



Projet :

---

# Étude acoustique de la salle Isadora

---

Elisa Belhassen et Azal Le Bagousse

Encadré par Francois Ollivier et Antoine Hajczak

Sorbonne Université

Master Mécanique Parcours Acoustique - 1ère année

29 avril 2024

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Mise en oeuvre du projet</b>	<b>1</b>
2.1	Normes . . . . .	1
2.2	Définition des grandeurs et matériel . . . . .	2
2.3	Plan d'expérience . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Mesures et exploitation</b>	<b>6</b>
3.1	Niveaux de pression acoustique et temps de réverbération . . . . .	6
3.2	Isolation aux bruits extérieurs . . . . .	6
3.3	Intelligibilité . . . . .	7
3.4	Absorption d'une paroi . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Modélisation de la salle - CATT</b>	<b>7</b>
4.1	Disposition - base . . . . .	8
4.2	Cartographies - SPL,TR,STI . . . . .	9
4.2.1	Visualisation du SPL et du TR30 . . . . .	9
4.2.2	Modélisation d'un cours/réunion (STI) . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Préconisations</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Annexes</b>	<b>17</b>
8.1	Les niveaux de qualité acoustique . . . . .	17
8.2	Plan d'expérience pour le bruit de choc . . . . .	18
8.3	Les mesures en salle . . . . .	18
8.4	Intelligibilité . . . . .	21
8.5	Schéma de la disposition du matériel - mesures d'absorption et d'isolation . . . .	22
8.6	Répartition du travail . . . . .	22



FIGURE 1 – Avant de la salle Isadora



FIGURE 2 – Arrière de la salle Isadora

# 1 Introduction

Ce projet se construit autour de l'étude du traitement acoustique de la salle Isadora, se situant dans le Département des Sports à Jussieu (Sorbonne Université Sciences), destinée à accueillir des cours ainsi que des réunions.

En 2009, elle a été soumise à une analyse acoustique par d'anciens élèves du M1 Acoustique et a été récemment rénovée. En effet, par le passé, cette salle était connue pour ses problèmes d'acoustique, notamment liés à la mauvaise isolation aux bruits extérieurs.

Le projet vise donc à entreprendre une étude acoustique supplémentaire de la salle afin d'évaluer les retombées de ces récents aménagements du point de vue acoustique.

Dans cette optique, il est possible d'énoncer plusieurs tâches qui contribuent à cet objectif défini : la mesure des paramètres acoustiques actuels suivie d'un diagnostic ; la modélisation sous Catt Acoustics, un logiciel pour la modélisation et le conseil en acoustique des salles ; l'analyse des mesures effectuées et des préconisations éventuelles.

Il est également impératif d'effectuer une recherche bibliographique approfondie concernant l'étude des normes en vigueur et du matériel à utiliser.

L'objectif de cette étude est de confronter rigoureusement les données de mesures réelles collectées au sein de la salle obtenues au moyen d'appareil de mesures sélectionnés et de sources sonores, cela préalablement défini dans ce rapport, avec les données de mesures virtuelles produites par le biais d'un logiciel spécialisé et de comparer le tout avec les mesures pré-traitement. Cette première confrontation est essentielle pour vérifier la concordance des mesures et pour simuler des aménagements visant à optimiser l'acoustique de la pièce. Cette approche analytique permettra de garantir la fiabilité des résultats obtenus, qui pourront ensuite être appliqués à l'environnement étudié.

## 2 Mise en oeuvre du projet

Pour amorcer le projet, différents aspects clés qui le composent seront mentionnés. Une analyse des normes sera entamée que puis rigoureusement appliquée afin d'assurer la précision et la fiabilité des mesures puis le matériel nécessaire à leur réalisation sera évoqué. Ensuite, les différentes grandeurs étudiées seront abordées, avant de présenter un plan d'expérience détaillé.

### 2.1 Normes

La salle Isadora est considérée une salle d'étude ou de réunion dans un immeuble. Pour les bâtiments de bureaux, aucune réglementation acoustique spécifique n'est de mise.

Il faut se rapporter à la norme NF S31-080 : bureaux et espaces associés. Cette dernière s'applique à différents espaces, pour en citer quelques uns : les bureaux individuels et collectifs, les salles de formations, de réunion, les espaces de détente et les restaurants, d'un volume inférieur à  $250m^3$  (la salle faisant  $10.4m \times 10.4m \times 2.3m$ , elle a un volume de  $248.8m^3$  donc la norme sera représentative).

Cette norme définit des critères minimums à respecter afin d'atteindre un des trois niveaux de performances [8.1] selon le type d'espace : les niveaux courant, performant et très performant. Le niveau courant correspond à un confort acoustique minimum. Au sein de ces environnements, les discussions et autres bruits légers peuvent constituer une gêne et aucune garantie de discrétion n'est offerte.

Le niveau performant est parfaitement adapté à des tâches demandant une concentration limitée. Quelques bruits extérieurs peuvent être entendu sans nécessairement causer de gêne. Ce niveau est propice au travail assurant un bon confort acoustique.

Le niveau très performant est quant à lui utile pour des échanges nécessitant de la discrétion. Il n'est d'ailleurs pas utile d'élever la voix pour s'entendre. Les sons provenant de l'extérieur peuvent être perçu sans toutefois entraîner de gêne ou de fatigue. Il s'agit d'un confort acoustique maximal. [3]

Le niveau performant sera utilisé dans ce rapport car il répond aux besoins de la salle.

Une autre norme est également à prendre en compte :

La norme ISO 3382-1 :2019 - Acoustique - Mesurage des paramètres acoustiques des salles - Partie 1 : Niveau de pression acoustique, niveau d'énergie acoustique, et temps de réverbération dans une salle.

Cette norme définit les méthodes spécifiques pour évaluer le temps de réverbération et d'autres paramètres acoustiques des salles. Elle précise les étapes de mesure, les équipements nécessaires, les exigences de couverture (soit la quantité et la répartition spatiale des points de mesure nécessaires pour obtenir une représentation précise des caractéristiques acoustiques d'une salle), les procédures d'analyse des données ainsi que les manières de représenter les rapports d'essais. Son objectif réside dans la facilitation de l'emploi des méthodes modernes de mesures numériques, permettant ainsi l'évaluation des caractéristiques acoustiques des salles à partir des réponses impulsionnelles.

Les réponses impulsionnelles correspondent à la manière dont un système, ici la salle Isadora réagit à une excitation sous la forme d'une impulsion, permettant de caractériser son comportement. [7]

## 2.2 Définition des grandeurs et matériel

Il faut mesurer différentes grandeurs pour étudier la salle selon toutes ses caractéristiques :

- \* le niveau acoustique de pression moyen (Pa)
- \* le temps de réverbération du signal dans la salle (s)
- \* le niveau de bruit de choc (dB)
- \* l'isolement au bruit (aérien) intérieur (s.u.)
- \* le niveau sonore des bruits extérieurs (dB)
- \* intelligibilité (coefficient STI) (s.u.) voir :(3.3)

**PRESSION ET NIVEAUX :** D'après [6] :

Le niveau de pression acoustique en dB s'exprime de la manière suivante :

$$L = 20 \log\left(\frac{p_{eff}}{p_{ref}}\right) \quad (1)$$

avec  $p_{ref}$  la pression de référence d'une valeur de  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa.

Cette valeur a été choisie afin que le niveau de pression soit nul au seuil d'audibilité. Ce choix est une convention pour l'air.

On a  $p_{eff}$  la pression efficace en Pascal, correspondant à la valeur quadratique moyenne :

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt} = p_{eff} = p_{ref} \times 10^{\frac{L}{20}} \quad (2)$$

Elle est plus représentative que la pression moyenne qui est nulle dans le cas de l'acoustique linéaire.

**RÉVERBÉRATION :** La mesure de la réverbération T60 classique (ou le temps de réverbération) correspond à la durée que met le son à décroître de 60 dB par rapport à son niveau d'origine. Pour être plus précis, c'est le temps qu'il faut pour que la pression acoustique s'abaisse à 1/1000ème de sa valeur de départ [1].

