



**HAL**  
open science

## Correction acoustique des salles de TD 3N21 et 3N22 : vers une solution "tout bois"

Vincent Champilou, Bastien Coutant

### ► To cite this version:

Vincent Champilou, Bastien Coutant. Correction acoustique des salles de TD 3N21 et 3N22 : vers une solution "tout bois". Sciences de l'ingénieur [physics]. 2012. hal-01873288

**HAL Id: hal-01873288**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01873288>**

Submitted on 13 Sep 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**Rapport de Projet de Fin  
d'études  
- 3AI -**

**Correction acoustique  
des salles  
de TD 3N21 et 3N22  
Vers une solution "Tout bois"**

**Vincent CHAMPILOU  
Bastien COUTANT  
2011 / 2012**

**Enseignants responsables :**

**M. Sébastien AUCHET  
M. Antonin TRIBALEAU**

## **AVANT PROPOS**

Nous tenons à remercier les personnes qui nous ont aidés dans notre projet de fin d'études pour le temps qu'ils nous ont accordés, pour l'apport de leur compétence et de leur moyen. Nous remercions tout particulièrement M. Sébastien Auchet et M. Antonin Tribaleau ainsi que le Critt Bois. Merci aussi à l'équipe technique et plus particulièrement à Cyril et Bruno qui nous ont beaucoup aidés lorsque nous avons rencontré des problèmes dans la fabrication des panneaux.

## SOMMAIRE

<b>PRINCIPALES NOTATIONS</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>2</b>
<b>- PARTIE 1 - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>4</b>
1. LE SON .....	4
1.1. <i>Un phénomène vibratoire</i> .....	4
1.2. <i>Les caractéristiques d'un son</i> .....	5
1.3. <i>La perception du son</i> .....	5
1.3.1. Description .....	5
1.4. <i>L'intelligibilité d'un son</i> .....	7
2. L'ABSORPTION ACOUSTIQUE .....	7
3. LES DIFFERENTES METHODES DE MESURE DU TEMPS DE REVERBERATION .....	8
3.1. <i>Le choix d'un indicateur de confort acoustique</i> .....	8
3.2. <i>Les conditions de mesures</i> .....	9
3.3. <i>Le matériel et son placement</i> .....	10
4. LA METHODE CALCULATOIRE .....	11
5. LES RESULTATS .....	12
<b>- PARTIE 2 - EXPERIMENTATION ET MODELISATION</b> .....	<b>15</b>
1. METHODE DE MESURE ACOUSTIQUE .....	15
1.1. <i>Bruit blanc</i> .....	15
1.2. <i>Bruit rose</i> .....	16
1.1. <i>Mise en place</i> .....	16
2. LA MODELISATION DES SALLES SOUS CATT-ACOUSTIC .....	18
2.1. <i>Introduction au logiciel</i> .....	18
2.2. <i>Principe général de fonctionnement du logiciel</i> .....	20
2.2.1. Données d'entrées.....	20
2.2.2. Valeurs de sortie .....	20
2.3. <i>Détail de la modélisation de la salle 3N21</i> .....	21
2.3.1. Entrée des paramètres géométriques de la salle .....	21
2.3.2. Entrée des paramètres d'absorption et de diffusion .....	22
2.3.3. Réglage de la source et des récepteurs .....	22
3. COMPARAISON ENTRE LES TR CALCULES ANALYTIQUEMENT ET MESURES .....	23
<b>- PARTIE 3 - ANALYSE ET CORRECTION ACOUSTIQUE</b> .....	<b>29</b>
1. ANALYSE DE L'ACOUSTIQUE DES SALLES DE TD .....	29
2. LES DIFFERENTES SOLUTIONS TECHNIQUES .....	32
2.1. <i>Les matériaux acoustiques</i> .....	32
2.2. <i>Quelques exemples de solutions techniques compatibles</i> .....	33
2.3. <i>Conclusion de cette étude</i> .....	36
3. CREATION DE PANNEAUX ACOUSTIQUES .....	36
3.1. <i>Les normes de résistance au feu</i> .....	36
3.2. <i>La conception du module</i> .....	39
3.3. <i>La vérification de la vibration de la membrane en isorel</i> .....	40
3.4. <i>La fabrication des modules acoustiques</i> .....	42
3.4.1. L'usinage .....	42
3.4.2. Le montage .....	43
3.5. <i>Étude de prix de nos panneaux</i> .....	45
4. OPTIMISATION ACOUSTIQUE DES SALLES DE CLASSE .....	46
4.1. <i>Test des panneaux expérimentaux</i> .....	46
4.2. <i>Simulation acoustique de la salle 3N21 équipé avec les panneaux expérimentaux</i> .....	48
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>50</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>51</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>52</b>
<b>RESUMÉ</b> .....	<b>64</b>

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>64</b>
<i>Figure 1 Le diapason .....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 2 Période et amplitude .....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 3 Courbe de Flecher et Munson .....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 4 Différence entre l'isolation acoustique et l'absorption acoustique .....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 5 Correction acoustique d'auditoriums.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 6 Salle réverbérante du Pôle acoustique du Centre de Transfert de Technologie du Mans .</i>	<i>9</i>
<i>Figure 7 : Interférence des ondes acoustiques.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 8 Comparaisons entre les différents niveaux relatifs sonores émis par une personne en fonction de la fréquence. ....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 9 Sonomètre.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 10 Source omnidirectionnelle.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 11 Représentation d'un bruit blanc (intensité en fonction de la fréquence) .....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 12 Intensité d'un bruit rose en fonction de la fréquence (source : <a href="http://wongjasonh.wordpress.com/2010/03/02/pink-noise-its-out-there/">http://wongjasonh.wordpress.com/2010/03/02/pink-noise-its-out-there/</a>) .....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 13 Mesures expérimentales .....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 14 Disposition et ordre de placement des différents panneaux.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 15 Courbe des temps de réverbération obtenue par l'expérimentation.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 16 Interface de calcul et résultat du mapping. ....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 17 Résultat des calculs détaillés.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 18 Plans de la salle 3N21 .....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 19 Représentation de la salle 3N21 en 3D .....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 21 TR avant ajustement définitif.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 20 Graphique du module d'estimation interactive des temps de réverbération (TR) .....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 22 Ajustement du TR.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 23 Ajustement du TR définitif.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 24 Graphique du module d'estimation interactive des TR après modification. ....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 25 Temps de réverbération de la salle 3N21 vide .....</i>	<i>29</i>
<i>Figure 26 Propriété acoustique du panneau du commerce .....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 27 Temps de réverbération pour la salle 3N21 .....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 28 Temps de réverbération pour la salle 3N22 .....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 29 Évolution du temps de réverbération avec le nombre de panneaux ajoutés (3N31) .....</i>	<i>31</i>
<i>Figure 30 Évolution du temps de réverbération avec le nombre de panneaux ajoutés (3N32) .....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 31 Piégeage d'une onde sonore dans un pore ouvert .....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 32 Add-Saturn .....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 33 Add-Morse.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 34 LFM Bamboo.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 35 Obersound.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 36 Peinture intumescente .....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 38 Ajout d'un panneau horizontal.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 37 Un panneau acoustique.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure 39 Simulation d'un mur recouvert de modules.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 40 Les 4 premiers modes propres d'une membrane.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 41 Le mode 1 de chacune de deux plaques.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 42 L'usinage des panneaux perforés .....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 43 Un sac de ouate de cellulose .....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 44 Un panneau acoustique fini.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure 45 Panneaux EPM 49.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure 46 Propriétés acoustiques des panneaux testés.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure 47 Un mur de résonateurs constitué de lames de bois .....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 48 Disposition finale des panneaux acoustique .....</i>	<i>48</i>
<i>Figure 49 Correction acoustique de la salle 3N21 avec 20 panneaux .....</i>	<i>49</i>
<i>Figure 50 Aperçu de la salle.....</i>	<i>49</i>

**PRINCIPALES NOTATIONS**

Notations générales

<i>TR</i>	<i>Temps de Réverbération (s)</i>
$\alpha_i$	<i>Coefficient d'absorption sabine</i>
<i>a</i>	<i>Le coefficient acoustique moyen de surface (<math>m^2</math>)</i>
<i>V</i>	<i>Le volume de la pièce (<math>m^3</math>)</i>
<i>m</i>	<i>La constante d'atténuation du son de l'air (<math>m^{-1}</math>)</i>
<i>S</i>	<i>La surface totale de la pièce (<math>m^2</math>)</i>

# **INTRODUCTION**

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons été amenés à étudier les propriétés acoustiques de deux salles de classe de l'ENSTIB. Au cours de l'étude, nous avons décidé de tester une solution innovante "Tout bois" en fabricant des panneaux acoustiques dont l'absorbant acoustique est issu de la filière bois.

Selon l'étude de Souch San Souci<sup>1</sup>, Ingénieur acousticien, de bonnes qualités acoustiques sont essentielles dans les salles de classes dans lesquels la communication parlée représente une part importante du processus d'apprentissage. De plus dans un environnement acoustique optimisé, l'apprentissage est rendu plus aisé, approfondi et soutenu. L'acoustique d'une salle est un élément prépondérant dans l'apprentissage d'un étudiant et répond donc à une attente réelle.

La qualité de l'enseignement est également fortement influencée par l'environnement d'étude. L'enseignement en devient plus efficace et moins stressant car l'effort sur la voix peut être réduit et les échanges verbaux deviennent plus fluides, les répétitions entre l'enseignant et les élèves étant diminuées. Ceci nous montre qu'un environnement d'enseignement soigneusement conçu est à la base d'une compréhension confortable durant des périodes prolongées de concentration, mais également d'un enseignement facilité et plus aisé.

Dans notre cas d'étude les salles de classe 3N21 et 3N22 sont réputées comme étant mal conçues d'un point de vue acoustique et nous avons pu le constater nous même lors des enseignements dispensés dans ces salles. Nous nous sommes donc penchés dans le cadre de notre projet de fin d'étude sur l'amélioration acoustique de ces deux salles de classes. L'étude a donc pris en compte les données expérimentales combinées avec une simulation sur un logiciel de prédiction acoustique conforté par une étude analytique de l'acoustique de la salle, dans le but de déterminer les correctifs nécessaires à apporter.

Cette étude a été découpée en plusieurs parties. Nous avons commencé notre travail par une recherche bibliographique de manière à assimiler les notions de base et explorer les différents modes de mesures du temps de réverbération. Nous avons ensuite pris en main le logiciel Catt-Acoustic pour pouvoir par la suite faire des simulations sur les deux salles. En parallèle, nous avons fait des mesures dans les salles et nous avons effectué une étude analytique de l'acoustique de la salle à partir de la formule d'Eyring afin de consolider la

---

[1] <sup>1</sup> [1]  
[http://membres.multimania.fr/audioprovence/bibliographie/son\\_1/son\\_1.html](http://membres.multimania.fr/audioprovence/bibliographie/son_1/son_1.html)

[2] <http://www.audio-maniac.com/le-son/physique-du-son>

S. SAN SOUCI 2003 - « Situation actuelle des salles de classe en terme de qualité acoustique dans les établissements primaire, secondaire et universitaire. » Ingénieur acousticien, AIA, Décembre.

## ***INTRODUCTION***

---

simulation numérique sous Catt-Acoustic. Nous avons également fait des recherches de solutions techniques pour donner à la salle une meilleure qualité acoustique. Cette étude nous a amené à développer un panneau acoustique "Tout bois" dont l'absorbant acoustique est de la ouate de cellulose et de le qualifier dans le cadre du confort acoustique de deux salles de TD à l'ENSTIB. Nous avons également cherché à mettre au point une solution orientée vers l'utilisation de la fibre de bois comme absorbant acoustique. Nous n'avons pas les moyens techniques de qualifier acoustiquement nos panneaux "Tout bois" mais notre étude permet d'explorer la piste d'une solution d'absorbant à faible coût.

Ce rapport est une synthèse du travail fait au cours de ces mois et une explication de la démarche que nous avons mis en place.

# **- PARTIE 1 - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

Dans cette partie, nous chercherons à poser les fondements de notre démarche pour améliorer l'acoustique des salles de TD.

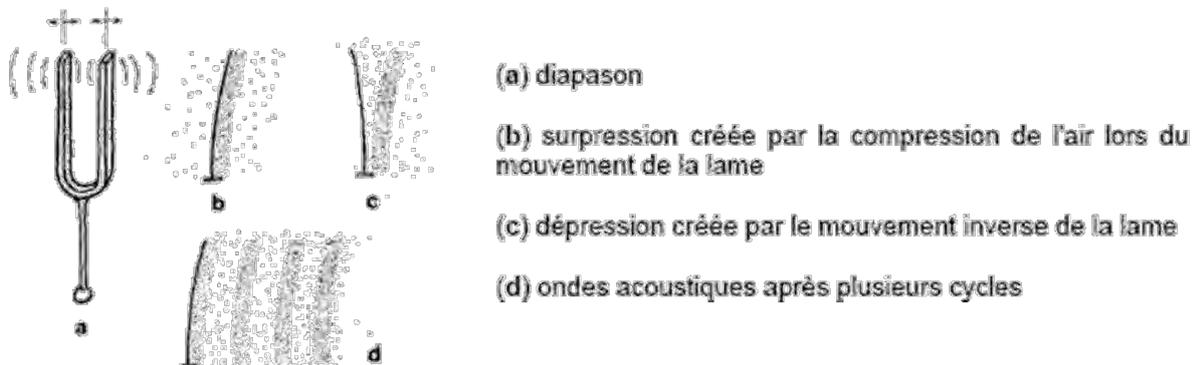
## **1. LE SON**

### **1.1. Un phénomène vibratoire**

Tout son résulte de la vibration d'un corps qui met en vibration l'air environnant, sous forme d'onde de pression et de dépression. C'est la variation de pression qui se déplace de proche en proche. L'onde acoustique est une onde de pression à l'image d'une onde à la surface de l'eau.

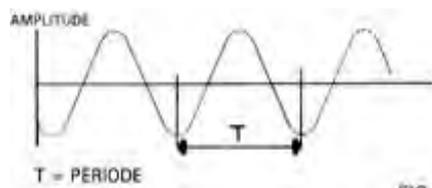
La vitesse de propagation du son dans l'air est de 340 m/s.

L'exemple du diapason illustre bien cette définition car l'onde sonore est créée par les cycles de surpressions et de dépression de l'air lors des mouvements de la lame.



*Figure 1 Le diapason*

Une onde sonore, nommé également "son" ou "son pur", est caractérisée par sa période (Figure 2) dont l'inverse donne la fréquence en Hz et par son amplitude. Une combinaison d'ondes sonores de fréquence et d'amplitude différente sera nommée bruit.



*Figure 2 Période et amplitude*

## **1.2. Les caractéristiques d'un son**

Un son est défini par 3 paramètres : son intensité, sa hauteur et son timbre. Toutes les opérations que réalisent les logiciels de traitement du son tournent autour de ces 3 caractéristiques :

- L'**intensité** d'un son correspond à l'amplitude de la vibration acoustique. En d'autres termes, elle caractérise le volume sonore qui nous permet de définir la force d'un son.
- La **hauteur** d'un son est liée à la vitesse de vibration de l'air, c'est-à-dire la fréquence. Les variations de la fréquence fondamentale permettent de situer un son sur l'échelle des graves et des aigus.
- Le **timbre** est donné par les harmoniques et les transitoires qui accompagnent la fréquence fondamentale. Il permet de différencier deux sons de même hauteur et de même amplitude. Le timbre est constitué d'un ensemble de fréquences appelé spectre. La richesse du spectre permettra de dire qu'un son est riche, brillant, profond...

## **1.3. La perception du son**

### ***1.3.1. Description***

Le fait qu'un son soit audible ou non dépend principalement de notre système auditif. Il a ses limites et il faut en tenir compte puisque le confort ou la correction acoustique sont liés à notre perception auditive. Les limites de notre ouïe sont les suivantes :

- En dessous de 20 Hz : inaudibles infrasons
- De 20 Hz à 400 Hz audible : graves
- De 400 Hz à 1600 Hz : audible : médiums
- De 1600 Hz à 20 KHz : audible aigus
- Au-dessus de 20 KHz inaudible : ultrasons.

