce travail de recherche étudie la faisabilité de l'évaluation des performances acoustiques qui se rapproche des conditions certifiées suivant les différentes normes concernées. Un protocole de mesure est réalisé en se basant sur la norme NBN ISO 354 qui indique les conditions d'évaluation des produits absorbants en chambre réverbérante.

Bien que les mesures soient finalement réalisées dans la salle de bain, les prototypes peuvent être comparés entre eux. Ce sont ceux en **copeaux** et en **millefeuille** de carton qui présentent des meilleurs performants.

L'évaluation de leurs coefficients d'absorption montre cependant des limites dans l'exploitation pour comparer ces prototypes avec des produits présents sur le marché, la méthode de mesure s'éloignant de manière assez importante de la norme.

Pour conclure, la correction acoustique d'un espace à base de carton réemployé est une solution qui fonctionne de manière expérimentale. Certaines performances seraient à réévaluer dans des conditions certifiées afin de valider complètement les résultats observés. L'utilisation du carton permet de réduire le temps de réverbération de la salle de projet tout en réexploitant des matériaux présents dans la salle. Cependant, pour réaliser la correction totale d'une salle à l'aide des panneaux absorbants en carton, la norme incendie pourrait entraver l'installation en masse d'un tel dispositif tel quel si cet espace est destiné à recevoir du public.

9 Références

[1] François Canac, CERIMES, (1966), *Acoustique des théâtres antiques*, disponible à l'adresse < <https://www.canal-u.tv/chaines/cerimes/acoustique-des-theatres-antiques> > [Visité le 12/02/2023]

[2] Stéphane LANDEAU – chapitre IX – *le son*, disponible à l'adresse : < <http://pccollege.fr/cycle-4/cycle-4-classe-de-5eme/chapitre-ix-le-son/> > [Visité le 31/05/23]

[3] Bureau de Normalisation Belge (1997), *NBN EN ISO 266 : Acoustique – Fréquences normales*

[4] Embrechts Jean-Jacques, (2014), *Acoustique du bâtiment - Chapitre 1 à 5*, disponible à l'adresse : < <https://orbi.uliege.be/handle/2268/240337> > [Visité le 05/10/22]

[5] Bureau de Normalisation Belge (2012), *NBN S 01-400-2 : Critères acoustiques pour les bâtiments scolaires*

[6] Wikipédia, *Expérience de Melde*, disponible à l'adresse : < https://fr.wikipedia.org/wiki/Exp%C3%A9rience_de_Melde > [Visité le 03/06/2023]

[7] Bureau de Normalisation Belge (2003), *NBN ISO 354 : Mesurage de l'absorption acoustique en salle réverbérante*

[8] Matthew A. Bzarsalou (2015), *Root Cause Analysis: A Step-By-Step Guide to Using the Right Tool at the Right Time*

[9] Site internet de *Mecanum*, disponible à l'adresse : < <https://mecanum.com/fr/measuring-instruments/acoustic-test-cabin/> > [Visité le 13/05/23]

[10] Bureau de Normalisation Belge (2008), *NBN ISO 3382-2 : Mesurage des paramètres acoustiques des salles – Partie 2 : Durée de réverbération des salles ordinaires*

[11] Bureau de Normalisation Belge (1997), *NBN ISO 11654 : Acoustique – Absorbant pour l'utilisation dans les bâtiments – Evaluation de l'absorption acoustique*

[12] Bureau de Normalisation Belge (2018), *NBN EN 13501-1 : Classement des produits et éléments de construction – Partie 1 : Classement à partir des données d'essais de réaction au feu*

[13] Site internet de *Nullifire*, disponible à l'adresse : < https://www.nullifire.com/fr_FR/services/blog/reaction-au-feu/ > [Visité le 22/04/23]

[14] Bureau d'étude Sécurité incendie (2015), *Règlement Sécurité Incendie des ERP - Chapitre III, Articles AM : Aménagements Intérieur, Décoration et Mobilier*

[15] Site internet de *Acouphile*, disponible à l'adresse : < <http://www.acouphile.fr/materiaux.html> > [Visité le 16/03/23]

[16] Site internet de *Rockfon*, disponible à l'adresse : < <https://www.rockfon.com/> > [Visité le 16/03/23]

[17] Chaîne YouTube *DIY Perks*, disponible à l'adresse : < <https://www.youtube.com/@DIYPerks> > [Visité le 10/10/22]

[18] Site internet de *Acoustix*, disponible à l'adresse : < <https://acoustix.be/> > [Visité le 16/03/23]

[19] Site internet de *PYT Audio*, disponible à l'adresse : < <https://www.pytaudio.com/> > [Visité le 21/02/23]

Annexes

Annexe 1 : Calendrier

Annexe 2 : Excel de calcul complet

Annexe 3 : Journal de mesure

Annexe 4 : Fiches des produits Rockfon

Annexe 5 : Fiches du matériel de mesure



Lien vers les annexes