Donc pour un  $t = T_{60}$ , il y a :

$$p^2(t) = p_s^2 \times 10^{-6} = p_s^2 \times e^{\frac{-cAT_{60}}{4V}} \quad (3)$$

avec : A une surface en  $m^2$ , V un volume en  $m^3$ , c la célérité en  $m/s$  et  $p_s^2$  la pression quadratique moyenne du régime établi.

Le temps de réverbération est donc, d'après [2], page 9 :

$$T_{60} = 6 \times \ln(10) \times \frac{4V}{cA} = \frac{55,3V}{cA} \quad (4)$$

On donne souvent la formule de Sabine sous la forme suivante :

$$Tr = \frac{0.16 \times V}{A} \quad (5)$$

qui est équivalente à l'équation 2 pour une célérité de 343m/s à 20°C.

Le coefficient d'absorption, noté  $\alpha$ , est défini comme le rapport de l'énergie acoustique non réfléchié à l'énergie incidente sur la surface :

$$\alpha = \frac{I_{absorbée}}{I_{incidente}} \quad (6)$$

Ses valeurs sont comprises entre 0 et 1 ( $\alpha = 1$  correspond à une énergie incidente absorbée intégralement).

**ABSORPTION :** Le thème d'absorption des parois sera aussi exploité dans cette étude. La notion de surface équivalente d'absorption notée A. Sa formule est donnée par :

$$A = \sum_i S_i \alpha_i = S \times \alpha_m \quad (7)$$

avec  $\alpha_m$  le coefficient d'absorption moyen.

Avec la formule de Sabine citée plus haut, on peut obtenir  $\alpha_m$  en inversant l'équation ci-dessus. Ces formules serviront pour estimer l'absorption moyenne des parois de la salle Isadora, des mesures importantes dans le cadre d'une étude acoustique complète de salle.

**MATÉRIEL :** Pour mesurer tous les paramètres mentionnés dans cette sous-partie, il faudra utiliser le matériel suivant :

Un mètre (pour mesurer les dimensions de la pièce et la position de la source dans celle-ci)  
 – Un sonomètre (niveaux et TR) – Un microphone (ici intégré au sonomètre) – Une source sonore (ici source de bruit rose) – Une machine à chocs (mesure du bruit solidien) – Des ballons de baudruche (afin de mesurer le temps de réverbération par impulsion)

## 2.3 Plan d'expérience

On commence par définir la spatialisation dans le contexte d'étude.

L'objectif est d'obtenir des mesures caractérisant la salle Isadora pour étudier son isolement acoustique et pouvoir appliquer des traitements acoustiques adaptés. Des premières mesures seront alors effectuées pour modéliser la salle et ses caractéristiques acoustiques sur Catt Acoustics.

Pour les niveaux de pression et les temps de réverbération, toutes les mesures seront effectuées dans la salle Isadora, en variant les positions du microphone (sonomètre) et de la source.

Pour mesurer l'isolement acoustique et l'absorption d'une paroi néanmoins, il faut évaluer la capacité des parois de la salle à atténuer les transmissions sonores entre l'espace intérieur et l'extérieur. Pour se faire, il faut se référer à l'indice d'isolement acoustique standardisé ( $D_{nT}$ ). Cet indice est usuellement déterminé en mesurant la différence de niveaux sonores entre une source sonore située dans une pièce émettrice et un point de réception situé dans une pièce adjacente. On détermine une pièce d'émission et une pièce de réception pour l'étude.

La salle Isadora sera choisie comme point de réception et la salle de classe avoisinante comme salle d'émission. Cela signifie qu'un signal sera émis à partir de la source dans la salle de classe, proche de la salle Isadora, pour mesurer son isolement au son extérieur direct, et il sera réceptionné dans la salle d'étude.

Pour toutes les mesures, il est nécessaire que le son émis dans la salle soit stable, présentant un spectre continu et constant dans une certaine plage de fréquences. Dans cette optique, l'utilisation d'un bruit blanc ou d'un bruit rose est préconisée. Ici, un générateur de bruit rose sera utilisé puisqu'il fait partie du matériel prêté attribué à ces expériences.

Il faudra utiliser une plage de fréquences recommandée par la norme ISO 16283 (qui spécifie les modes opératoires permettant de déterminer l'isolement acoustique aux bruits aériens des éléments de façade) pour de telles mesures. Les fréquences centrales des bandes d'un tiers d'octave (de 50 à 5000Hz) sont souvent utilisées dans les évaluations de l'isolement acoustique conformément aux recommandations de cette norme, alors la plage de fréquences suivante sera utilisée (en Hz) :

50 – 63 – 80 – 100 – 125 – 160 – 200 – 250 – 315 – 400 – 500 – 630 – 800 – 1000 – 1250 – 1600 – 2000 – 2500 – 3150 – 4000 – 5000

Par commodité, seulement certaines quelques fréquences centrales de cette plage seront utilisées pour les mesures, puisqu'elles sont importantes dans le traitement des salles (en Hz) :

125 – 250 – 500 – 1000 – 2000 – 4000

Les mesures à 5000Hz seront aussi comptabilisées, maximum possible sur le sonomètre utilisé, pour référence, bien qu'elle ne soit pas centrale.

Le plan d'expérience est maintenant défini :

La première grandeur mesurée est le **niveau de pression acoustique** dans la salle –  $L_p$ . Pour la mesurer, un unique microphone sera utilisé et déplacé à différents endroits dans la pièce. Ce dernier sera toujours placé à au moins 0,5 mètre des parois pour éviter les réflexions du son sur les surfaces environnantes (qui pourraient fausser les mesures), et à au moins 1 mètre de la source émettrice (ou de la surface du sol s'il est frappé par la machine à chocs). Il faudra choisir une distance source-capteur assez grande (qui reste cohérente pour une prise de son) car quand le microphone est très proche de la source sonore, le son peut être capté de manière disproportionnée et le niveau de bruit ne serait pas fidèlement reflété. Le microphone

doit balayer une zone de rayon assez significatif par rapport à la taille de la pièce pour obtenir des mesures plus fiables pour tout l'espace, le bras tenant le microphone doit alors effectuer un mouvement continu en largeur et en hauteur durant les mesures pour couvrir une grande surface de détection.

Chaque mesure doit durer au moins 10 secondes, pour capturer précisément les variations temporelles du bruit, et au moins deux mesures doivent être effectuées autour d'une position du microphone (en variant la position de la source). Pour chaque position de microphone, une moyenne des niveaux sonores mesurés sera effectuée pour obtenir une représentation plus précise.

Il est ensuite utile de quantifier la **durée de réverbération** –  $T_r$ .

Il faut mesurer comment le son décroît (le niveau diminue) dans la salle directement après l'arrêt de la source sonore (mesure par **bruit interrompu** en interrompant la source à chaque mesure) ou directement après un bruit fort et très court (mesure par **impulsion** avec des ballons crevés à chaque mesure) à l'aide du sonomètre. Pour garantir la fiabilité des résultats, 2 mesures de décroissance seront effectuées puis moyennées entre elles pour chacune de 4 différentes positions de microphones (dans chaque coin de la salle), soit 8 mesures au total. Le résultat sera alors un **T20 (temps de réverbération sur une décroissance du bruit de 20dB)** et un **T30 (sur une décroissance de 30dB)**. Les T30 sont des mesures de référence et seront utiles pour obtenir le temps de réverbération moyen dans les coins de mesures. Le haut-parleur aura une position fixe et les différentes positions de microphones pour permettre une couverture complète de la zone d'étude de réverbération. On moyennera enfin tous les temps de réverbération T30 des coins pour obtenir le temps moyen de la salle et pouvoir l'utiliser dans Catt Acoustics.

On veut déterminer ensuite les caractéristiques d'**absorption d'une paroi** –  $\alpha_m$ . Seule une paroi sera ici étudiée, par contrainte d'accès à tous les parois de la salle (accès à l'extérieur compromis). Il faut étudier l'absorption d'une paroi entre 2 salles avoisinantes, la salle Isadora et la salle de classe qui lui est collée. Pour cela, il faudra placer le microphone sur la diagonale de la salle, à une distance équivalente au deux tiers de sa longueur à partir de l'angle de référence. Ce dernier correspond à l'angle opposé à la paroi de séparation la plus proche de la façade ou par les façades elle-même si la salle en a deux.