Le son est divisé en bande d'octave afin de déterminer l'influence énergétique des différentes plages de fréquence sur l'énergie globale mesurée. La décomposition du spectre audible en bande d'octave est une division pratique de l'échelle des fréquences, identifiées par leur fréquence centrale (63, 125, 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000, 8 000 Hz). La fréquence supérieure de chaque bande est le double de la fréquence inférieure. La fréquence centrale est la racine carrée du produit des fréquences extrêmes de la bande.

- 20 à 40 Hz
- 40 à 80 Hz
- 80 à 160 Hz
- 160 à 315 Hz
- 315 à 630 Hz

## - PARTIE 1 - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

- 630 à 1250 Hz
- 1,25 à 2,5 KHz
- 2,5 à 5 KHz
- 5 à 10 KHz
- 10 à 20 KHz.

Entre notre tympan et cette source, il y a un environnement constitué principalement d'air que le son utilise comme support pour se transmettre. La sensibilité de l'oreille n'est pas linéaire car la sensation varie comme le logarithme de l'excitation. Pour doubler la sensation acoustique il faut multiplier par 10 la puissance sonore. C'est pourquoi on utilise le décibel pour définir le niveau acoustique par rapport au seuil de sensibilité.

Les courbes de Fletcher et Munson nous montrent la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence (Figure 3).

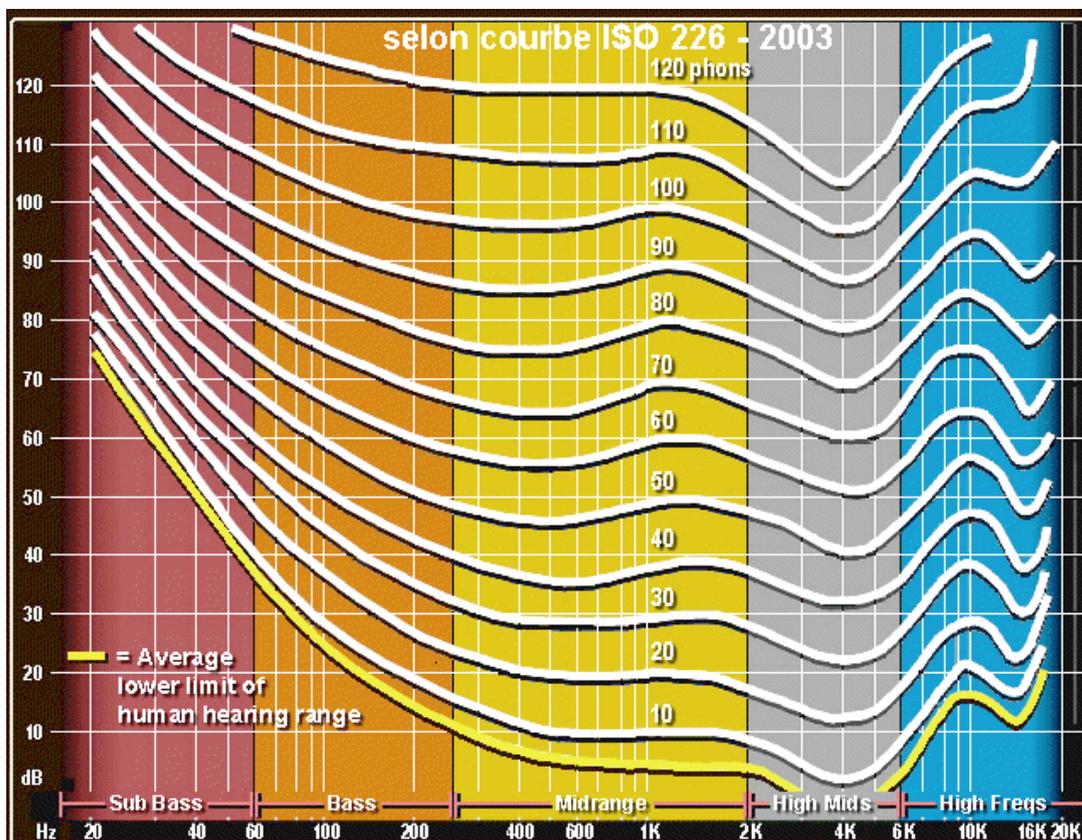


Figure 3 Courbe de Fletcher et Munson

On peut voir ici que notre oreille est plus sensible aux fréquences médiums situées entre 500 et 5000 Hz soit les fréquences émises par la parole. Elle atténue par contre énormément les basses fréquences et a tendance à amplifier les fréquences entre 1 et 6 KHz.

## **1.4. L'intelligibilité d'un son**

Le son est la sensation auditive due à une vibration acoustique. Le bruit est une superposition d'une infinité de sons possédant chacun une fréquence et une intensité propre. La décomposition en série de Fourier et ses dérivés comme la Transformée de Fourier Rapide (FFT en anglais) permet d'extraire les sons présents dans un bruit.

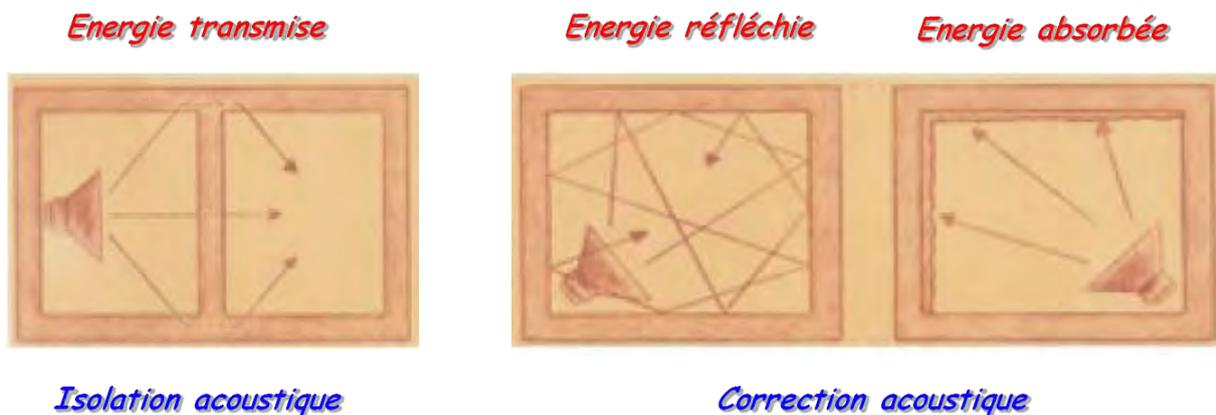
Le temps de réverbération du son ou « l'écho » résulte de la réflexion des ondes sonores sur les parois à l'intérieur d'un volume généralement fermé (salle, hall d'entrée, locaux communs, restaurant, cantines scolaires, salle de cours, salle polyvalente, etc.). Cet écho a pour origine les différents chemins, et par conséquent les temps de trajet différents, d'une onde sonore partant d'une même source pour atteindre un même point d'écoute. Il est nécessaire pour une bonne intelligibilité d'un son qu'il n'y ait pas d'écho, donc de limiter au mieux la réverbération.

Les salles dont les parois comportent des cavités absorbent l'onde donc l'énergie sonore ce qui permet d'éviter la réverbération. Cependant un environnement trop absorbant est très intelligible mais nécessite une puissance sonore plus importante de la part de l'orateur, ce qui peut induire une fatigue.

## **2. L'ABSORPTION ACOUSTIQUE**

Comme on a pu le voir précédemment il est important pour conserver un son audible et intelligible de limiter la durée de réverbération.

Lorsqu'une onde rencontre une paroi, son énergie incidente est divisée en trois parties.

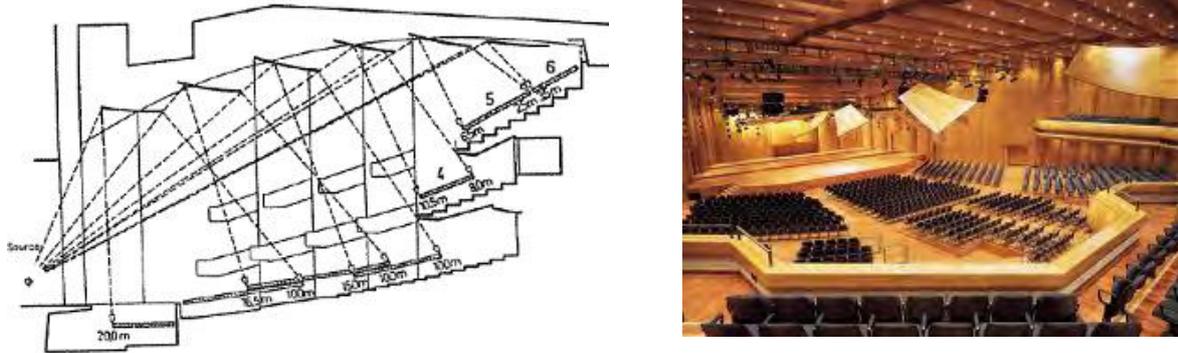


*Figure 4 Différence entre l'isolation acoustique et l'absorption acoustique*

L'absorption acoustique limite la réverbération due à la multiplicité des échos renvoyés par les parois et les objets. L'acoustique du bâtiment se divise en deux parties en fonction des buts recherchés. L'isolation acoustique par rapport aux bruits aériens doit réduire leur transmission entre l'extérieur et l'intérieur et de restreindre leur propagation d'une pièce à une

autre. Alors que la correction acoustique a pour but principal d'assurer le bon confort acoustique d'une pièce, ce qui est le but de notre étude.

La correction acoustique permet de maîtriser la propagation sonore et le temps de réverbération à l'intérieur d'une pièce, notamment par la pose de matériaux absorbants en paroi ou de matériaux réfléchissants pour mieux diriger l'onde sonore.



*Figure 5 Correction acoustique d'auditoriums*

Il est important de bien comprendre la l'utilité de l'absorption acoustique car elle est différente suivant l'utilisation de la pièce. Par exemple dans les théâtres, l'absorption acoustique doit être faible pour permettre au son de parcourir le maximum de volume. Alors que dans une salle de sport l'absorption sera élevée pour éviter que la salle soit bruyante.

### **3. LES DIFFERENTES METHODES DE MESURE DU TEMPS DE REVERBERATION**

#### **3.1. Le choix d'un indicateur de confort acoustique**

Il existe différents types de mesures qui permettent de caractériser acoustiquement une pièce.

Le but de notre étude étant d'améliorer l'acoustique de salles de TD, nous utilisons le temps de réverbération  $T_r$  comme indicateur de confort acoustique. En effet, ce temps est lié à des coefficients acoustiques nommés coefficients alpha Sabine permettant de caractériser le comportement acoustique des parois et par conséquent d'améliorer le confort acoustiques des salles de TD 3N21 et 3N22 par recouvrement de certaines parois par des panneaux absorbants.

Ce  $T_r$  s'obtient en observant la décroissance du bruit au cours du temps pour différentes fréquences. Cet indicateur est très facilement illustré dans la salle : une salle ayant un temps de réverbération élevé résonnera et une salle qui, au contraire, aura un  $T_r$  plus faible étouffera beaucoup plus le bruit.

L'intelligibilité de la parole est une autre mesure du taux de transmission de la parole (cf.1.4). Cette mesure est généralement utilisée pour étudier les propriétés de systèmes de télécommunication ou de salles. Elle peut être obtenue de trois manières différentes. On peut faire appel à des locuteurs et des auditeurs (mesures subjectives), on peut également utiliser des paramètres physiques (mesures prédictives) ou des signaux artificiels (mesures objectives).

### **3.2. Les conditions de mesures**

Plusieurs méthodes permettent de mesurer le temps de réverbération.

La méthode RASTI 11.1[4] est principalement destinée à la définition acoustique de matériaux. Cette méthode consiste à émettre deux bandes de bruit rose. La première est à 500 Hz et représente les voyelles et la seconde, à 2000 Hz, représente les consonnes. Elle a pour avantage d'être très rapide mais engendre beaucoup de contraintes de mise en œuvre<sup>2</sup>. L'environnement des mesures (humidité, température,...), les propriétés des matériaux utilisés ainsi que leur mise en œuvre au sein de lieu de mesure en laboratoire (plaque de plâtre, si elle a été collée, vissée sur des rails métalliques par exemple) sont parfaitement contrôlés.



*Figure 6 Salle réverbérante du Pôle acoustique du Centre de Transfert de Technologie du Mans*

Nous ne pouvons utiliser cette méthode dans notre étude car nous cherchons à faire de l'amélioration d'une solution acoustique existante et non de la caractérisation de solution constructive.

D'autres mesures ont été faites dans des classes [2, 3, 4]. Ce type de mesure est idéal dans des situations de rénovations, ce qui correspond à notre cas. Dans notre cas, les mesures sont faites dans une salle pleine c'est-à-dire avec le mobilier installé ce qui permet d'obtenir des conditions réalistes et dans la configuration d'utilisation la plus mauvaise.

En effet, les personnes dans une pièce absorbent des ondes acoustiques et font donc diminuer le temps de réverbération de la salle. Le temps de réverbération de la salle est

---

<sup>2</sup> Norme CEI 60268-16

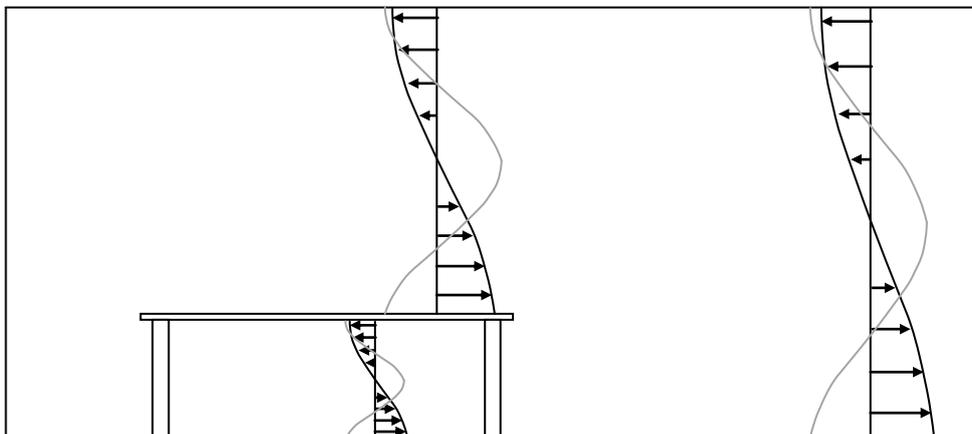
actuellement fonction du nombre de personnes dans la salle. Ceci étant, le mobilier apporte une légère absorption acoustique en comparaison avec une salle complètement vide. L'agencement du mobilier dans la salle « casse » les résonnances de celle-ci, par phénomènes d'interférences avec la hauteur des tables (cf. Figure 7). La hauteur des tables détermine la fréquence autour de laquelle les interférences commencent à apparaître (cf équation). De plus, on peut considérer que le mobilier influe sur le temps de réverbération. En effet, il « casse » les ondes. Pour les hautes fréquences, la longueur d'onde est plus petite que la longueur d'onde du premier mode propre de résonnance qui correspond à la hauteur des tables (70 cm). Pour le démontrer, on peut utiliser la formule qui lie la longueur d'onde  $\lambda$  à la fréquence  $f$  et à la célérité  $c$ .

*Équation 1*

$$f = \frac{2 \cdot c}{\lambda} = \frac{2 \times 344}{0.70} \approx 1 \text{ kHz}$$

En dessous de cette fréquence, les tables sont transparentes de manière acoustique, puisque la longueur d'onde à ces fréquences est beaucoup plus grande que la longueur associée à la hauteur des tables. A partir de cette fréquence, les tables cassent les résonnances, en répartissant l'énergie acoustique dans la salle, en induisant une légère absorption acoustique.

Si on diminue la longueur d'onde, l'onde pourra se propager sous les tables et la fréquence augmentera. Si on diminue la fréquence, la longueur d'onde augmente et les ondes ne peuvent pas se propager sous la table : seule une partie de l'onde passe sous la table, elle se propage donc difficilement.