Pour garantir un isolement maximal entre les salles, le microphone sera positionné sur la diagonale la plus proche de la parallèle à celle définie par la salle d'émission. Pour assurer un positionnement correct, le microphone doit aussi être situé à deux tiers de la longueur de la salle à partir de la paroi séparatrice. La disposition du matériel est schématisée en annexe [8.5].

Il est important de mesurer ensuite **l'isolation aux bruits extérieurs** –  $D_{nT}$  (qui évalue l'isolation acoustique entre deux pièces). Le plan d'expérience sera similaire à celui de l'absorption. Avec  $D = L1 - L2$ , on peut mesurer les niveaux en salle d'émission L1 puis ceux en salle de réception L2 et étudier l'affaiblissement à travers la paroi étudiée.

On peut enfin mesurer le **bruit de choc** –  $L'_{nT}$ .

Le niveau de bruit de choc standardisé permet de quantifier le bruit solidien de la pièce.

Pour cette partie, nous avons appris à utiliser le matériel (machine à chocs) et effectué des mesures mais avons décidé de ne pas les exploiter. Le plan d'expérience potentiel pour cette partie se trouvera donc en annexe [cf. 8.2], et le bruit de choc ne sera pas plus mentionné dans ce rapport.

### 3 Mesures et exploitation

Les noms suivants seront utilisés dans la suite du rapport pour définir les parois (les coins de la salle quant à eux ont des noms composés de deux noms de plans perpendiculaires) : le mur "tableau" en arrière de la source avec le tableau blanc, le mur "tatami" auquel la source fait face (sur lequel sont posés des tapis de sport dans la salle Isadora), le mur "fenêtre" à gauche (fenêtre+mousses) de la source et le mur "mur" (simple) à droite. Les positions exactes sont données en annexe [8.3].

#### 3.1 Niveaux de pression acoustique et temps de réverbération

Pour les mesures [8.3], la source est située au centre de la pièce, face au mur opposé au tableau (elle face le fond de la salle). La source utilisée produit un bruit rose au maximum de volume pour obtenir des mesures plus correctes grâce au RSB (rapport signal sur bruit) qui sera plus élevé, ce qui signifie que le bruit de fond ne perturbera pas les mesures (qui prennent en plus en compte le bruit de fond grâce au sonomètre qui effectue les mesures en fonction). Les graphiques suivants sont obtenus pour les TR mesurés :

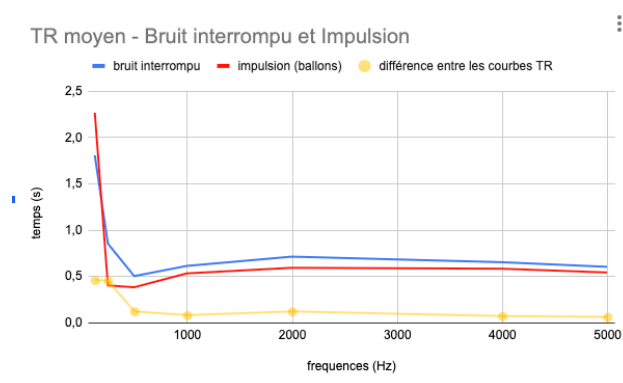


FIGURE 3 – Graphique du TR moyen en salle (2 méthodes) en fonction des fréquences

On remarque que les courbes des TR moyens en fréquences sont quasiment les mêmes (avec la courbe jaune qui quantifie la différence entre chaque mesure sur les 2 courbes, qui se rapproche d'une droite constante nulle) en bruit interrompu et en impulsion. On préfère se baser sur les temps en bruit interrompu puisque les mesures sont moins compromises par la présence humaine proche de la source (éclater un ballon en se situant en dessous de celui-ci apporte une incertitude aux mesures). Les valeurs de TR sont adaptées au niveau de qualité acoustique performant de la norme S31-080. Les valeurs en basses fréquences sont plus élevées (temps plus long) qu'en hautes fréquences et également légèrement au dessus des valeurs attendues pour les normes dans ce cas. Ceci est dû au fait qu'en basses fréquences, certains matériaux absorbent moins bien le son et on peut en déduire que la salle présente plus de matériaux absorbant dans les hautes fréquences (relation inversement proportionnelle entre coefficient d'absorption moyenne et TR).

#### 3.2 Isolation aux bruits extérieurs

Comme expliqué dans le plan d'expérience, l'objectif est d'évaluer la capacité des parois de la salle à atténuer les transmissions sonores entre l'espace intérieur et l'extérieur. Pour se faire, il



faudra utiliser l'indice d'isolement acoustique standardisé  $D_{nT}$  correspondant à  $D_{nT} = L1 - L2$ . Cet indice a été déterminé en mesurant la différence de niveaux sonores entre la source sonore située dans une pièce émettrice (la salle adjacente à Isadora (L1)) et un point de réception, à 2/3 à l'opposé sur la diagonale (en salle Isadora(L2)).

Les mesures sont trouvées en annexe [8]. Il y a bien au minimum 35dB de différence (comme souhaité par les normes) entre les niveaux de pression à 1m de la source dans la salle émettrice (cf. tableau de mesures) et les niveaux en salle Isadora. Cet écart va de 36.2 à 41.2dB et correspond bien au niveau performant de la norme S31-080. L'isolation aux bruits venant d'une salle adjacente (ici salle de classe) est correctement mise en place.

### 3.3 Intelligibilité

L'indice de transmission de la parole (STI) est largement considéré comme le paramètre de référence pour évaluer l'intelligibilité d'une communication vocale.

Pour garantir une bonne intelligibilité de la parole, il est nécessaire de mettre en place un processus de mesure objectif permettant d'avoir des résultats précis et fiables.

L'évaluation de cette intelligibilité vocale se base sur la reproduction d'un signal de test STIPA, dont la qualité est mesurée à chaque point de mesure. Cette méthode est conforme à la norme CEI 60268-16 régissant l'indice de transmission de la parole. Ce test définit le processus de mesure de toute altération du signal ainsi que la présentation du résultat d'intelligibilité sous la forme d'un indice unique variant de 0 à 1 soit de l'incompréhension à la parfaite compréhension du son [14]. Il est recommandé d'effectuer la mesure de STI dans un environnement le plus silencieux possible, en évitant toute perturbation sonore engendré par des machines, des individus et autres sources de bruits.

Le matériel nécessaire à cette mesure est un analyseur STI (analyseur audio portable qui permet une mesure fiable de cet indice) qui n'était pas proposé par la faculté. Par conséquent, des mesures expérimentales ne pouvaient pas être effectuées. En revanche, il sera possible de modéliser l'indice STI sous Catt Acoustics.

### 3.4 Absorption d'une paroi

A l'aide des formules (5) et (7), il a été possible de mesurer les coefficients d'absorption du mur "mur" pour chacune des fréquences.

On remarque que ces coefficients [9] sont proches de ceux de la précédente étude. En effet, aucun changement n'a été fait sur ce mur, de la peinture a simplement été appliquée.

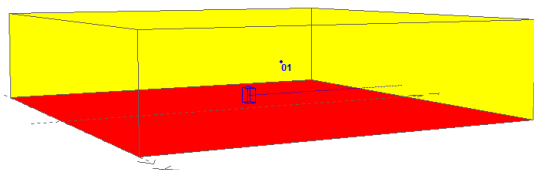
De plus, on remarque des coefficients d'absorption plus faibles en basses fréquences qu'en hautes fréquences : il est déduit que cette paroi absorbe mieux les hautes fréquences et laisse plus facilement passer les basses. La présence de ce mur peut expliquer en partie l'absorption générale de la salle dans les hautes fréquences selon le TR moyen.