*Figure 7 : Interférence des ondes acoustiques*

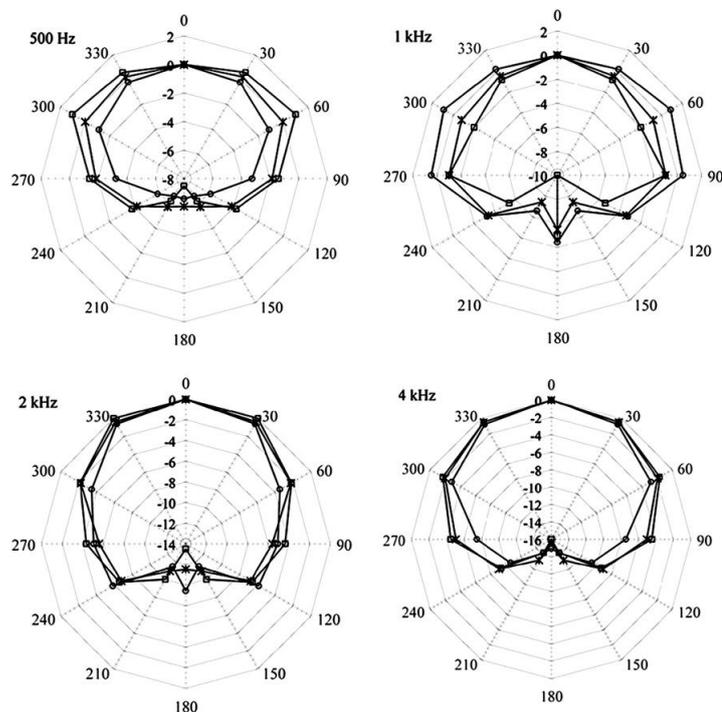
### **3.3. Le matériel et son placement**

De manière générale, l'émetteur est placé à la place du professeur, c'est-à-dire à 1m30 du sol<sup>[4]</sup>. Les récepteurs sont placés à différents endroits dans la salle de manière à avoir un échantillon de valeurs représentatives de temps de réverbération aux différentes places de la

## - PARTIE 1 - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

salle. Ne disposant que d'un seul récepteur, les mesures ont été faites en trois fois à trois endroits différents avec une orientation et un éloignement de la source différent <sup>[3,5]</sup>.

Concernant le signal émis par l'émetteur, il doit exciter toutes les bandes de fréquences de manière à pouvoir obtenir un temps de réverbération pour chaque fréquence. En faisant cela, on s'assure de pouvoir améliorer l'acoustique de la salle car le pouvoir absorbant d'une solution technique (un panneau acoustique, par exemple) dépend des fréquences d'excitation. Ainsi, le bruit rose émis avec une source omnidirectionnelle permet d'exciter les murs absorbants avec toute la gamme de fréquence dans toutes les directions. Cependant, une personne qui parle ne peut pas être comparé à une source omnidirectionnelle (*Figure 8*). Le choix d'une source omnidirectionnelle pour faire les mesures s'explique par la volonté d'émettre une onde sphérique. En effet, une onde sphérique permet de propager l'énergie sonore de la même manière dans toutes les directions.



*Figure 8 Comparaisons entre les différents niveaux relatifs sonores émis par une personne en fonction de la fréquence.*

D'autres exigences existent pour les mesures. Il faut que le matériel soit facilement déplaçable <sup>11.1</sup>[4]. Dans notre cas, il y a deux lieux de mesure : la salle de TD 3N21 et la salle de TD 3N22. Il faut donc que le matériel soit transportable facilement. De plus, nos mesures seront faites sur différents jours en fonction de l'avancée de l'amélioration acoustique ajoutée. Il faudra donc amener le matériel du bâtiment du Critt aux salles plusieurs fois et si possible sans avoir besoin de matériel spécifique.

## 4. LA METHODE CALCULATOIRE

Différentes formules existent pour calculer les temps de réverbération dans une salle en fonction de la fréquence. Ce sont des formules qui ont été obtenues de manière expérimentale. Les deux plus connues sont les formules d'Eyring et de Sabine.

L'utilisation de ces formules est limitée. En effet, pour la formule de Sabine, il faut que la pièce soit homogène c'est-à-dire que le volume doit être régulier, que les coefficients d'absorption soient plus petit que 0,1 et que le champ émis soit le plus diffus. Les salles de TD ont une géométrie simple et le champ émis dans la pièce est diffus étant donné que la source est omnidirectionnelle.

*Équation 2*

$$T = 0.161 \frac{V}{A} = 0.161 \frac{V}{Sa + 4mV}$$

Concernant la formule d'Eyring, son application nécessite aussi une géométrie simple mais peut être utilisée avec des coefficients supérieurs à 0,2.<sup>3</sup>

Étant donné que les salles de TD sont assez proches des caractéristiques d'une salle réverbérante mais que certaines parois ont des coefficients alphas Sabine supérieurs à 0.20, pour calculer les temps de réverbération, il faudra plutôt utiliser la formule d'Eyring. En effet, les coefficients sont trop élevés pour être appliqués avec la formule de Sabine.

*Équation 3*

$$T = 0.161 \frac{V}{-S \ln(1 - a) + 4mV}$$

Dans ces deux formules, on retrouve :

<i>a</i>	<i>Le coefficient acoustique moyen de surface (m<sup>2</sup>)</i>
<i>V</i>	<i>Le volume de la pièce (m<sup>3</sup>)</i>
<i>m</i>	<i>La constante d'atténuation du son de l'air (m<sup>-1</sup>)</i>
<i>S</i>	<i>La surface totale de la pièce (m<sup>2</sup>)</i>

## **5. LES RESULTATS**

Une fois les différentes mesures et les différents calculs faits, on a alors une valeur par bande de fréquences. Il faut alors en extraire un temps de réverbération moyen. Il existe pour cela différentes méthodes [2].

---

<sup>3</sup> *Mesures acoustiques en laboratoire, bâtiment et environnement, Gilles Reigner*

## - PARTIE 1 - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

La première consiste simplement à faire la moyenne de chaque temps de réverbération des bandes de fréquences comprises entre 250 Hz et 4000 Hz correspondants au spectre de la voix humaine. On a alors :

Équation 4

$$TR_{parole} = \frac{TR_{250} + TR_{500} + TR_{1000} + TR_{2000} + TR_{4000}}{5}$$

Nous utiliserons le  $TR_{parole}$  dans notre étude même si la seconde méthode d'obtention du  $Tr$  est plus rapide et utilisée en acoustique du bâtiment car elle est beaucoup moins précise.

En effet, la seconde méthode s'inspire de la formule de Sabine et du coefficient de réduction acoustique. En effet, elle « suggère un nouveau temps de réverbération » [2] :

Équation 5

$$TR_{NRC} = \frac{4}{\frac{1}{TR_{250}} + \frac{1}{TR_{500}} + \frac{1}{TR_{1000}} + \frac{1}{TR_{2000}}}$$

Le coefficient de réduction acoustique NRC est un coefficient qui permet d'obtenir plus rapidement une valeur de temps de réverbération  $TR$ . En effet, cette valeur est obtenue en faisant la moyenne des alphas Sabine des fréquences comprises entre 250 et 2000 Hz. Le  $TR_{NRC}$  est donc obtenu en s'inspirant de cette moyenne. On peut le démontrer de la manière suivante :

Équation 6

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} = \frac{\sum^f \alpha_i}{4}$$

Si on s'inspire de la formule de Sabine, on a en négligeant la constante d'atténuation de l'air :

$$TR_{NRC} = \frac{0,161.V}{S.NRC} = \frac{0,161.V.4}{S.\sum^f \alpha_i} = \frac{4}{\sum^f \frac{\alpha_i.S}{0,161.V}} = \frac{4}{\sum^f \frac{1}{TR_i}}$$

Cette valeur de temps de réverbération est pratique pour l'acoustique des bâtiments car il arrive régulièrement que les concepteurs n'aient que la valeur du coefficient NRC qui est beaucoup moins précise.

Pour comparer les résultats issus des mesures et ceux issus des méthodes calculatoires, Hodgson, Bistafa et Bradley [3] conseillent un erreur relative de 10 % ce qui illustre bien la difficulté d'estimer avec précisions les alphas Sabine de chaque matériau. En effet, la mise en œuvre des matériaux sur site influe sur leur propriétés acoustiques et une fois posée, il peut être difficile de distinguer quel a été le choix de la personne qui a construit la salle. Par exemple, une plaque de plâtre peut être collée ou bien fixée sur des rails métalliques. Dans la norme ISO 3382-1, on trouve une valeur différente de 5% pour erreur relative ce qui semble

## ***- PARTIE 1 - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE***

---

plus difficile à attendre. Étant donné que nous n'avons que très peu d'indication sur les coefficients Sabine des salles, nous chercherons à atteindre les 10% de précision sur  $TR_{\text{parole}}$ .

## - PARTIE 2 - EXPERIMENTATION ET MODELISATION

Cette partie décrit tout d'abord le protocole expérimental de notre étude et présente les avantages et inconvénient de l'outil de simulation acoustique Catt Acoustic. Nous verrons ainsi l'influence de certains paramètres sur les temps de réverbération. Nous montrerons également l'importance de leur compréhension pour améliorer l'acoustique des salles de TD.

### 1. METHODE DE MESURE ACOUSTIQUE

Les mesures acoustiques ont été effectuées avec le matériel acoustique du CRITT-Bois, soit une source acoustique omnidirectionnelle et un sonomètre. Ainsi nous avons pu effectuer avec l'aide d'Antonin Tribaleau une série de mesure dans chacune des salles.



La mise en place du système est relativement simple. En effet, seul le montage de la source sur son socle est nécessaire. Deux types de son prédéfinis, le son rose et le son blanc, sont présentés dans le paragraphe suivant.

Figure 10 Source omnidirectionnelle



Figure 9 Sonomètre

#### 1.1. Bruit blanc

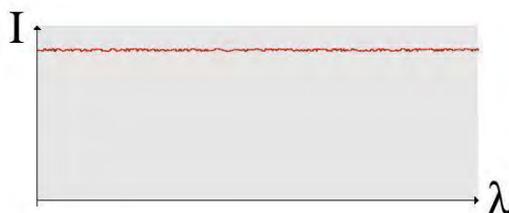


Figure 11 Représentation d'un bruit blanc (intensité en fonction de la fréquence)

Un bruit blanc est composé de l'ensemble des fréquences audibles par l'homme, 20-20kHz, et chaque fréquence possède la même densité spectrale de puissance (voir Figure 11).

L'analyse de la réponse de la salle à un bruit blanc va donc pouvoir nous donner les temps de réverbération à toutes les bandes d'octaves situées à 125, 250, 500, 1000, 2000, et 4000 Hz. Cette analyse pourra être faite en filtrant la réponse de la salle à ce bruit blanc de manière à ne garder que la bande d'octave autour de la fréquence dont on souhaite connaître le TR.

## 1.2. Bruit rose

Le bruit rose est également un signal pseudo aléatoire mais dont la densité spectrale décroît de 3dB par octave. Comme il a été vu précédemment, sa densité spectrale tend donc vers l'infini vers les basses et vers zéro pour les aigus. Ce bruit se veut plus proche de la sensibilité de l'oreille humaine que le bruit blanc, notamment par rapport à la forte atténuation des basses fréquences effectuée par l'oreille humaine. L'intérêt du bruit rose est donc d'avoir une perception linéaire à toutes les fréquences: c'est pour cela que les fréquences basses dans ce type de bruit sont plus fortes car elles sont moins bien perçues par l'oreille humaine.

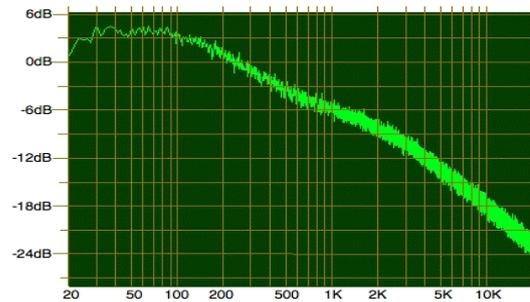


Figure 12 Intensité d'un bruit rose en fonction de la fréquence (source : <http://wongjasonh.wordpress.com/2010/03/02/pink-noise-its-out-there/>)

Nous avons retenu ce bruit rose comme source d'excitation car il nous permet d'obtenir une décroissance sur laquelle le temps de réverbération est simple à relever.

## 1.1. Mise en place



Figure 13 Mesures expérimentales

mesure. Le mobilier a été laissé.

Nous voyons sur l'image ci-contre la mise en place de la prise de mesure, avec une personne pour démarrer l'émission du bruit rose et une autre pour la prise de mesure. Nous avons ainsi pris deux à trois mesures configuration des panneaux isolants et par pièce.

Notre première mesure a été prise, comme précisé précédemment, pour optimiser notre simulation. Cette mesure a été réalisée dans une pièce vide de personnes mis à part trois personnes pour réaliser la prise de

Pour définir l'affaiblissement acoustique nécessaire et voir l'influence de panneaux acoustique commercialisés, onze panneaux nous ont été prêtés par le Critt-bois. Il s'agit de panneaux composés d'un cadre en MDF avec une ou deux parois perforées et rempli de laine de

## - PARTIE 2 - EXPERIMENTATION ET MODELISATION

roche, présentés plus en détail dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Nous avons ainsi disposé les panneaux progressivement en faisant certains choix quand à la disposition.

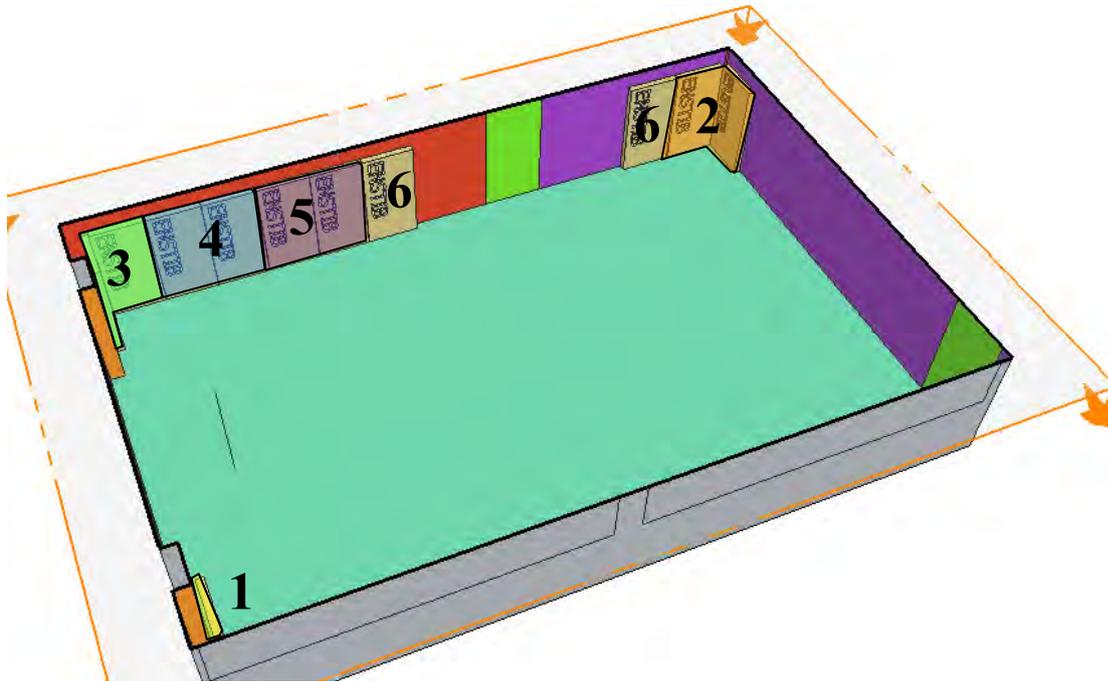


Figure 14 Disposition et ordre de placement des différents panneaux

Pour commencer un panneau a été placé dans l'angle opposé, vers la fenêtre. Ensuite les panneaux suivants ont été disposés au coin du fond de la salle. Il est intéressant de savoir qu'en acoustique il y a une accumulation d'énergie dans les angles et il s'agit de plus, de l'angle face à la source sonore.