## 4 Modélisation de la salle - CATT

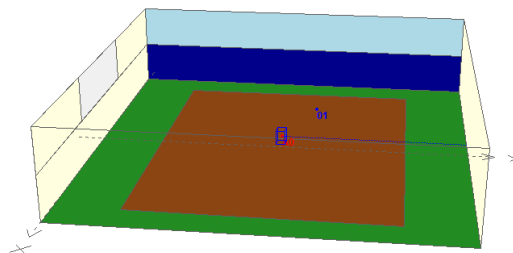
Dans cette section, la modélisation réalisée à l'aide de Catt Acoustics sera présentée en détails. La section débutera en exposant la méthodologie choisie pour la modélisation de la salle puis les mesures expérimentales seront confrontées à la simulation grâce aux estimations

des courbes de temps de réverbération à l'aide des coefficients d'absorption des matériaux. Ces dernières vont permettre de fournir des cartographies détaillées du niveau de pression acoustique (SPL), de l'indice de transmission de la parole (STI) et du temps de réverbération (TR) offrant ainsi une visualisation complète des différentes grandeurs en conditions réelles. Ainsi, il sera possible de conclure en proposant une modélisation optimale d'une salle de cours ou de réunion, accompagnée de la disposition idéale pour celle-ci.

## 4.1 Disposition - base



(a) Première modélisation de la salle

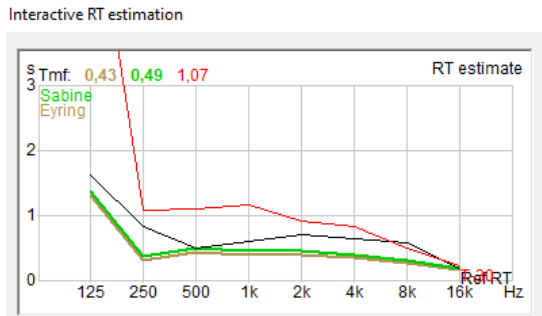


(b) Modélisation finale

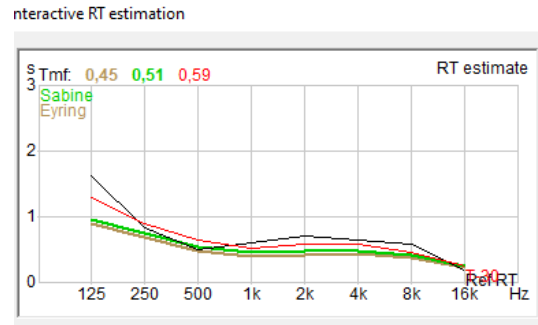
L'étude virtuelle a été initiée par la modélisation de la salle Isadora sur le logiciel Catt afin de pouvoir ensuite s'occuper des simulations à partir d'une réplique la plus proche possible de la pièce en termes de capacités acoustiques.

Pour la première simulation, une salle rectangulaire a été modélisée (10.4m / 10.4m / 2.3m, les mesures de la salle Isadora sans les niches murales) avec une source de bruit rose au centre de la pièce ainsi qu'un récepteur (le sonomètre) situé légèrement en hauteur et à 1 mètre devant la source sonore.

Il a été possible par la suite de modéliser la salle plus précisément en intégrant divers matériaux de coefficients d'absorption différents pour se rapprocher au maximum de l'absorption réelle de la salle : un tableau (fig.b/panneau gris) sur le mur (fig.b/en briques blanc cassé) à l'arrière de la source, des vitres bleues en haut du mur gauche (fig.b), avec de la mousse bleu foncée en bas, puis un sol en linoléum/vinyle vert (fig.b) avec une audience (de 1 personne sur chaise par mètre carré) au centre en brun (fig.b). Simuler de manière précise une expérience de salle de classe/réunion pleine avec les éléments de la salle Isadora permettent ensuite de simuler les coefficients d'absorption et d'obtenir le temps de réverbération (TR) prévu et le comparer aux résultats obtenus dans la salle (cf. tableau des TR). Un TR simulé devrait être trouvé (en utilisant la fonction "RT estimation" de Catt) s'approchant de celui des expériences dans la salle pour avoir une réplique modélisée presque parfaite de la salle Isadora. Avec la courbe rouge représentant le TR(30) obtenu par simulation et la courbe noire les références de TR mesurés dans la salle, il en vient :



(a) Première estimation du TR : courbes rouge et noire non superposées



(b) Estimation finale du TR : validation des éléments choisis pour la salle modélisée

Il est donné ici une comparaison entre une simulation de TR au début de l'étude de salle modélisée avec certains matériaux sélectionnés, et une simulation finale, après avoir changé quelques matériaux de la salle modélisée, qui valide les choix finaux de matériaux. En effet, sur la figure a), on remarque qu'en hautes fréquences la simulation est assez correcte avec les deux courbes qui se chevauchent, mais l'absorption des matériaux simulés en basses fréquences est trop faible (le TR simulé est bien plus long que celui mesuré, avec 0.55s de différence 500Hz et plus 2s de différence à 125Hz), donc il a fallu modifier les matériaux choisis selon leurs coefficients d'absorption moyennes (donnés dans un guide sur Catt) pour améliorer l'absorption virtuelle en basses fréquences. Sur la figure b), après avoir modifié les matériaux du plafond et du sol (partie linoléum), la courbe de TR simulé obtenue est bien plus proche de celle de les TR mesurés, se superposant presque (avec une différence moyenne minime de 0.1s entre les deux courbes). Cela signifie qu'il est enfin possible d'utiliser la salle virtuelle pour simuler d'autres indices acoustiques.

## 4.2 Cartographies - SPL,TR,STI

Le but du traitement acoustique d'une salle de classe/réunion est principalement d'assurer une bonne intelligibilité en tout point et de maximiser l'isolement au bruit extérieur.

On souhaite utiliser le logiciel Catt et la salle modélisée pour simuler des cartes acoustiques selon divers indices. Cela permettra de visualiser la diffusion des grandeurs acoustiques dans divers endroits de la salle ainsi que de vérifier la concordance des mesures réelles et simulées. Des cartographies seront utilisées pour représenter les niveaux de pression (SPL), le TR30 et le STI (Speech Transmission Index) [cf. 3.3].

### 4.2.1 Visualisation du SPL et du TR30

La simulation débute par les niveaux de pression en dB (SPL) avec un récepteur à 1m devant la source :

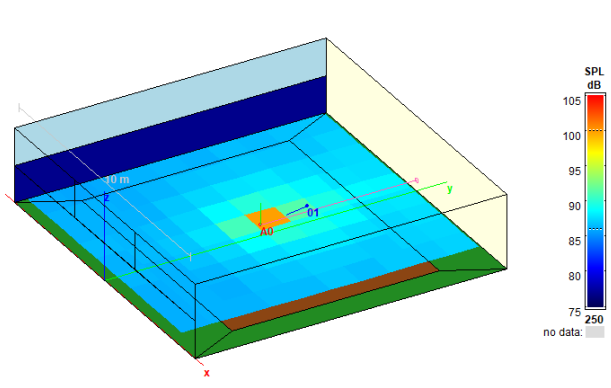


FIGURE 6 – SPL (1m dev. source) - 250Hz

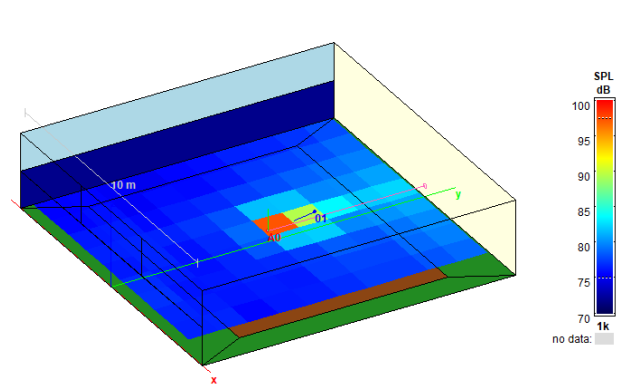


FIGURE 7 – SPL (1m dev. source) - 1000Hz

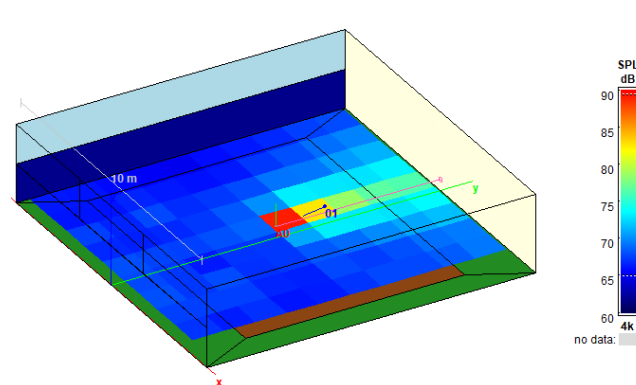


FIGURE 8 – SPL (1m dev. source) - 4000Hz

**Comparaison des valeurs à 1m devant la source :** On observe à 250Hz un niveau de pression à 93dB, en ayant obtenu expérimentalement à cette fréquence un niveau de 94.2dB. A 1000Hz, on observe sur la carte un niveau de pression de 89dB, en ayant expérimentalement eu 89.2dB à cette fréquence. Enfin, on voit à 4000Hz la concordance entre la valeur théorique sur cartographie de environ 83dB et la valeur expérimentale de 82.4dB mesurée en salle. Les valeurs obtenues numériquement sont proches des valeurs expérimentales, ce qui fait sens avec la modélisation.

Ensuite, la visualisation des T30 est effectuée. On place le récepteur virtuel dans le coin mur-tatami pour pouvoir comparer avec les mesures dans ce même coin physique :

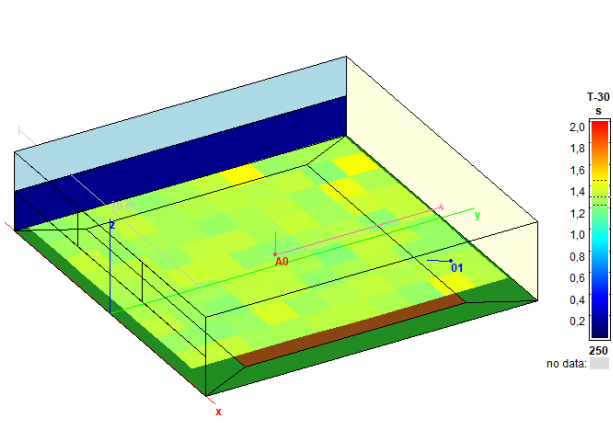


FIGURE 9 – Cartographie des T30 à 250Hz

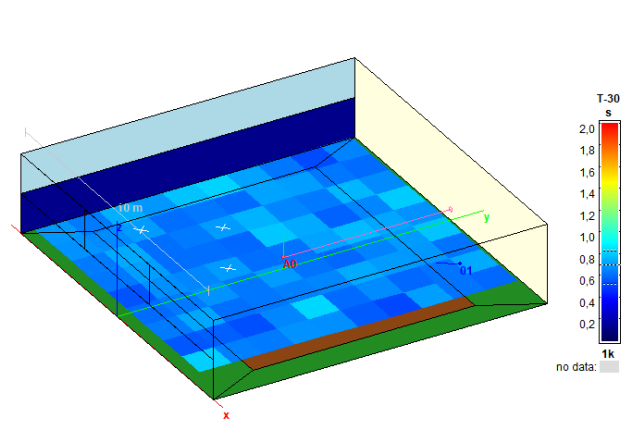


FIGURE 10 – Cartographie des T30 à 1000Hz

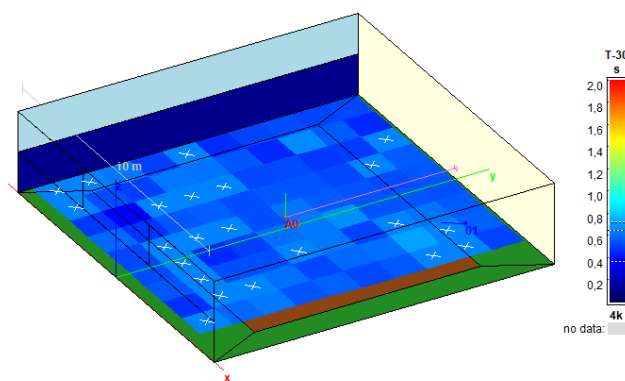


FIGURE 11 – Cartographie des T30 à 4000Hz

**Comparaison des valeurs dans le coin mur-tatami :** Selon les tableaux de mesures en annexe, il y a pour le TR30, respectivement pour 250Hz, 1000Hz, 4000Hz, des valeurs de 0.56s, 0.54s, 0.53s. Or on remarque sur les cartographies des valeurs de environ 1.3s, 0.75s, 0.73s respectivement. On commencera par rappeler que le TR est proportionnel à l'absorption (formule de Sabine...), et que la représentation virtuelle du TR sur Catt est obtenue dans une salle vide, car Catt ne permet pas d'ajouter de meubles ou d'objets externes aux plans. Les mesures de TR en acoustique des salles devraient effectivement être idéalement réalisées dans la pièce d'étude vide, mais les mesures de ce projet ont été effectuées dans la salle avec son équipement (tables, chaises, tatamis aux murs...), ce qui explique la différence dans les TR mesurés et virtuels : les meubles ont chacun une certaine absorption qui permet au son de prendre moins de temps pour décroître de 30dB. On remarque aussi que les TR pour 1kHz et 4kHz sont assez proches dans les 2 cas, tandis que pour 250Hz on voit le TR doubler en virtuel. On pose alors l'hypothèse que les meubles et autres aménagements dans la pièce sont plus absorbants dans les basses fréquences autour de 250Hz (effectivement, dans les mesures à 125Hz le TR est très élevé, donc cette hypothèse ne peut pas être émise pour toutes les basses fréquences). Pour revenir à la différence entre les TR modélisés et mesurés, les cavités ou les irrégularités dans une pièce peuvent absorber une partie de l'énergie sonore, réduisant ainsi le temps de réverbération, et la salle physique présente des niches qui n'ont pas été modélisées sur Catt par souci de praticité. Ceci ajoute donc des incertitudes aux résultats obtenus avec Catt. On se fiera aux résultats obtenus par mesures puisque l'étude a directement été faite en salle et qu'ils sont cohérents

avec les normes utilisées.

Une comparaison avec les mesures expérimentales révèle une forte similarité entre les valeurs modélisées et les mesures physiques, confirmant ainsi la concordance totale de la modélisation avec la salle réelle (selon tous les indices).

**N.B.** : La résolution des cartographies est assez faible/le maillage est moyennement précis car Catt Acoustics demande un temps très long pour améliorer la résolution des graphiques, c'était donc la résolution maximale possible pour les cartographies après divers essais (qui donne une bonne idée de la répartition des indices).

#### 4.2.2 Modélisation d'un cours/réunion (STI)

Il est intéressant, à présent, de visualiser un nouvel indice non mesuré, le STI, qui va être utile pour choisir la meilleure configuration à adopter lorsque que la salle doit être utilisée (cours, réunion...).

Le choix a été fait de modéliser la salle comme lors d'un cours ou d'une réunion, en mettant en lumière dans l'audience la présence de 4 récepteurs spécifiques : un professeur/speaker et 3 élèves. Il a été déterminé dans la modélisation trois points (à différentes hauteurs pour simuler une différence de taille) pour représenter les élèves et une source rectangulaire pour le professeur (plus haute car on imagine un professeur debout et des élèves assis). Cette modélisation permet de visualiser l'intelligibilité de la salle en conditions réelles (le professeur émettant un discours à un niveau moyen de 65dB).