Nous avons poursuivi par l'angle du côté du mur rouge sur l'image qui est en béton. Nous avons naturellement continué par recouvrir le béton qui a une très mauvaise absorption acoustique. Pour finir avec la cloison face aux fenêtres.

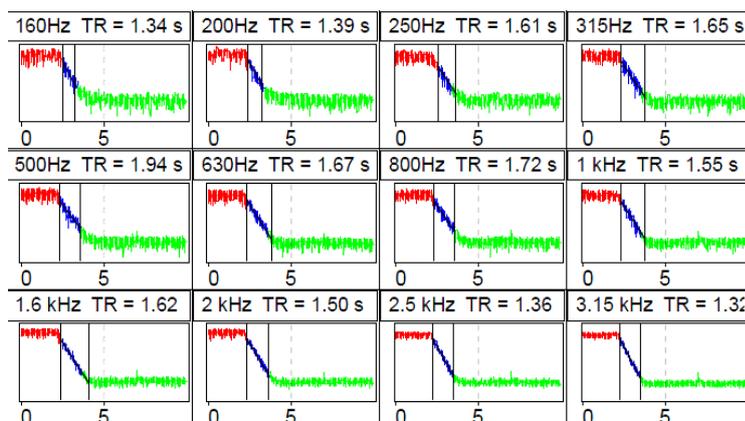


Figure 15 Courbe des temps de réverbération obtenue par l'expérimentation

d'exploiter les valeurs et corriger les courbes, pour relever les différents temps de décroissance correspondants aux temps de réverbération (TR) par fréquence.

Concernant la salle 3N22 nous avons directement disposé les 11 panneaux en privilégiant le béton et le mur du fond. Ainsi nous pourrons voir expérimentalement l'influence de ces changements (cf. - PARTIE 3 - 1).

Pour chaque disposition nous avons réalisé deux mesures. Pour chaque prise de mesure, les résultats ont été importés du sonomètre sur un ordinateur afin

Les valeurs sont fournies en tiers d'octave, il nous est donc nécessaire de faire la moyenne centré sur la fréquence recherché pour obtenir les temps de réverbération en octave.

Ces valeurs ont ensuite été prises en compte comme référence pour les simulations.

## **2. LA MODELISATION DES SALLES SOUS CATT-ACOUSTIC**

La modélisation et la simulation informatique d'un espace sonore permet de prévoir les améliorations nécessaires et leurs impact sur le confort acoustique. Les logiciels de simulation permettent de prédire rapidement et précisément des critères subjectifs et objectifs et de prendre en compte les normes acoustiques applicables au moment de la conception. Nous allons donc présenter un logiciel de prédiction, CATT, puis nous décrirons les différentes étapes suivies pour développer la bibliothèque de matériaux. Enfin, nous présenterons les résultats fournis par notre modèle.

### **2.1. Introduction au logiciel**

Nous avons réalisé la modélisation de nos tests acoustiques sous Catt-Acoustic (Computer Aided Theatre Technique) qui est un logiciel de simulation acoustique. Il permet de simuler la répartition de l'énergie sonore d'une ou plusieurs sources dans un espace donné. La salle est dessinée et les données acoustiques des matériaux des différentes parois de la salle sont renseignées par l'utilisateur tel que les coefficients d'absorption. L'utilisation de ce logiciel permet donc de calculer de nombreux paramètres tels que le temps de réverbération ou la répartition de l'énergie dans la salle. Il peut également prendre en compte plusieurs récepteurs dans la salle ce qui permet à l'utilisateur d'observer avec plus de détail la répartition sonore. Il est principalement utilisé pour les environnements complexes acoustiquement tel que les théâtres.

CATT offre deux types importants de prédictions basés sur les techniques de l'acoustique géométrique :

- Une cartographie de différentes grandeurs physiques sur l'ensemble de l'auditoire appelée « mapping » grâce à un procédé de tracés de rayons acoustiques.

## - PARTIE 2 - EXPERIMENTATION ET MODELISATION

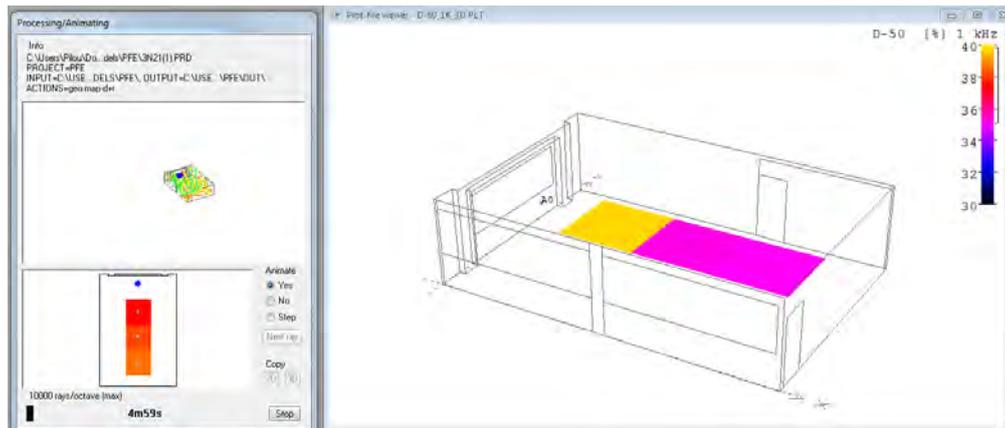


Figure 16 Interface de calcul et résultat du mapping.

On peut voir sur l'image précédente l'interface de calcul sur la technique du mapping avec une simulation des rayons partant de la source et l'énergie sonore perçue par trois zones de la pièce.

- Des calculs détaillés : Les prédictions données par ce module de calcul utilisent un procédé appelé RTC (Randomized Tail-corrected Cone-tracing) combinant à la fois les caractéristiques du tracé de cônes et de rayons ainsi que le modèle des sources images. Cette méthode de simulation numérique permet la création de réponses impulsionnelles.

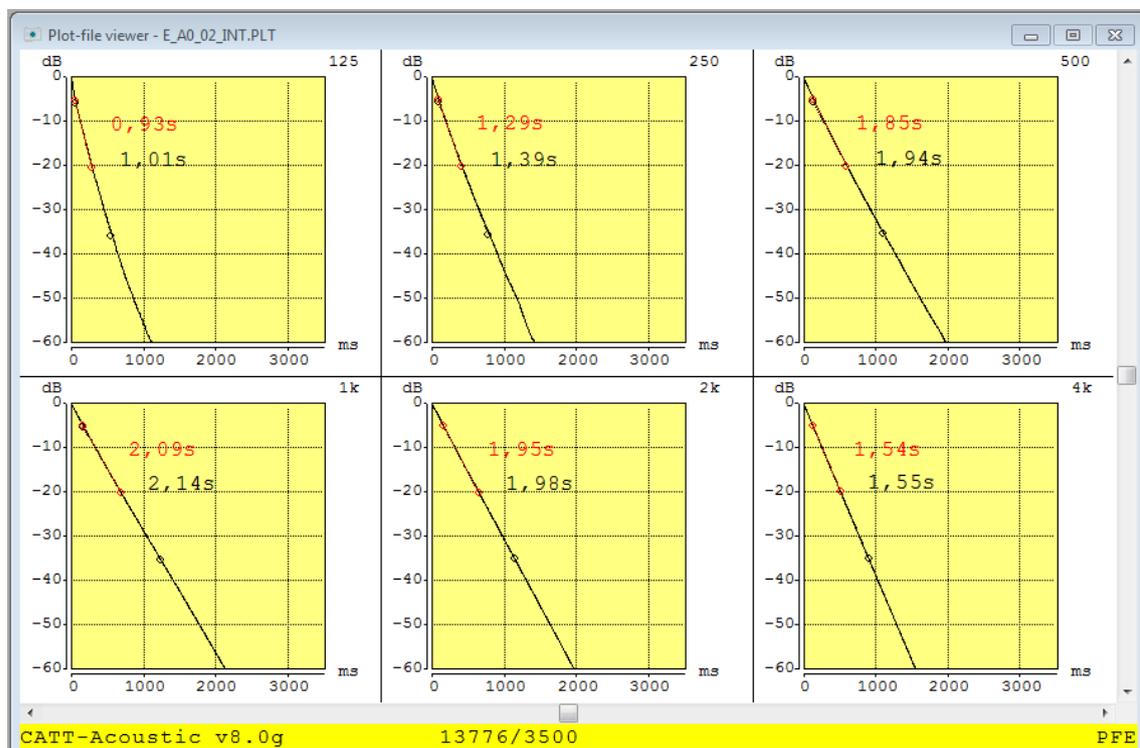


Figure 17 Résultat des calculs détaillés

Les graphiques ci-dessus montrent les temps de réverbération calculés selon différentes fréquences.

Nous avons utilisé les calculs détaillés pour notre simulation. En effet, malgré des temps de calculs de 2 à 5min, nous avons choisi ce modèle car il s'agit d'une méthode de calcul performante au regard des différentes publications que nous avons trouvé<sup>4</sup>. Nous obtenons également facilement les temps de réverbération. Il nous a donc paru logique de nous servir de ce type de prédiction acoustique.

## **2.2. Principe général de fonctionnement du logiciel**

### **2.2.1. Données d'entrées**

Les données nécessaires à la modélisation sont :

- les **caractéristiques géométriques** de la salle (les coordonnées de ses points, la définition de ses surfaces),
- les **caractéristiques des matériaux** constitutifs (les coefficients d'absorption et de diffusion des matériaux qui la compose),
- les **caractéristiques de la source** (type de sources, emplacements, orientations, directivité...),
- les données concernant les **points d'écoutes** (emplacement dans la salle)

### **2.2.2. Valeurs de sortie**

Les résultats sont pour la plupart présentés sous forme graphique mais également synthétisés dans des fichiers texte. Les principaux résultats utilisés sont :

- la **visualisation** 2D et 3D de la salle,
- les valeurs des **facteurs subjectifs** tels que le C80 ou le RASTI définies ci-dessous,
- les valeurs des **indices objectifs** (temps de réverbération Tr Sabine ou Tr Eyring)

***Clarté C80** : Facteur de Clarté. Rapport exprimé en décibels de l'énergie d'une impulsion sonore perçue à la position d'écoute pendant les 80 premières millisecondes divisée par l'énergie perçue après les 80ms. La Clarté C80 doit être comprise entre +6dB et -2dB, +4dB étant la valeur théorique idéale.*

***RASTI**: Rapid Speech Transmission Index. Indice d'évaluation de l'intelligibilité. Le RASTI est mesuré sur 2 bandes de fréquence d'une octave (500Hz et 2kHz). Il est quantifié sur une gamme décimale où un indice supérieur à 0.75 est excellent, bon entre 0.75 et 0.6, moyen entre 0,6 et 0,45, médiocre entre 0.45 et 0.3, et mauvais en dessous de 0,3*

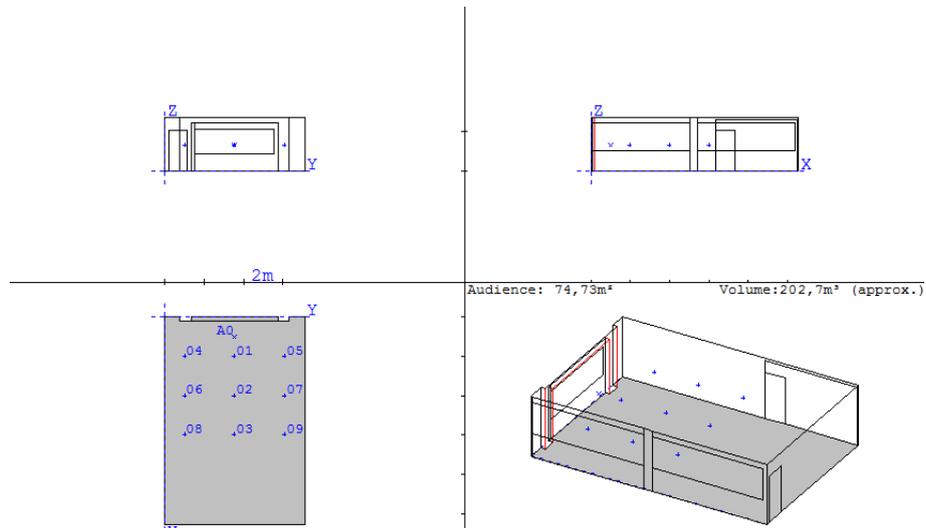
---

<sup>4</sup> "Computer modelling with Catt-Acoustic theory and practice of diffuse reflection and array modeling"  
Adrian James, Adrian James Acoustics, UK

### **2.3. Détail de la modélisation de la salle 3N21**

La modélisation dans ce logiciel nécessite de passer plusieurs étapes :

- définition de la géométrie de l'espace concerné
- définition des propriétés physiques d'absorption et de diffusion des matériaux présents
- association entre géométrie et matériaux
- définition des sources et points de réceptions.



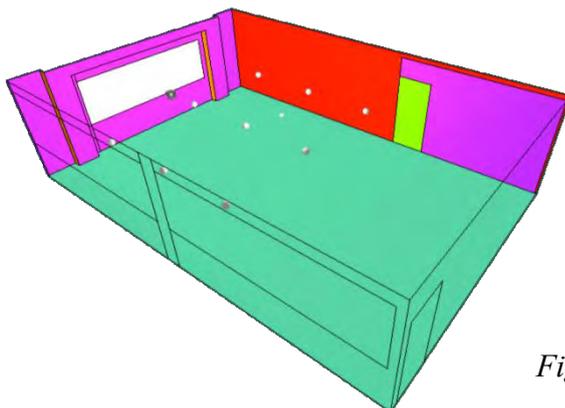
*Figure 18 Plans de la salle 3N21*

#### **2.3.1. Entrée des paramètres géométriques de la salle**

L'entrée des paramètres géométriques de la salle peut se faire de deux manières.

Il est possible de dessiner au préalable sur les salles en utilisant des logiciels tels que Sketchup ou Autocad. Nous avons dans un premier temps utilisé le logiciel d'architecture gratuit fourni par Google Sketchup qui par une extension (Sk2Geo\_1.0.9d) permet d'exporter les fichiers au format adéquat.

La seconde méthode nécessite l'écriture point par point de la géométrie de la salle. Cette méthode bien que plus laborieuse nous a permis de modifier rapidement quelques surfaces. La syntaxe est relativement simple mais demande une certaine rigueur dans le classement des coordonnées pour faciliter le regroupement des points en surface.



*Figure 19 Représentation de la salle 3N21 en 3D*

### ***2.3.2. Entrée des paramètres d'absorption et de diffusion***

Après avoir défini la géométrie de la salle, il reste à associer à cette géométrie les propriétés acoustique des matériaux présents au niveau des parois de la salle. Le logiciel intègre une banque de donnée dans laquelle les paramètres d'absorption de matériaux classiques sont entrés. Nous nous sommes donc basés sur celle-ci pour commencer notre simulation. Nous avons ensuite rapidement compris l'imprécision de ces valeurs et nous les avons corrigés à partir de tableaux de coefficients alpha Sabine trouvés dans la littérature.

En effet dans la bibliothèque relativement précise<sup>5</sup> nous avons pu trouver des coefficients variés et pour un seul matériau, le plâtre par exemple, de nombreuses combinaisons différentes de coefficients d'absorption étaient disponible. Cette multitude de choix s'explique facilement par l'influence de la mise en œuvre des matériaux au sein des solutions constructives sur l'absorption. Il est donc difficile de définir l'absorption d'une paroi sans connaître sa composition et les solutions techniques adoptées ainsi que le soin porté à la mise en œuvre de la solution constructive.

Pour pouvoir calibrer notre modèle, nous avons donc réalisé des mesures de temps de réverbération dans les salles de classes dans leur état actuel (cf. partie 2. 3.- PARTIE 1 - ). Ainsi la comparaison de ces valeurs expérimentales avec nos valeurs numériques nous a permis d'affiner les paramètres d'absorption des matériaux associés aux parois de la salle. L'expérience d'Antonin Tribaleau a été précieuse pour se rapprocher au mieux des valeurs d'essais prises comme référence. Nous aborderons cette étape d'optimisation du modèle numérique de l'acoustique des salles 3N21 et 3N22 par la mesure plus en détails dans les parties suivantes.

### ***2.3.3. Réglage de la source et des récepteurs***

La mise en place des différents points de sources et audiences se fait en paramétrant les fichiers textes correspondant. Dans le cadre de notre étude nous nous sommes orientés en rapport de la bibliographie étudiée au préalable. L'objectif étant ensuite de conforter le modèle numérique par rapport à l'étude expérimentale. Nous avons cherché à placer les points de manière cohérente avec la fonction des salles de classes et l'habitude des enseignants et étudiants.

Le logiciel nous permet de définir le nombre de sources, leurs coordonnées, et leurs caractéristiques (directivité, niveau sonore,...) et les coordonnées d'un auditeur virtuel.

---

<sup>5</sup> Tableau des valeurs de « alpha sabine » J.J. Delétré – École d'architecture de Grenoble

### **3. COMPARAISON ENTRE LES TR CALCULES ANALYTIQUEMENT ET MESURES**

En complément du logiciel nous avons pris la décision de créer une feuille Excel pour comprendre les calculs acoustiques et faciliter la mise en place des corrections. Cette démarche reste cohérente car notre cas est une salle de classe relativement simple avec une forte réverbération. Il est donc facile d'estimer par calcul analytique en utilisant une feuille Excel.

Selon les explications évoquées précédemment (- PARTIE 1 - 4) nous nous sommes donc penchés sur la **formule d'Eyring** :

*Équation 7*

$$T = 0.161 \frac{V}{-S \ln(1 - a) + 4mV}$$

Avec :

<i>a</i>	<i>Le coefficient acoustique moyen de surface (m<sup>2</sup>)</i>
<i>V</i>	<i>Le volume de la pièce (m<sup>3</sup>)</i>
<i>m</i>	<i>La constante d'atténuation du son de l'air (m<sup>-1</sup>)</i>
<i>S</i>	<i>La surface totale de la pièce (m<sup>2</sup>)</i>

Dans le premier modèle analytique de la salle, la variation de la constante d'atténuation du son de l'air (m) en fonction de l'humidité, de la température de l'air et de la fréquence des ondes avait été négligée. Le premier modèle était cependant très éloigné de la mesure. En effet les deux courbes de temps de réverbération du logiciel et d'Excel semblaient s'éloigner malgré une allure similaire. Nous avons donc pris en compte la constante d'atténuation du son dans l'air (m).

Nous avons pu évaluer cette constante à partir d'un outil de calcul fourni par un site<sup>6</sup>, prenant en compte la température de l'air, l'humidité relative et la fréquence. Nous nous sommes donc rapprochés des valeurs fournies par le logiciel. N'étant donc pas égal, nous supposons que pour le calcul Sabine Catt-Acoustic prend également en compte la répartition d'énergie sonore dans la salle.

Lors de l'analyse, certains éléments nous ont paru étranges. La comparaison entre le calcul de Catt-Acoustic et les valeurs expérimentales pour la salle 3N21 à fait apparaître des déviations de maximum 0.27s soit 18%. Pour les mêmes paramètres, notre simulation Excel basée à ce moment sur la loi de Sabine, s'avère plus juste avec seulement 0.03s d'écart soit 2% d'erreur par rapport à la mesure.

---

<sup>6</sup> <http://www.sengpielaudio.com/calculator-air.htm>

Cependant en allant plus loin dans la compréhension du fonctionnement de Catt-Acoustic nous avons découvert le module d'estimation interactive des temps de réverbération (TR). Ce module montre les valeurs des calculs analytiques selon Sabine et Eyring et permet de déterminer approximativement les résultats du calcul numérique. Nous comprenons donc qu'il y a une différence essentielle entre la méthode numérique et analytique. Le fichier d'aide nous apporte dans une note qu'Eyring et Sabine ne sont valables que pour une pièce avec une grande diversité de formes, une grande distribution des coefficients d'absorption ou salle avec beaucoup de diffusion.

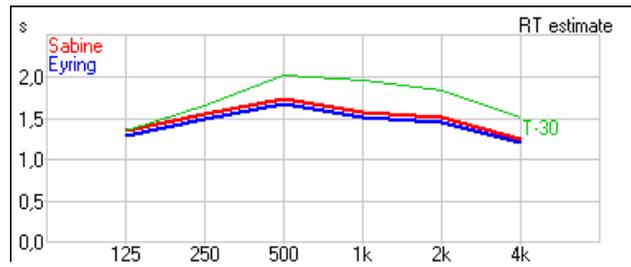


Figure 20 Graphique du module d'estimation interactive des temps de réverbération (TR)

Bien que répondant à la dernière condition, nous constatons que bien que présentant une première approche du résultat le calcul analytique par Eyring n'est pas suffisamment précis avec près de 18% d'erreur et qu'il est nécessaire d'ajuster de nouveau les propriétés acoustiques des matériaux, pour se rapprocher des valeurs expérimentales.

Notre modèle analytique n'est donc pas suffisant dans notre cas d'étude. Cependant cette méthode calculatoire s'est avérée dans certains cas indispensable face au modèle numérique. Dans les graphiques suivants nous montrerons les corrections apportées au modèle numérique et l'influence sur la méthode analytique.

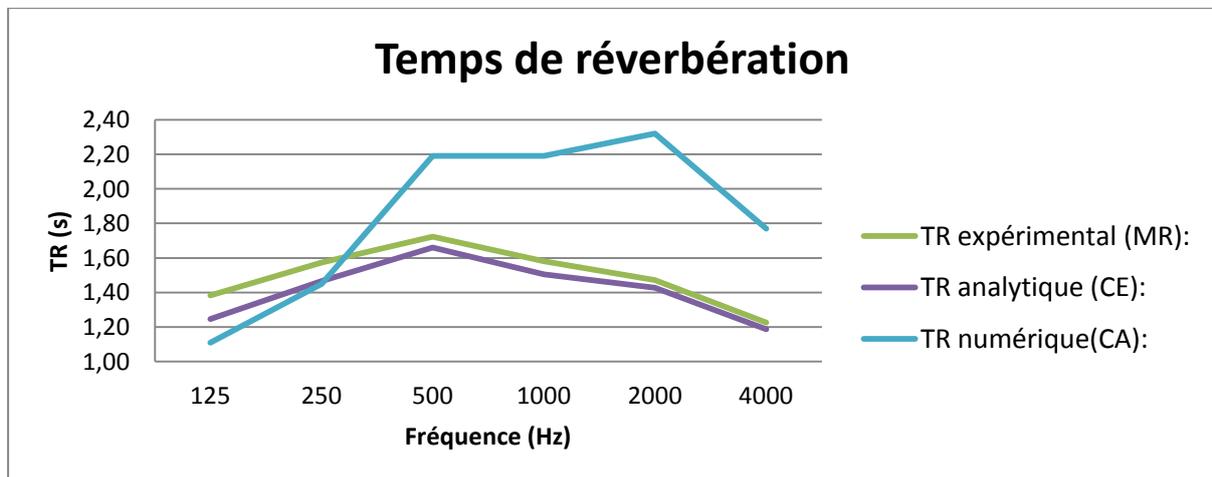
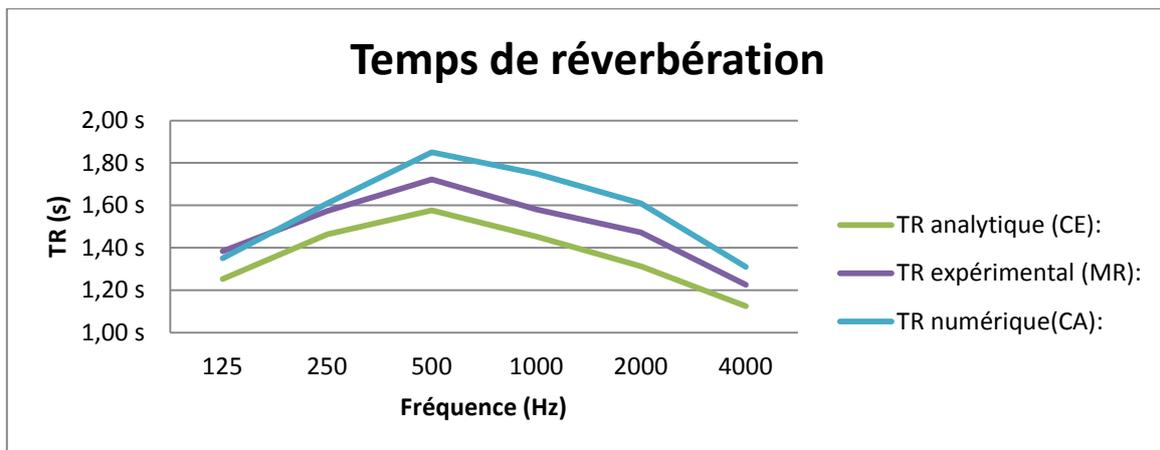


Figure 21 TR avant ajustement définitif

Ainsi en modifiant les coefficients d'absorption en se basant sur de nouveaux tableaux<sup>7</sup> nous avons pu nous rapprocher de la courbe de TR expérimentale. Les modifications nous ont

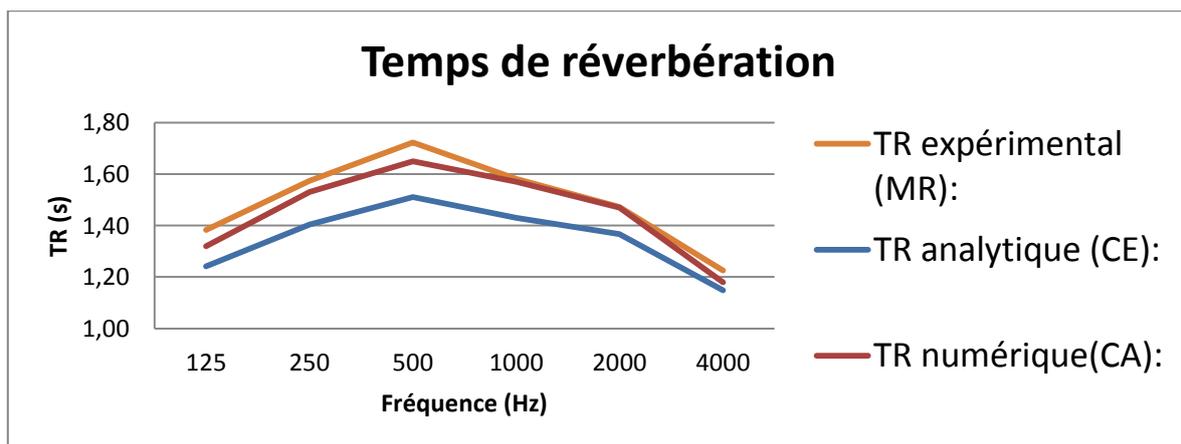
<sup>7</sup> [http://www.sae.edu/reference\\_material/pages/Coefficient%20Chart.htm](http://www.sae.edu/reference_material/pages/Coefficient%20Chart.htm)

permis de mieux comprendre la nature des parois de la salle et leur influence sur l'absorption acoustique. Nous avons donc corrigé tous les coefficients en essayant de se rapprocher de notre première analyse sensorielle et des résultats des TR expérimentaux. Nous nous sommes cependant concentrés sur les murs à base de plâtre, le plafond et le sol qui ont une grande influence et dont les paramètres dépendent fortement de leur mise en œuvre et encombrement. Les murs et cloisons sont en effet majoritairement conçus à base de plaques de plâtre, or nous ne connaissons mal la nature des solutions constructives et leur mise en œuvre. Tous ces paramètres ont une influence sur l'absorption et étant donné la grande surface de ces parois, la moindre modification des coefficients Sabine changent grandement les TR. Il en est de même pour les autres parois citées.



*Figure 22 Ajustement du TR*

Nous avons donc cherché à optimiser nos résultats, tout en sachant que la définition géométrique de la salle est imprécise sur certains points, notamment avec la présence d'un radiateur le long de la fenêtre des tables et chaises.



*Figure 23 Ajustement du TR définitif*

Le dernier ajustement nous a permis de nous rapprocher des valeurs expérimentales avec une erreur inférieure à 5%. Nous répondons ainsi aux exigences posés au début de notre étude.

Les coefficients d'absorption (alpha-Sabine) retenus pour notre modélisation sont les suivants :

## - PARTIE 2 - EXPERIMENTATION ET MODELISATION

Fréquences (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
plafond	15 (0)	14 (-1)	9 (-4)	8 (-4)	5 (-8)	3 (-10)
Sol	2 (0)	4 (+1)	8 (+2)	10 (+1)	12 (+3)	12 (+2)
Béton	1 (0)	2 (+1)	4 (+2)	6 (+4)	8 (+6)	10 (+5)
Plâtre	14 (-2)	10 (0)	9 (+4)	9 (+4)	10 (+6)	13 (+10)
Tableau	14 (+13)	10 (+9)	9 (+8)	9 (+7)	10 (+8)	13 (+11)
OSB	42 (0)	23 (+2)	15 (+5)	9 (+1)	10 (+4)	11 (+5)
Porte	30 (+16)	20 (+10)	15 (+9)	10 (+2)	7 (-3)	4 (-6)
Fenetre	4 (-1)	4 (-1)	3 (0)	3 (0)	2 (0)	2 (0)

Tableau 1

Un coefficient élevé signifie une absorption élevée et inversement. Vous pouvez également remarquer entre parenthèses les valeurs des modifications apportées depuis la première modélisation.

Nous avons également observé un rapprochement des valeurs obtenues analytiquement. Ainsi avec le module d'estimation de Catt-Acoustic, les résultats pourraient nous amener à considérer notre calcul analytique comme suffisant. Cependant dans un souci de précision nous continuerons sur le modèle numérique. Nous aurions pu en effet continuer sur notre modèle analytique, cependant il s'est avéré que les deux modèles étant fiables l'utilisation de deux méthodes de calculs nuisait à notre avancement.

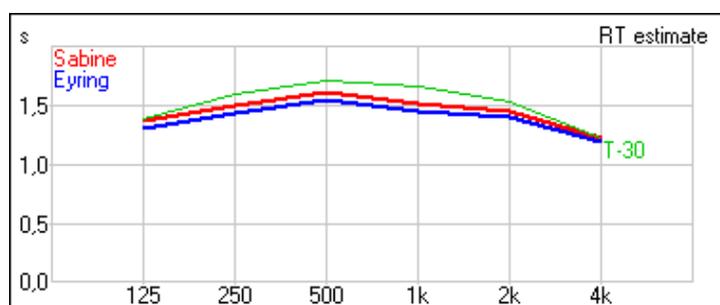


Figure 24 Graphique du module d'estimation interactive des TR après modification.

Comme affiché sur la courbe, nous obtenons des temps de réverbération de l'ordre de 1.7s ce qui est important. Ce temps est borné par la norme ANSI S12.60 qui définit : « Le Temps de Réverbération optimal d'une salle de classe vide de 140 à 250 m<sup>3</sup> se situe entre 0.5 et 0.8 s ». Ce TR demandé est assez court pour apporter une bonne intelligibilité et pour créer un espace calme et assez long pour faciliter la communication. » Nous nous situons donc à pratiquement à 1s du temps de réverbération maximal réglementaire.

Cependant avec l'obtention des résultats pour les essais avec des panneaux commerciaux nous avons pu affiner encore les coefficients d'absorption des parois. Ainsi nous avons adapté notre modèle en découpant les faces afin de correspondre au mieux à la disposition

## - PARTIE 2 - EXPERIMENTATION ET MODELISATION

expérimentale et nous avons défini 2 types de surface en plâtre. Le premier type étant les cloisons et le second les parements en plâtre du côté des murs extérieurs.

L'étape suivante a consisté à déterminer les coefficients d'absorption des panneaux acoustiques testés. Cette étape a permis de déceler certaines erreurs. Les coefficients d'absorption choisis au départ pour le plâtre ont du être réajustés. Nous avons pu ainsi affiner encore notre modèle.