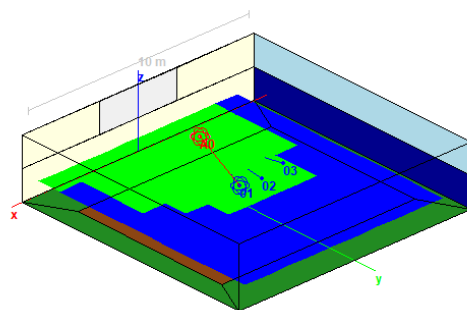


FIGURE 12 – Cartographie STI avec source humaine contre le tableau

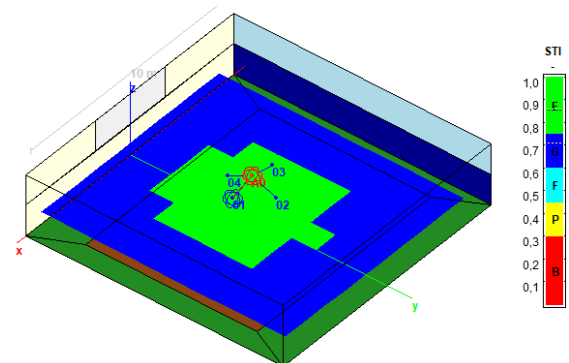


FIGURE 13 – Cartographie STI avec source humaine au centre de la pièce

Ces cartographies ont été directement représentées avec l'échelle de grade qualitatif d'intelligibilité (Excellent-Good-Fine-Poor-Bad) plutôt que l'échelle du STI quantifié pour une meilleure compréhension du phénomène. On souhaite déterminer la meilleure disposition pour un cours en salle Isadora, d'où ces deux cartes. Dans les 2 dispositions, il est observé une excellente intelligibilité entre le professeur et les élèves symbolisée par la zone verte correspond à un excellent indice de transmission de la parole (STI compris entre 0.8 et 1=Excellent). Cela fait sens puisque la salle est petite, la valeur du STI ne descendra pas en dessous d'un niveau bon (G = Good, zone bleue foncée) et sera excellent autour du professeur. Dans le cas du professeur proche du tableau cependant, seuls les élèves assez proches de lui (à 3 mètres dans la disposition mise

en place) auront une excellente écoute, tandis que ceux du fond de la classe n'auront qu'une bonne écoute. Cependant, dans la disposition en cercle, tous les élèves sont à peu près à la même qualité d'écoute comme on peut le voir au STI excellent en zone verte sur la cartographie.

Il est possible de tirer de cette étude que la salle peut être correctement utilisée pour des cours ou des réunions. De plus, il a été établi que la meilleure disposition pour un professeur et ses élèves serait de placer le professeur au centre de la pièce, et les élèves tout autour (en forme de "O"). Malgré un STI meilleur sur une plus grande zone dans le premier cas (fig.11) grâce aux réverbérations directes sur le mur, la disposition en O permet à tous les élèves (sur deux rangées en "O" par exemple) d'avoir une excellente écoute, pas seulement pour les élèves des premiers rangs au centre.

Il faut tout de même noter que la différence en situation réelle est minime entre une entente excellente et une entente bonne à excellente (entre G et E sur l'échelle), donc qu'une disposition classique de salle reste opérationnelle.

## 5 Préconisations

Il était déjà possible de se rendre compte à l'oreille que la salle avait une bonne acoustique comparée aux salles voisines, comme la salle de classe adjacente (du côté mur gauche) ou le gymnase. Pour confirmer cette observation, des mesures expérimentales et numériques ont été effectuées, révélant ainsi une isolation acoustique satisfaisante dans la salle. En effet, par rapport à la précédente analyse acoustique faite par le passé par des anciens élèves du M1 Acoustique en 2009, les résultats de la présente étude sont bien plus conformes à l'usage prévu de cet espace.

En comparant avec l'étude précédente, il est évident que les travaux ont considérablement amélioré l'acoustique de la salle.

Le traitement acoustique avait été effectué au niveau du sol avec l'ajout de linoléum, au plafond avec la pose d'un faux plafond présumé en polyester et au niveau des fenêtres en appliquant de la mousse sur la longueur.

Ainsi, lorsque les temps de réverbération moyens sont étudiés, les valeurs obtenues à ce jour sont beaucoup plus faibles que celles de l'analyse passée :

Fréquence en Hz	125	250	500	1000	2000	4k	5k
Etude de 2009							
TR moy (en s)	4.25	3.55	2.50	2.41	2.03	1.52	XXX
Etude actuelle							
TR moy (en s)	1.63	0.85	0.50	0.61	0.71	0.65	0.60

TABLE 1 – Comparaison des temps de réverbération

Une nette amélioration est observée. En effet, un temps de réverbération faible implique une absorption élevée. Cela permet de limiter les échos et d'avoir une meilleure intelligibilité.

Bien que les temps de réverbérations et l'intelligibilité soient bons et rentrent dans les normes, des préconisations peuvent être faites pour atteindre une meilleure acoustique et une qualité d'isolation supérieure.

En mesurant les coefficients d'absorption des différents matériaux de la salle, il est envisageable d'évaluer les changements à effectuer ou les matériaux à ajouter en tenant compte de divers budgets.

Par manque de temps, cependant, il n'a pas été possible de quantifier l'absorption de toutes les surfaces.

Néanmoins, des zones nécessitant des changements ont été identifiées durant l'étude, notamment au niveau des fenêtres et de la porte donnant directement sur l'extérieur, vers les pelouses.

En effet, les mesures indiquent que les niveaux sonores sont plus élevés au coin mur-tatami que dans les autres coins de la salle, ce qui suggère une fuite de bruit provenant de l'extérieur par la porte. Cette observation est corroborée par la perception personnelle d'un niveau de bruit extérieur plus élevé à cet endroit. Cette fuite sera attribuée au matériau peu absorbant de la porte ainsi qu'à l'espace non comblé entre la porte et le sol, dissimulé par de simples mousses non fixées (simplement posées). Bien que ces mousses atténuent légèrement le bruit, elles laissent échapper des décibels vers l'extérieur, compromettant par ailleurs également l'isolation thermique de la salle.

Concernant les fenêtres, des rideaux ont été ajoutés vers la fin de la prise des mesures. Bien que ces rideaux peuvent améliorer l'isolation acoustique, il n'a pas été possible d'effectuer de nouvelles mesures suite à ces changements provenus à la fin de l'analyse.

Pour remédier à l'isolation acoustique de la porte, différentes solutions sont proposées, par prix croissant : [8]

- Envisager d'entourer la porte avec du caoutchouc, d'ajouter des joints sur le haut et les côtés, ou à installer une barre de seuil ou un balai de porte. De plus, placer des panneaux acoustiques en mousse sur les différentes surfaces de la porte sont des solutions efficaces, permettant de gagner entre 5 et 15dB de réduction sonore, et tout cela à un coût modeste (environ une vingtaine d'euros pour chacune de ces options).
- la pose d'un rideau anti-bruit, qui selon l'épaisseur et la composition permet une isolation acoustique satisfaisante. Elle permet une absorption acoustique de 10 à 20dB et est à faible coût, environ une centaine d'euros.

Bien que plus coûteuses, les solutions suivantes offrent une amélioration significative de l'isolation acoustique, apportant ainsi un véritable changement :

- Installer un bloc anti-bruit qui enveloppe à la fois la porte et son encadrement est une option à considérer. Fabriqué à partir de divers matériaux comme le coton ou la mousse, ce bloc offre une amélioration notable de l'isolation acoustique. Selon la marque, il peut offrir un affaiblissement sonore allant jusqu'à 27 dB(A). Cependant, il convient de noter que cette solution est relativement coûteuse, avec un prix pouvant atteindre jusqu'à 500 euros.
- l'installation d'une porte isolante de type simple joint constitue une solution idéale, offrant des performances acoustiques et thermiques remarquables. Ce type de porte peut permettre une réduction sonore allant de 30 à 42 dB(A). Cependant, il est important de noter que le coût associé à cette option est relativement élevé, avec des prix variant généralement entre 500 et 2500 euros. [8]



## 6 Conclusion

Ce projet d'analyse de la salle Isadora, mené dans le but d'évaluer les répercussions des travaux pour traiter l'acoustique de la pièce a été une expérience enrichissante et instructive. Au cours de cette étude, nous avons acquis de nouvelles connaissances et compétences dans le domaine de l'acoustique architecturale. Nous avons pu constater de manière significative l'amélioration de l'acoustique de la salle suite aux aménagements réalisés et mieux comprendre les concepts enseignés en acoustique du bâtiment.

Par ailleurs, ces nouveaux aménagements ont permis d'obtenir une qualité sonore parfaitement adaptée aux besoins de la salle assurant un bon confort acoustique et un endroit propice au travail.