Nous obtenons ainsi les coefficients d'absorption suivants :

Fréquences	125	250	500	1000	2000	4000
Plâtre	14 (0)	9 (-1)	10(+1)	11 (+1)	13(+3)	14(+1)
Cloison	11	8	5	6	7	9
Panneau	50	62	64	72	62	50

Tableau 2 Coefficients d'absorptions des matériaux rajoutés

Ces nouveaux coefficients nous donnent les temps de réverbération avec une erreur inférieure à 5% par rapport aux résultats expérimentaux. Cependant pour le cas avec 5 et 7 panneaux nous dépassons cette marge à 125Hz. Nous pouvons néanmoins noter l'incohérence de la valeur expérimentale du TR à 125Hz pour les 5 panneaux par rapport aux autres séries de mesures. Cette incohérence vient probablement des deux mesures qui présentent des différences importantes. Ces différences ce sont présentées plusieurs fois aux cours des séries de mesure et nous les interprétons comme provenant de la directivité de la mesure avec le sonomètre. Nous avons cependant

Nous obtenons donc les valeurs suivantes :

		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
3N21 1 plaque	Expérimental	1,34 s	1,46 s	1,71 s	1,52 s	1,47 s	1,26 s
	Numérique	1,36 s	1,50 s	1,65 s	1,50 s	1,41 s	1,20 s
	Erreur	2%	3%	-4%	-2%	-4%	-5%
3N21 3 plaques	Expérimental	1,31 s	1,35 s	1,54 s	1,41 s	1,34 s	1,17 s
	Numérique	1,26 s	1,37 s	1,49 s	1,36 s	1,30 s	1,14 s
	Erreur	-4%	2%	-3%	-3%	-3%	-2%
3N21 5 plaques	Expérimental	1,36 s	1,27 s	1,33 s	1,25 s	1,21 s	1,08 s
	Numérique	1,21 s	1,29 s	1,38 s	1,27 s	1,22 s	1,10 s
	Erreur	-12%	2%	4%	1%	1%	2%
3N21 7 plaques	Expérimental	1,20 s	1,23 s	1,32 s	1,15 s	1,18 s	1,04 s
	Numérique	1,13 s	1,18 s	1,27 s	1,17 s	1,13 s	1,05 s
	Erreur	-6%	-4%	-4%	2%	-5%	1%
3N21 9 plaques	Expérimental	1,03 s	1,09 s	1,15 s	1,03 s	1,02 s	0,96 s
	Numérique	1,06 s	1,09 s	1,15 s	1,05 s	1,05 s	0,99 s
	Erreur	3%	0%	0%	2%	3%	3%
3N21 11 plaques	Expérimental	1,00 s	1,04 s	1,07 s	0,94 s	0,96 s	0,91 s
	Numérique	1,02 s	1,02 s	1,07 s	0,98 s	0,99 s	0,95 s
	Erreur	2%	-2%	0%	4%	4%	5%
3N21 vide	Expérimental	1,38 s	1,57 s	1,72 s	1,58 s	1,47 s	1,23 s
	Numérique	1,39 s	1,57 s	1,73 s	1,59 s	1,46 s	1,23 s
	Erreur	0%	0%	0%	1%	-1%	0%

Tableau 3 Tableau comparatif des temps de réverbération pour nos essais avec les panneaux acoustique du commerce.

## ***- PARTIE 2 - EXPERIMENTATION ET MODELISATION***

---

Nous observons que les panneaux améliorent considérablement l'acoustique de la salle. Avec 16m<sup>2</sup> de panneaux, possédant les coefficients d'absorption acoustique rassemblés dans le Tableau 2, nous réduisons le temps de réverbération à 1s, soit près de 0,7s de gain.

Nous avons donc un modèle qui, malgré certaines incertitudes, est correct. Cependant les simulations numériques ne sont que des aides à la conception d'amélioration acoustique. Nous sommes partis de cas simples, des salles de classes parallélépipédiques, mais il est difficile de reproduire la réalité. Bien qu'ayant affiné notre modèle, le radiateur, les menuiseries métalliques ou encore l'effet des tables contre les murs sur l'absorption acoustique n'ont pas été pris en compte. Notre présence et nos positions dans la salle sont également des sources d'erreurs pour la précision de notre modèle. Nous avons donc cherché à obtenir une image proche de la réalité et cohérente en prenant en compte 5% d'erreur et en cherchant à comprendre les propriétés acoustiques.

Les résultats ont ensuite été analysés plus efficacement dans la partie - PARTIE 3 - 1 pour déterminer la configuration acoustique de la salle et les éléments correctifs à apporter. Ce modèle numérique a également été utilisé pour simuler la quantité de panneaux nécessaire pour une amélioration sensible du confort acoustique de ces salles de cours.

# **- PARTIE 3 - ANALYSE ET CORRECTION ACOUSTIQUE**

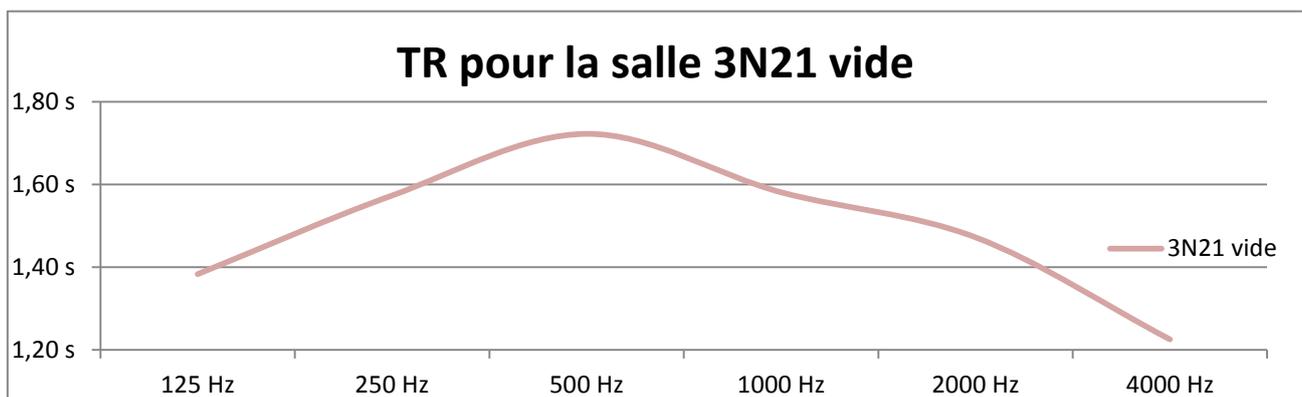
Suite à l'analyse des premiers résultats, nous avons étudié différentes solutions techniques répondant aux exigences des salles.

## **1. ANALYSE DE L'ACOUSTIQUE DES SALLES DE TD**

Les salles de TD sont, comme nous l'avons abordé précédemment, très réverbérantes avec un temps de réverbération de 1.72s tandis que le confort acoustique d'une salle de classe est situé entre 0.4 et 0.8s. Nous avons donc à réduire les surfaces réverbérantes pour réduire de 0.9s le TR actuel.

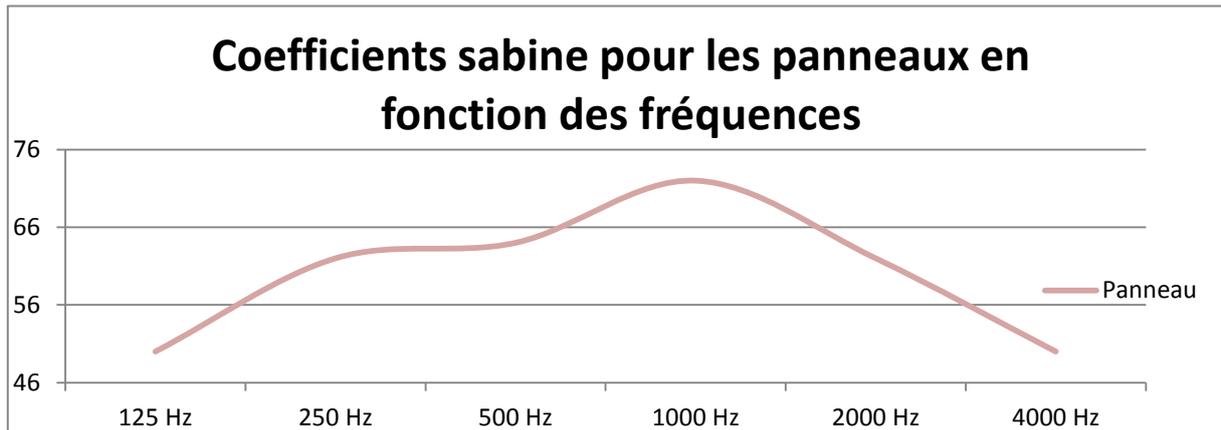
Les parois des salles sont composées de plaques de plâtres, de béton, de verre, de linoléum, d'éléments métalliques et d'OSB. Parmi tous ces matériaux la plupart sont réverbérants, le béton et le verre étant les pires. Ne pouvant pas apporter de solutions fixes au plafond, au sol et naturellement aux fenêtres il nous reste trois parois. Le mur, côté tableau étant considérablement réduit par le tableau et la présence du caisson, seules les parois les cloisons en plâtre du fond de la salle et le mur en béton peuvent permettre de réduire le TR.

Nous obtenons la courbe des TR en fonction de la fréquence suivante pour la 3N21 vide :



*Figure 25 Temps de réverbération de la salle 3N21 vide*

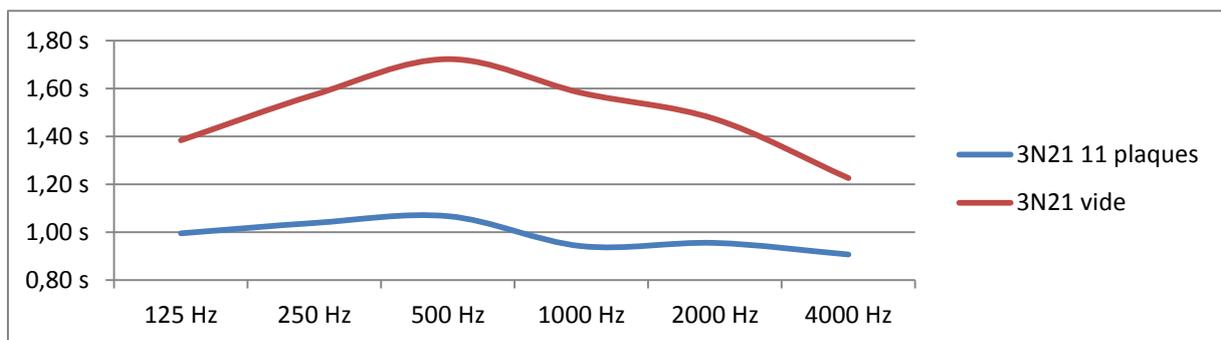
On voit donc clairement la présence d'un pic à 500Hz, ce qui signifie que les matériaux sont peu absorbants à cette fréquence. Il est essentiel d'agir avec des matériaux ayant une courbe des coefficients d'absorption similaires à cette courbe des temps de réverbération.



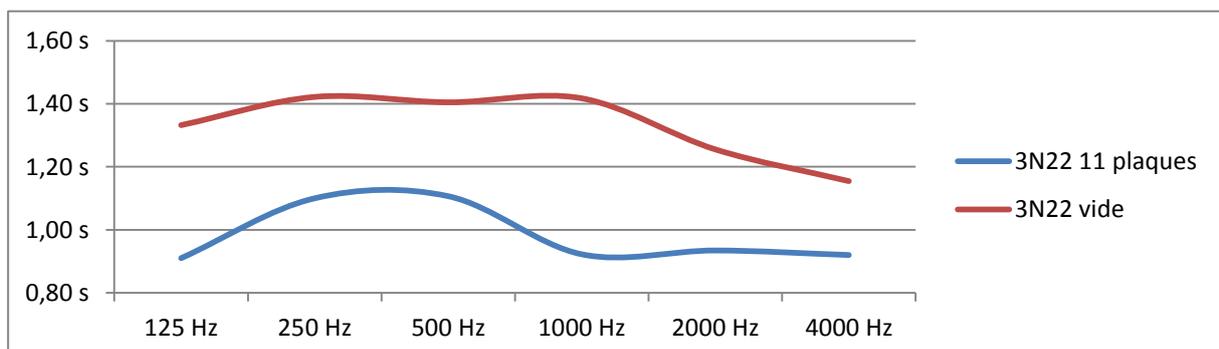
*Figure 26 Propriété acoustique du panneau du commerce*

Les panneaux que nous avons testés ont d’après notre modèle une courbe de coefficients d’absorption proche de celle que vous pouvez observer ci-dessus. Nous observons donc un pic à 1 kHz et un niveau relativement haut à 500 Hz. Nous nous retrouvons donc avec un produit correspondant à peu près à ce que nous souhaitons.

La présence de ces panneaux influe de manière importante sur le temps de réverbération. Ainsi avec 11 panneaux nous réduisons ce temps de 0.7s. Ce gain est correct mais encore insuffisant pour répondre aux normes, qui fixent le seuil de confort pour le temps de réverbération à 0.8s maximum. Il est également intéressant de nous intéresser aux différences entre les deux salles de classes. En effet, notre étude portant sur ces deux salles et nous étant concentré sur l’une d’entre elles, le comparatif nous permettra de voir s’il est possible de réutiliser le diagnostic de la 3N21 pour la 3N22.



*Figure 27 Temps de réverbération pour la salle 3N21*



*Figure 28 Temps de réverbération pour la salle 3N22*

### - PARTIE 3 - ANALYSE ET CORRECTION ACOUSTIQUE

On peut observer que les deux salles ont un comportement légèrement différent. La plus grande différence est visible au niveau de 500 Hz. A cette bande de fréquence, dans la salle de TD 3N21, on observe une augmentation significative alors qu'en salle 3N21, on a au contraire une légère diminution du temps de réverbération. De manière général, la salle 3N22 a un temps de réverbération inférieur à celui de la salle 3N21. Il est cependant nécessaire de souligner la grande différence entre les TR moyens des salles actuelles et ceux autorisés. En effet, on peut voir que le TR moyen de la salle 3N21 est de 1,49 s et celui de la salle 3N22 est de 1,33 s. Ces valeurs sont largement supérieures aux valeurs autorisées (- PARTIE 2 - 3) ce qui ne favorise pas l'assimilation du cours par les élèves et sa compréhension sachant que ces salles accueillent des TD qui ont pour rôle d'approfondir la compréhension du cours.

Lors des essais, nous avons cherché à tester différentes configurations. En 3N21, nous avons cherché à recouvrir les surfaces ayant les coefficients d'absorption les plus grands, c'est-à-dire les murs en béton et les angles où l'accumulation d'énergie est la plus importante. Dans la salle 3N21, nous avons cherché à recouvrir d'avantage le mur du fond qui reçoit énormément d'ondes du fait que le professeur parle dans sa direction. En comparant les différents résultats, on s'aperçoit que la configuration de la 3N21 a tendance à homogénéiser les valeurs. On peut donc en déduire qu'il faut plutôt recouvrir les murs en béton et les murs au niveau des coins.

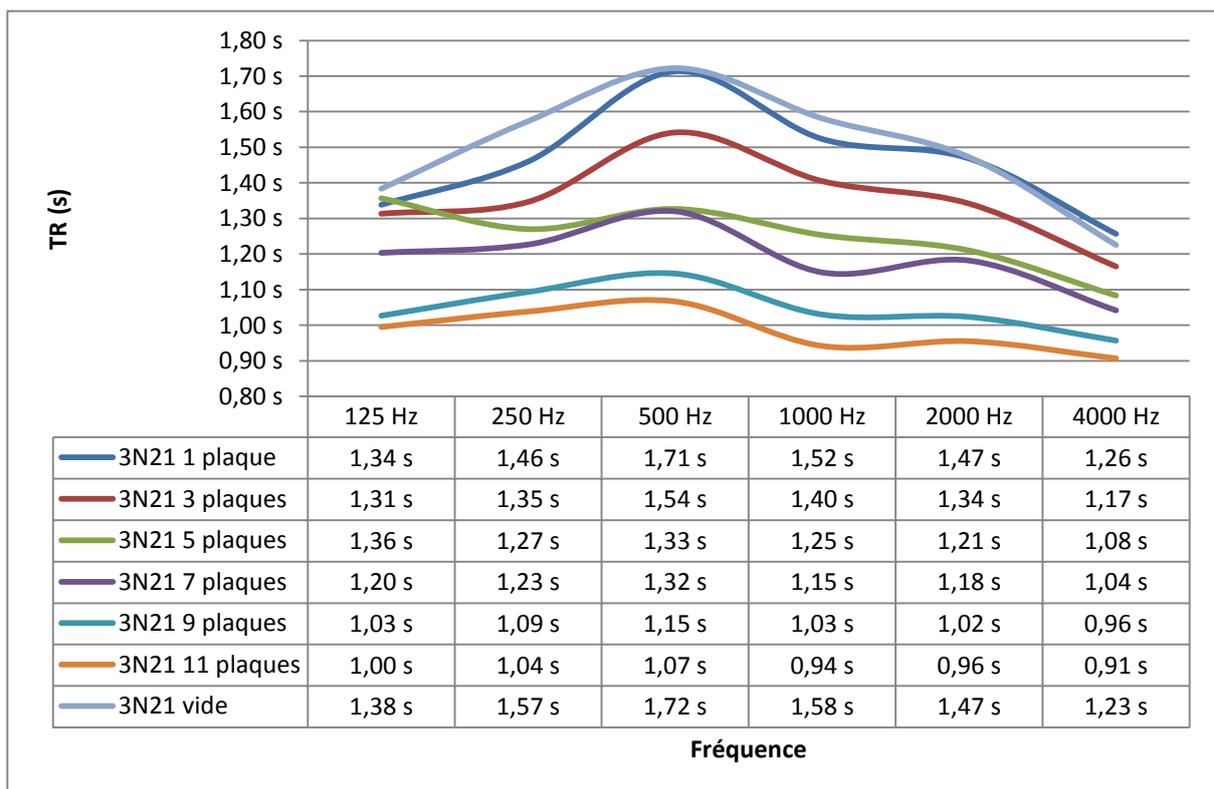
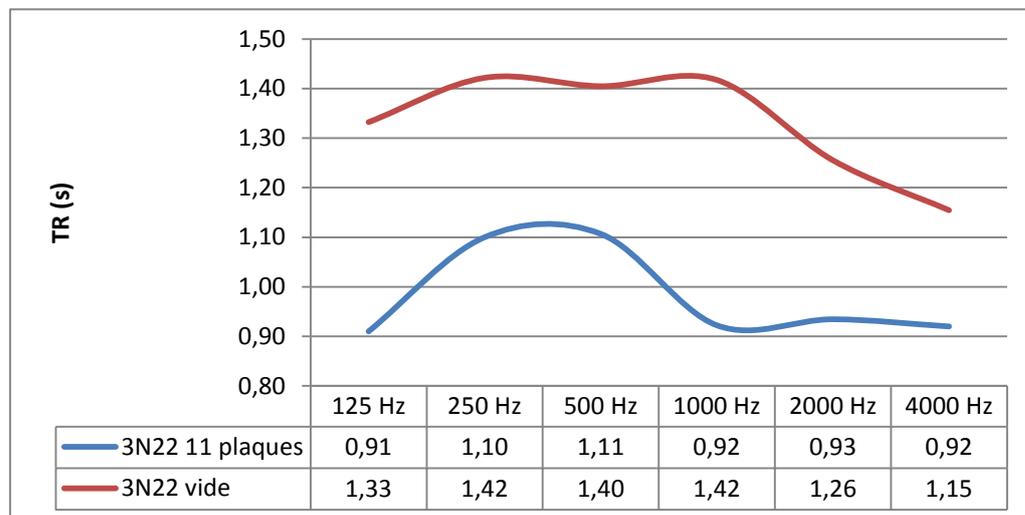


Figure 29 Évolution du temps de réverbération avec le nombre de panneaux ajoutés (3N31)

Avec le graphique ci-dessus, on peut aisément voir l'influence du nombre de panneau acoustique et donc de la surface recouverte. Au fur et à mesure, la courbe s'aplanit. On peut dire que la mesure faite avec cinq panneaux est sans doute quelque peu erronée pour certaines bandes de fréquence car elle se distingue des autres sans aucune raison apparente, comme

nous avons pu l'évoquer lors du calibrage de notre modèle numérique. Le nombre de module dans cette configuration non seulement fait diminuer le temps de réverbération mais il permet de diminuer l'écart entre les différentes bandes de fréquence. Grâce à ces simulations, on peut voir que nous ne pouvons pas prévoir facilement ce besoin en faisant une régression linéaire.



*Figure 30 Évolution du temps de réverbération avec le nombre de panneaux ajoutés (3N32)*

Nous pouvons voir ci-dessus que la configuration choisie pour la 3N22 est moins efficace que pour l'autre salle. Le choix des parois à recouvrir est donc primordial et change les performances finales.

Grâce au calcul numérique, on peut estimer le besoin en panneau à 21 unités pour pouvoir avoir un TR inférieur à celui qui est autorisé. En cherchant à être tout juste sous la limite, on s'assure d'être constamment dans l'intervalle de tolérance. En effet, la présence de personne fait diminuer le temps de réverbération. En étant sous la limite maximum, on est sûr d'être sûr d'être dans l'intervalle quelque soit le nombre de personnes présentes dans la salle.

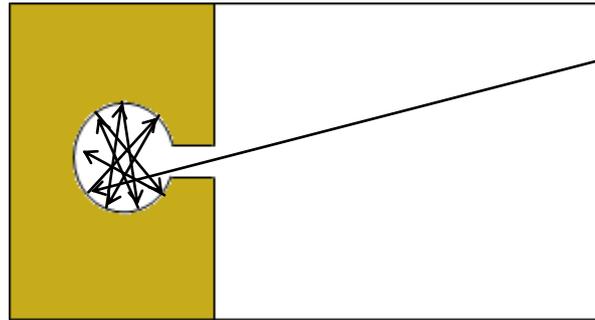
## **2. LES DIFFÉRENTES SOLUTIONS TECHNIQUES**

### **2.1. Les matériaux acoustiques**

Il existe différents types de solutions techniques permettant de diminuer le temps de réverbération. De manière générale, ce sont des matériaux qui absorbent certaines fréquences sonores. Chaque matériau a une absorption différente ce qui permet de le choisir en fonction des temps de réverbération de la pièce où l'on souhaite l'installer. Ainsi, il est possible de dire que le temps de réverbération moyen est utile pour avoir un aspect global de la qualité acoustique de la salle et que les temps de réverbération par bande de fréquence ( $TR_{125}$ ,  $TR_{250}$ ,  $TR_{500}$ ,  $TR_{1000}$ ,  $TR_{2000}$  et  $TR_{4000}$ ) sont utiles pour choisir la correction. En effet, il faudra que le panneau acoustique ait un coefficient alpha Sabine plus élevé dans les fréquences où le temps de réverbération est plus élevé et plus faible dans les fréquences où il est plus faible car il faut

que chaque valeur des TR soit dans un intervalle de valeur définie par la norme ANSI S12.60 en fonction de l'usage de la salle.

Pour faire diminuer un temps de réverbération, il faut que le matériau ait des pores ouverts. Par exemple, un panneau perforé absorbera mais une mousse à pores fermés n'absorbera pas. En effet, les ondes sont piégées dans les pores et se réfléchissent à l'intérieur. Avec le temps, le niveau sonore décroît. Le temps de réverbération est le temps pendant lequel le niveau sonore diminue. Si l'onde est piégée, elle ne décroît plus dans la pièce mais dans le matériau.



*Figure 31 Piégeage d'une onde sonore dans un pore ouvert*

## **2.2. Quelques exemples de solutions techniques compatibles**

Pour cette étude, différents caractères ont été utilisés pour comparer les produits entre eux. Il a été choisi de prendre en compte son comportement au feu. En effet, les panneaux seront placés dans une salle située dans un lieu public. Il y a également les dimensions et le mode d'utilisation (mur, plafond, modules de séparation d'espaces) qui influent sur le lieu d'installation.

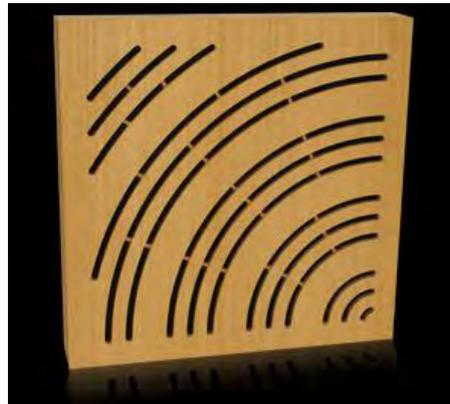
On peut également voir des graphiques. Ces graphiques représentent la valeur du coefficient d'absorption alpha Sabine en fonction de la fréquence. Plus une valeur pour une fréquence donnée est élevée, plus le matériau aura tendance à absorber les ondes sonores de cette fréquence et donc plus le temps de réverbération TR aura tendance à diminuer dans la pièce à cette même fréquence. Ainsi, pour choisir une solution technique répondant au besoin de la salle, on doit choisir un matériau capable d'absorber les fréquences où le TR est le plus élevé.

Concernant la surface, elle a été obtenue grâce à la méthode analytique expliquée précédemment. On a remplacé dans le calcul certaines surfaces de la pièce par des surfaces ayant les mêmes propriétés que les différentes solutions techniques. Nous avons favorisé le mur du fond et le mur du côté [3].

Vous pouvez voir ci-dessous les images des différents produits comparés dans le tableau p.35.



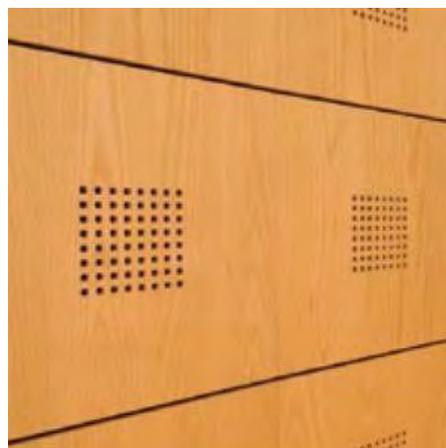
*Figure 33 Add-Morse*



*Figure 32 Add-Saturn*



*Figure 34 LFM  
Bamboo*



*Figure 35 Obersound*

**- PARTIE 3 - ANALYSE ET CORRECTION ACOUSTIQUE**

Produit	Marque	Description	Comportement au feu	Utilisation	Dim.	Absorption	Surface	Prix
<b>Add Morse</b>	<i>Correction Acoustique</i>	-Panneau utilisant 80% de matériaux recyclés -100% recyclable -3 matériaux absorbants	M2	Utilisation continue ou modulaire	L:600 l:600 e:100		25 m <sup>2</sup>	9 600 €
<b>Add Saturn</b>	<i>Correction Acoustique</i>	-Panneau utilisant 80% de matériaux recyclés -100% recyclable -3 matériaux absorbants	M2	Utilisation continue ou modulaire	L:1200 l:600 e:100		18 m <sup>2</sup>	6 900 €
<b>LFM Bamboo</b>	<i>Correction Acoustique</i>	- conçu pour des lieux où la voix est essentielle - matières premières absorbantes : matériaux recyclés ou fibres naturelles	M2	Mur ou plafond	L:1200 l:600 e:100		18 m <sup>2</sup>	5 000 €
<b>Obersound</b>	<i>Oberflex</i>	- panneau de particule (Ep : 10, 12, 16, 19, 22 mm) ou MDF (Ep : 16, 19 mm) - panneau bois finition contrebalancé - perforations : (entraxe/trou) 16/8 20/8 32/8	- Panneau de particule standard ignifugé - MDF Standard ou M1	Murs ou plafond	L:3040 ou 2500 l:1230	Perf16/8  Perf20/8  Perf32/8	Ne convient pas (variation supérieure à l'intervalle 0,4-0,8 s dans le TR)	

### **2.3. Conclusion de cette étude**

Suite à cette étude, il est possible de voir qu'apporter une correction acoustique entraîne obligatoirement une dépense très importante. De plus, la majorité des produits utilisant des isolants ne sont pas inscrits dans une démarche écologique et durable. En effet, pour la plupart, ils utilisent de la laine de roche.

Au cours de notre recherche, nous avons pu voir qu'il existe des produits qui peuvent être utilisés en tant que matériaux absorbants et qui sont plus durables. Nous avons donc décidé de tester un de ces matériaux, la ouate de cellulose, en la mettant en œuvre en l'alliant à un panneau MDF. Ainsi, nous pourrions essayer de caractériser ce produit et voir s'il convient aux exigences de la salle.

## **3. CREATION DE PANNEAUX ACOUSTIQUES**

### **3.1. Les normes de résistance au feu**

Pour la conception des panneaux acoustiques il est nécessaire de prendre certaines règles de sécurité contre l'incendie.

Ce type de panneau doit répondre aux exigences de l'article AM 8 (arrêté du 6 octobre 2004) et à l'article AM 14-(Arrêté du 24 septembre 2009) :

§1 Les produits d'isolation acoustique, thermique ou autre, simples ou composites, dont l'épaisseur d'isolant est supérieur à 5mm (10mm en sol), doivent respecter l'une des dispositions suivantes :

- a) Être classé au moins :

A2-s2, d0 en paroi verticale, en plafond ou en toiture ;

Lorsque les produits concernés ne sont pas encore marqués CE, le classement M0 peut également attester de la performance requise ;

(Arrêté du 4 juillet 2007) « Lorsque des produits combustibles, connexes aux isolants incorporés aux parois, sont associés en usine ou sur chantier aux isolants précipités, l'ensemble composite obtenu est réputé répondre aux objectifs de sécurité du présent article et du guide d'emploi des isolants combustibles dans les établissements recevant du public à condition que les produits combustibles rapportés ne soient pas en contact avec l'air ambiant. »

(Arrêté du 26 juin 2008) « Les revêtements absorbants acoustiques dont la résistance thermique est inférieure à  $0.5\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  ou dont la conductivité thermique est supérieure à  $0.065\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$  ne sont pas assujettis aux dispositions du présent article. »

- b) Être protégés par un écran thermique disposé sur la ou les faces susceptibles d'être exposées à un feu intérieur au bâtiment.

Cet écran doit jouer son rôle protecteur, vis-à-vis de l'action du programme thermique normalisé, durant au moins :

¼ heure pour les parois verticales et les sols ;

½ heure pour les autres parois.

Le « guide d'emploi des isolants combustibles dans les établissements recevant du public » précise les conditions de mise en œuvre de tels écrans.

§2 Les produits d'isolation ne répondant pas aux dispositions du paragraphe 1 ci-dessus ne peuvent être mis en œuvre qu'après avis favorable de la Commission centrale de sécurité. Les modalités d'application de la présente disposition sont fixées dans la troisième partie du guide précité.

Il est donc intéressant pour nous de se pencher sur le classement des différents produits nécessaires :

- L'isolant
  - La **ouate de cellulose** est classée **C-s2, d0** selon la norme de comportement au feu NF EN 13501-1.

Le produit isolant envisagé ne répond donc pas à cette norme, cependant le produit est en cours de validation pour la classe de résistance au feu supérieure. Nous continuerons donc avec ce produit. Il présente en effet certaines propriétés physiques intéressantes pour l'acoustique. Les ondes des sons aériens sont freinées par la texture élastique et fibreuse de l'isolant et transformées en forces de frottement<sup>8</sup>.