Ce projet nous a permis de développer diverses compétences, notamment la manipulation du matériel nécessaire, une expertise complète dans l'utilisation du logiciel Catt Acoustics, l'élaboration d'un plan d'expérience rigoureux, ainsi que la conduite de recherches bibliographiques approfondies pour une meilleure compréhension des normes en vigueur. De plus, nous avons exploré différentes méthodes pour améliorer l'isolation acoustique de la salle et avons découvert le paramètre permettant d'évaluer son intelligibilité.

Nous avons entamé cette étude sans bénéficier de formation préalable sur le sujet, puisque les cours d'acoustique du bâtiment ont commencé plus tard que le projet, ce qui nous a permis d'être autodidactes dans le domaine. L'acquisition de ces compétences nous a conféré la capacité à agir de manière autonome et de faire face aux nombreux défis rencontrés sur un projet complexe dans un domaine nouveau.

Finalement, cette analyse approfondie a permis de confirmer l'efficacité des mesures correctives mises en œuvre, tout en mettant en évidence l'importance d'une approche méthodique dans la conception et l'évaluation des environnements acoustiques.

## 7 Bibliographie

- [1] - <https://www.pro-isophony.fr/definition-temps-de-reverberation-tr>
- [2] - Jean-dominique POLACK, *Acoustique des espaces clos*, février 2020
- [3] - <https://www.siniat.fr/fr-fr/projets/conseils-experts/145876/reglementation-acoust>
- [4] - [https://www.bruit.fr/images/stories/pdf/bordeaux\\_2011/rene\\_gamba.pdf](https://www.bruit.fr/images/stories/pdf/bordeaux_2011/rene_gamba.pdf)
- [5] - <https://acoucibe.fr/article-la-mesure-acoustique-des-bruits-dimpacts-dans-les-bat>
- [6] - Régis MARCHIANO, *support de cours d'acoustique générale de M1*, 2021
- [7] - <https://www.iso.org/fr/standard/40979.html>
- [8] - <https://mieux-consommer.ilek.fr/isolation/isolation-phonique-porte/>

## 8 Annexes

### 8.1 Les niveaux de qualité acoustique

D'après [4], il est possible de définir les trois niveaux de qualité acoustique :

Description	Niveau courant
Niveau sonore global dont	$L_{50} \leq 55dB(A)$
-bruits extérieurs	$D_{nT,A,tr} \geq 30dB$
-bruits des équipements	$L_{Aeq} \leq 45dB(A)$
Bruits de chocs	$L_{nTw} < 62dB$
Réverbération ( $Vol < 250m^3$ )	$Tr \leq 0.8s$
Décroissance spatiale ( $vol > 250m^3$ )	2dB(A)/doublement si décroissance non applicable : $Tr \leq 1.2s$
Isolement au bruit aérien intérieur	$D_{nT,A} \geq 30dB$

TABLE 2 – Espaces ouverts, niveau courant

Description	Niveau performant
Niveau sonore global dont	$40dB(A) < L_{50} < 45dB(A)$
-bruits extérieurs	$D_{nT,A,tr} \geq 30dB$ et $L_{50} \leq 35dB$
-bruits des équipements	$NR35 \leq L_p \leq NR40$
Bruits de chocs	$L_{nTw} < 60dB$
Réverbération ( $Vol < 250m^3$ )	$0.6 < Tr \leq 0.8s$
Décroissance spatiale ( $vol > 250m^3$ )	3dB(A)/doublement si décroissance non applicable : $Tr \leq 1s$
Isolement au bruit aérien intérieur	$D_{nT,A} \geq 35dB$

TABLE 3 – Espaces ouverts, niveau performant

Description	Niveau très performant
Niveau sonore global dont	$40dB < L_{50} < 45dB(A)$
-bruits extérieurs	$D_{nT,A,tr} \geq 30dB$ et $L_{50} \leq 30dB$
-bruits des équipements	$L_p \leq NR33(\text{permanent})$ et $L_{max} \leq 35dB(A)$ (intermittant)
Bruits de chocs	$L_{nTw} < 58dB$
Réverbération ( $Vol < 250m^3$ )	$Tr \leq 0.6s$
Décroissance spatiale ( $vol > 250m^3$ )	4dB(A)/doublement si décroissance non applicable : $Tr \leq 0.6s$
Isolement au bruit aérien intérieur	$D_{nT,A} \geq 40dB$

TABLE 4 – Espaces ouverts, niveau très performant

## 8.2 Plan d'expérience pour le bruit de choc

L'indice de bruit de choc (noté  $L'nT$ ) est calculé d'après la moyenne des niveaux de pressions linéaires mesurés dans la salle (il ne s'agit pas de la moyenne des niveaux en dB) pondérée par le temps de réverbération du local de réception. [5].

Pour cette expérience, la machine à chocs doit être positionnée à au moins quatre endroits différents, à minima dans chaque coin. Étant donné que le sol est anisotrope (plancher+tatamis), il sera possible d'effectuer des mesures pour un plus grand nombre d'emplacements de machine si le temps le permet. Chaque position de la machine à chocs doit être associée à deux positions de microphones pour les mesures (toujours 2 mesures par emplacement). Il faudra patienter jusqu'à ce que le niveau sonore se stabilise avant de commencer les mesures. La machine à chocs sera alignée parallèlement à une diagonale spécifique définie pour les mesures d'isolement au bruit aérien.

Concernant les mesures du bruit de choc, nous n'avons malheureusement pas pu réaliser ce que nous avions initialement envisagé. En effet, nous avons utilisé le sonomètre afin de calculer le temps de réverbération avec la machine à choc. Cependant, nous n'avons pu consacrer le temps nécessaire à l'acquisition de mesures de niveau. Par conséquent, l'analyse du bruit solidien est entravée.

## 8.3 Les mesures en salle

**Positions précises dans la salle Isadora :** Dans les mesures, la source se situe toujours à 5.10m du tableau, à 6.2m des fenêtres, à 4.24m du mur face aux fenêtres et 6.7m du mur tatami.

Les coins de la salle sont définis comme étant :

\*Le coin fenêtre-tatami correspond à la distance entre la source et l'emplacement du sonomètre à 5,18m sur la diagonale.

\*Le coin mur-tatami correspond à la diagonale entre la source et le sonomètre d'une distance

de 4,63m.

\*Le coin mur-tableau correspond à la diagonale entre la source et le sonomètre d'une distance de 4,35m.

\*Le coin fenêtre-tableau correspond à la diagonale entre la source et le sonomètre d'une distance de 5,55m.

Fréquence en Hz	125	250	500	1000	1600	2000	3150	4k	5k
Position 1 à 1m en face de la source									
B2	12.9	16.5	14.6	18.5	15.9	17.9	17.0	18.4	18.8
L2	92.9	94.2	86.1	89.2	88.7	84	83	82.4	73.2
Position 2 à 2m en face de la source									
B2	18.5	*	17.4	16.9	21.4	14.6	13.0	15.4	12.2
L2	89.6	*	91	81.9	84.8	81.1	76.7	77.6	76.0
Position 3 à 1m derrière la source									
B2	16.5	13.1	21.3	13.6	14.0	21.8	14.5	15.2	15.5
L2	87.3	86.5	87.3	80.4	78.9	78.4	71.8	70.1	66.0
Position 4 à 2m derrière la source									
B2	17.1	*	22.8	18.3	20.6	18.8	14.7	18.1	13.9
L2	85	*	85.2	80.1	77	74.7	71.5	68.9	66.4
Position 5 (4m54 tout droit côté fenêtre)									
B2	13.5	*	21.1	18.9	14.7	15.5	21.4	14.4	16.1
L2	87.4	*	85.8	79.7	76	75.9	71.4	68.9	66.7
Position 6(2m60 tout droit côté mur)									
B2	13.0	*	16.8	23.2	20.2	19.0	22.8	14.5	19.4
L2	88.7	*	88.7	81.4	76.8	75.7	72.3	70.2	68.4
Position 7(coin fenêtre-tatami)									
B2	21.7	*	21.7	19.619.8	20.7	22.6	13.9	16.4	13.8
L2	85.1	*	85.3	81.5	79.3	76	74.9	72.7	68.5
Position 8(coin mur-tatami)									
B2	21.7	19.8	15.9	21.9	20.3	19.9	18.5	15.4	14.7
L2	89	89.3	89.7	81.4	79.5	76.1	74	74.9	71.3
Position 9(coin mur-tableau)									
B2	21.0	*	14.6	14.1	13.0	14.0	15.5	12.6	12
L2	87.5	*	83.4	79.2	77	73.5	74.1	71.5	65.3
Position 10(coin fenêtre-tableau)									
B2	14.6	15.7	15.7	21.8	23.4	13.8	18.7	17.8	12.6
L2	86.9	81	83.7	78.9	75.8	73.4	71.5	69.1	64

TABLE 5 – Mesure des niveaux de pression acoustique en dB

Fréquence en Hz	125	250	500	1000	2000	4k	5k
Position 1 (coin fenêtre- tatami)							
T20	1.51	0.82	0.54	0.66	0.71	0.68	0.56
T30	1.44	1.14	0.49	0.61	0.71	0.68	0.61
Tr moyen	1.475	0.98	0.515	0.635	0.71	0.68	0.585
Position 2 (coin mur- tatami)							
T20	1.7	0.64	0.48	0.61	0.77	0.6	0.5
T30	2.15	0.70	0.47	0.6	0.68	0.63	0.53
Tr moyen	1.925	0.67	0.475	0.605	0.725	0.615	0.515
Position 3 (coin mur-tableau)							
T20	1.43	1.32	0.45	0.63	0.68	0.59	0.61
T30	1.66	0.95	0.46	0.58	0.70	0.64	0.61
Tr moyen	1.545	1.135	0.454	0.605	0.69	0.62	0.61
Position 4 (coin fenêtre- tableau)							
T20	1.16	0.6	0.57	0.58	0.7	0.64	0.63
T30	1.95	0.66	0.55	0.63	0.7	0.69	0.63
Tr moyen	1.56	0.63	0.56	0.61	0.7	0.665	0.63
Temps de réverbération moyen dans la salle							
Tr total moyen	1.8	0.85	0.5	0.61	0.71	0.65	0.60

TABLE 6 – Temps de réverbération pour bruit interrompu

Fréquence en Hz	125	250	500	1000	2000	4k	5k
Position 1 (coin fenêtre- tatami)							
T20	*	0.71	0.32	0.53	0.57	0.59	0.55
T30	*	0.63	0.43	0.57	0.59	0.57	0.53
Tr moyen	*	0.67	0.375	0.55	0.56	0.58	0.54
Position 2 (coin mur-tatami)							
T20	3.98	0.66	0.4	0.48	0.58	0.58	0.53
T30	3.98	0.56	0.43	0.54	0.59	0.58	0.54
Tr moyen	3.98	0.61	0.415	0.51	0.585	0.58	0.535
Position 3 (coin mur-tableau)							
T20	2.05	0.58	0.37	0.56	0.62	0.56	0.53
T30	2.05	0.64	0.37	0.53	0.65	0.58	0.54
Tr moyen	2.05	0.61	0.37	0.545	0.635	0.57	0.535
Position 4 (coin fenêtre- tableau)							
T20	1.64	0.69	0.29	0.53	0.57	0.58	0.55
T30	1.64	0.61	0.43	0.52	0.6	0.6	0.53
Tr moyen	1.65	0.65	0.36	0.525	0.585	0.59	0.54
Temps de réverbération moyen dans la salle							
Tr total moyen	2.26	0.64	0.38	0.53	0.59	0.58	0.54

TABLE 7 – Temps de réverbération pour ballon impulsion

Fréquence en Hz	125	250	500	1000	2000	4k	5k
Salle d'émission							
L1	97.4	97.5	95.6	93.5	89.8	85.5	79.9
Salle de réception (Isadora)							
Position 1 (centre de la salle)							
L2 <sub>1</sub>	64.4	60.5	61.6	55.3	49.6	45.4	41.4
B2	39.3	35.5	27.0	29.7	26.3	24.2	22.3
Position 2 (coin fenêtre-tatami)							
L2 <sub>2</sub>	60.6	58.6	58.5	52.2	47.7	40.5	36.1
B2	36.2	35.3	35.0	34.1	32.9	31.3	30.4
Position 3 (coin fenêtre-tableau)							
L2 <sub>3</sub>	58.7	56.7	58.2	53.6	49.7	45.3	41.7
B2	37.4	36.3	35.8	34.9	34.1	33.5	31.6
Niveaux d'isolation moyens en salle de réception							
L2 moyen	61.2	58.6	59.4	53.7	49	43.7	39.7
Calcul de l'affaiblissement D=L1-L2							
D	36.2	38.9	36.2	39.8	40.8	41.8	40.3

TABLE 8 – Niveaux d'isolation pour déterminer DnT

Fréquence en Hz	125	250	500	1000	2000	4k	5k
Salle de réception							
B2	37.2	28.1	22.9	25.6	23.2	16.8	21.6
L2	67.9	63.7	64.2	61.8	58.6	52.1	46.6
Tr moyen1	1.98	2.26	1.47	1.56	1.40	1.75	1.03
Tr moyen2	2.40	2.82	1.55	2.00	1.6	1.14	1.08
Tr moyen	2.21	2.54	1.51	1.78	1.50	1.45	1.06
Salle d'émission							
L1	96.3	96.5	96.7	91.5	86.8	82.5	77.9
calcul absorption							
Surface équiv abs	18.01	15.67	26.36	22.36	26.54	27.45	37.55
Coeff abs moy	0.06	0.05	0.08	0.07	0.08	0.09	0.1
Coeff abs moy en %	6	5	8	7	8	9	10

TABLE 9 – Calcul de l'absorption de la paroi mur "mur"

## 8.4 Intelligibilité



FIGURE 14 – Intelligibilité

## 8.5 Schéma de la disposition du matériel - mesures d'absorption et d'isolation

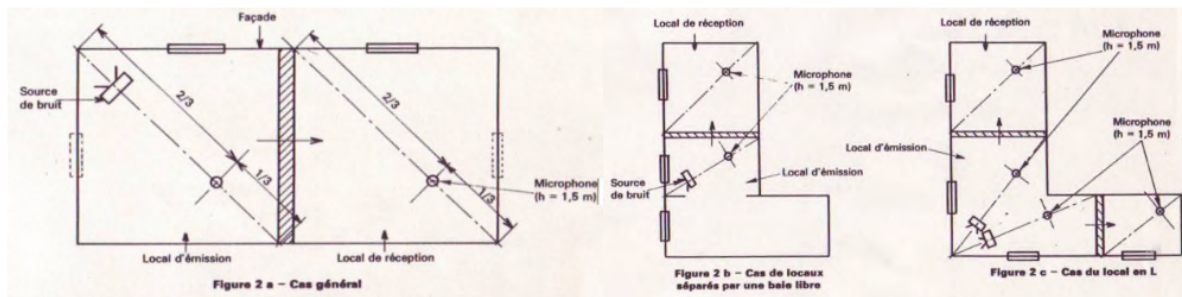


FIGURE 15 – Disposition du matériel pour suivre les normes utilisées (schéma norme 31-080)

## 8.6 Répartition du travail

Le travail a été également réparti entre chaque membre binôme puisque nous avons effectué toutes les mesures et avons appliqué tous les traitements sur logiciel ensemble, sur le campus de Jussieu (Sorbonne Université Sciences, Paris V). Quant au rapport, nous avons rédigé la plupart des parties ensemble, ou sommes repassées l'une sur le travail de l'autre lorsque nous écrivions indépendamment.

**Remerciements :** Merci à M François Ollivier et M Antoine Hajczak pour nous avoir encadrées sur ce projet. Merci aussi à M Jean-Dominique Polack qui nous a partagé ses connaissances en acoustique du bâtiment pour certaines parties du projet qui étaient complexes. Enfin, merci à l'équipe des encadrants du projet qui corrigeront ce rendu et la présentation affiliée.