Nous avons également hésité avec les produits suivants :

- Le mélange de vermiculite et de perlite

Ces deux matériaux sont classés M0 (ou A0 d'après la norme européenne). Ils sont d'origine volcaniques et sont donc poreux ce qui leur donne de très bonnes propriétés acoustiques. Cependant, sa densité élevée entrainerait une augmentation importante du module. Ce dernier pèserait plus de 40 kg avec un mélange de vermiculite et de perlite. Cependant dans un souci d'économie nous avons opté pour la ouate de cellulose

---

<sup>8</sup> <http://www.nrgaia.eu/ouate-de-cellulose-isolation.htm>

Il est également nécessaire que l'enveloppe que l'on prévoit respecte certaines règles. Ce type de module n'étant pas standard. Il peut être considéré comme cloison coulissante ou repliable, or les matériaux doivent être de catégorie M3. (Article AM 14- Arrêté du 24 septembre 2009).

- La structure
  - **Medium standard** est un panneau de fibres de bois de moyenne densité (MDF) possédant un classement en réaction au feu Euroclasse M3
  - **Isorel** : très mauvais. Son comportement au feu peut être amélioré grâce à l'utilisation d'une peinture ignifugée intumescente. Ces finitions, lors d'un incendie, gonflent et forment une mousse étanche au feu et aux fumées.

On comprend donc qu'il est relativement difficile de concevoir un panneau acoustique. Cependant certains produits ignifuges permettent d'améliorer ces classes :

- **Peintures ignifuges** : permettent d'obtenir des classements M1 ou M2
- **Medium Ignifuge** est un panneau de fibres de bois de moyenne densité (MDF) possédant un classement en réaction au feu Euroclasse B, s2-d0 délivré par le FCBA (M2)

Nous sommes donc partis sur une structure en MDF standard avec des parois en isorel peint avec une peinture ignifuge. Ces peintures ignifuges dites intumescentes ou foisonnantes réagissent sous l'action des flammes en se gonflant puis en charbonnant. Elles constituent une croûte noire, isolante, très épaisse qui empêche la flamme d'atteindre le support<sup>9</sup>.



*Figure 36 Peinture intumescente*

Nous devons également rajouté une toile à l'intérieur du panneau. L'une des parois en isorel sera en effet perforée pour améliorer l'absorption acoustique, or pour conserver la ouate de cellulose à l'intérieur et améliorer l'absorption, il est recommandé de rajouter une toile.

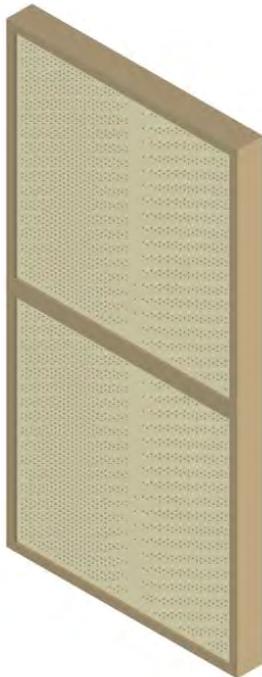
Nous avons donc fait le choix d'une toile de lin selon les conseils d'Antonin Tribaleau. Pour répondre au classement au feu pour ce matériau il existe également des produits ignifugeants permettant d'obtenir la classe M1.

Nous pouvons donc concevoir ce produit en respectant les normes au feu en vigueur.

---

<sup>9</sup> <http://www.habitat-move.com/materiaux-de-renovation/la-peinture-ignifuge/>

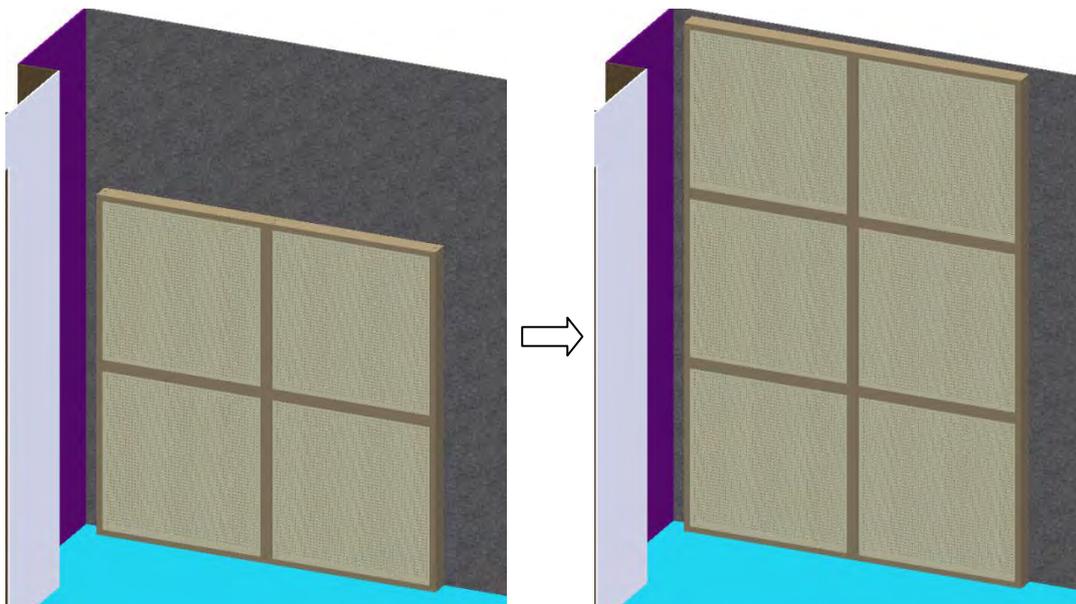
### **3.2. La conception du module**



*Figure 37 Un panneau acoustique*

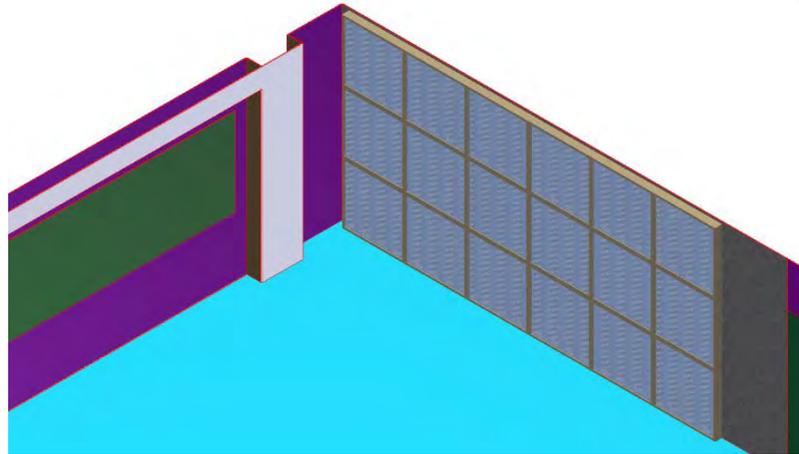
Pour concevoir ces panneaux, nous nous sommes inspirés des panneaux acoustiques que le Critt Bois nous avait prêtés. En effet, nous avons fait des mesures expérimentales dans les salles de TD avec ces panneaux. Grâce aux résultats, nous avons pu déterminer la quantité de panneau utile pour diminuer significativement. Le choix de la quantité de panneau à produire a été également influencé par le nombre de panneau que nous pouvions fabriquer avec un panneau standard de MDF de 30 mm d'épaisseur.

Ces modules sont composés de 2 montants et 2 traverses en MDF d'épaisseur 30 mm, et de deux panneaux d'isorel dont un perforé. Les fausses traverses ont une vocation esthétique. En effet, pour avoir une esthétique cohérente, nous avons pris le parti de diviser le panneau acoustique en deux. En ajoutant des pièces au centre du panneau, on obtient deux carrés. Ainsi, si on le souhaite, on pourra fixer un panneau horizontalement sur deux panneaux verticaux. Deux solutions étaient possibles pour les montants du centre : l'ajout de deux montants au milieu engendrant une division par deux des panneaux d'isorel ou l'ajout de deux faux montants. Les fausses traverses sont des pièces de MDF de même longueur que les traverses mais qui sont juste fixées sur la surface du panneau perforé. Le choix entre les deux possibilités sera expliqué par la suite.



*Figure 38 Ajout d'un panneau horizontal*

Pour permettre cette possibilité de superposition, il a fallu diminuer de 2 cm en hauteur et 1 cm en largeur pour que l'ensemble soit inférieur à la hauteur du plafond. On obtient donc des modules ayant pour dimensions 1780 x 890 x 100 mm.



*Figure 39 Simulation d'un mur recouvert de modules*

Concernant le panneau perforé, nous avons utilisé les mêmes diamètres de perforations, c'est-à-dire 8 mm et les mêmes entraxes, c'est-à-dire 16 mm. Pour éviter que l'isolant sorte par les perforations tout en gardant l'aspect écologique du panneau acoustique, nous avons décidé d'utiliser de la toile de lin qui est un tissu assez aéré pour permettre la transmission des ondes.

Tous ces matériaux ont été choisis pour que notre solution se rapproche au mieux des panneaux du commerce testés précédemment. Ainsi nous pourrons voir l'influence de la ouate et certains détails de conception sur la correction acoustique.

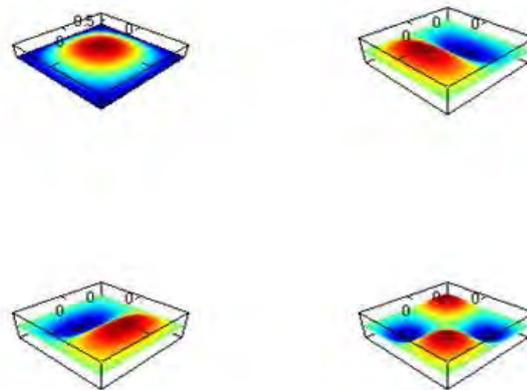
### **3.3. La vérification de la vibration de la membrane en isorel**

Il est intéressant de vérifier les modes de vibration de la plaque d'isorel car si elle vibre à une fréquence où le temps de réverbération est élevé, elle risque de dégrader la situation ou de moins l'améliorer.

Lors de la conception, nous avons voulu garder la possibilité de superposer un panneau horizontalement comme expliqué précédemment. Le choix entre les deux traverses et les deux fausses traverses a été orienté par cette étude.

Le mode 1 est le plus important à étudier. En effet, sur ce mode, on ne peut voir qu'une seule onde, donc celui où on peut voir la plus grande déformation moyenne. De plus, il prédomine sur les autres dans la réalité.

Vibration modes of a rectangular membrane



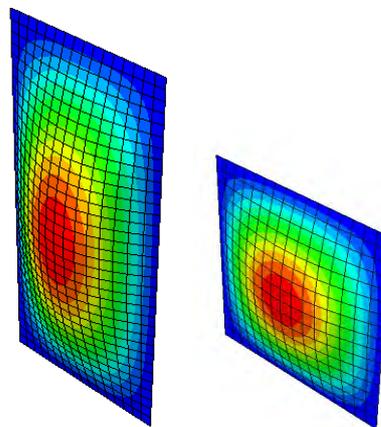
*Figure 40 Les 4 premiers modes propres d'une membrane*

Si on s'intéresse à la fréquence du premier mode  $f_{11}$ , on peut l'obtenir de manière numérique grâce au logiciel Abaqus. La plaque est représentée par une coque plane à laquelle on bloque les 3 translations en bord.

Avec les deux options de traverses ou fausses traverses, nous avons deux solutions, c'est-à-dire avec un panneau de 830 x 830 mm ou avec un panneau de 830 x 1720 mm. En faisant les simulations, on a :

- $f_{11, 830 \times 830} = 1.83 \text{ Hz}$
- $f_{11, 1720 \times 830} = 1.12 \text{ hz}$

On peut ainsi voir que les premiers modes propres sont nettement inférieurs aux fréquences étudiées pour le temps de réverbération. Il n'y a donc pas de risque de perturbation par les panneaux. Notre volonté étant de rester le plus proche des panneaux utilisés lors de la mesure faite, le choix s'est donc orienté vers la solution des fausses traverses. En effet, grâce à cette étude, on a pu voir que les fréquences de vibration de la plaque dépendaient des dimensions de la plaque.



*Figure 41 Le mode 1 de chacune de deux plaques*

### **3.4. La fabrication des modules acoustiques**

#### ***3.4.1. L'usinage***

La fabrication des modules acoustiques ont permis de constater les difficultés d'usinage qui ne sont pas forcément visible lors de la conception. En effet, en passant sur les machines nous avons pu nous rendre compte de problème principalement liés à la fabrication du panneau perforé. Nous avons pu nous confronter à différentes difficultés.

Tout d'abord, il a fallu faire le débit des panneaux. Pour le MDF de 30 mm d'épaisseur, nous avons utilisé un logiciel d'optimisation pour pouvoir savoir combien de montants, traverses et fausses traverses nous pouvions débiter sur un seul panneau de manière à limiter les pertes par panneaux (C). Concernant l'isorel, les panneaux vendus par Xilipan ne nous permettaient pas d'assurer un rendement matière supérieur à 43 %. Cependant, les chutes sont de dimensions importantes ce qui leur permet d'être utilisées par la suite pour d'autres projets.

Ensuite, il a fallu réfléchir au montage d'usinage nous permettant de faire nos perçages. Nous avons donc décidé d'utiliser un panneau martyr sur lequel nous pourrions fixer les panneaux d'isorel. Pour y parvenir, nous avons dû rajouter une marge de 2 cm sur chaque côté. Nous pouvions alors visser nos panneaux d'isorel sur le martyr sans craindre d'endommager la partie visible du panneau car cette marge sera découpée par la suite. De manière à rendre l'ensemble plus rigide, nous avons ajouté des vis sur la partie qui sera sous les fausses traverses. Par la suite, nous nous sommes confrontés aux limites de la machine. En effet, le centre de perçage Biesse a différentes limites. Après vérification sur la notice d'utilisation du poste, nous avons pu voir que les panneaux d'isorel étaient trop larges et trop long pour être usinés en une seule fois. La solution a donc été de faire l'usinage en quatre étapes grâce à l'utilisation des butées droite et gauche. Une fois ce problème résolu, la programmation nous a permis de voir que la machine était également limitée en nombre de perçage : chaque quart de panneau devait être usiné à l'aide de quatre programmes. Pour gagner du temps, nous avons décidé de mettre nos neuf panneaux sur le martyr étant donné que nous étions sous les limites d'épaisseur de panneau, c'est-à-dire 60 mm. Les panneaux étant déformés, ils donnaient au tout une épaisseur de 58 mm au niveau des parties bombées. Nous avons alors découvert, lors de l'usinage que la hauteur maximum du panneau qui était indiquée sur la notice était fautive. Avec une hauteur de 58mm, nos panneaux étaient rainurés de 3 mm car il arrivait au niveau de la lame de rainurage avec son vérin en position haute. Nous avons donc choisi de ne mettre que 4 panneaux d'isorel sur le martyr. De plus, le martyr utilisé, un panneau de particule de 10 mm, n'était pas assez rigide pour résister à la forte déformation des panneaux d'isorel. Les panneaux de particules sont difficiles à maintenir par aspiration et notre martyr étant ondulé, nous avons été contraints d'agrafer un panneau mélaminé fin de 8mm. Ensuite, en bougeant nos panneaux sur le martyr, nous avons déplacé la pile et donc perdu les repères d'origine ce qui a entraîné un léger décalage de nos perçages de l'ordre de 1 mm.



*Figure 42 L'usinage des panneaux perforés*

Une fois les perçages faits, il a fallu poncer le dessous des isorels. En effet, les isorels ne restaient pas plaqués les uns aux autres lors du perçage ce qui ne donnait pas un usinage propre. Nous n'avons pas rencontré de problèmes lors de l'usinage des autres pièces. Cependant cette étape du ponçage nécessiterait d'être évité. En effet nous avons constaté que les déchets produits par le ponçage venaient boucher l'aspiration.

### ***3.4.2. Le montage***

Le montage a été une phase qui nous a posée quelques problèmes. En effet, les plaques d'isorels étaient toujours ondulées ce qui a rendu l'assemblage plus difficile. Au fur et à mesure des essais, nous avons pu découvrir différents moyen d'assembler et ainsi voir laquelle apportait le moins de problème. En effet, le MDF est un matériau très fragile et la rainure lui apporte une zone de fragilité. Pour assembler, nous avons commencé par fixer deux traverses sur un montant pour y placer ensuite le panneau de fond et le panneau perforé qui a été recouvert à l'arrière d'une toile de lin. Cependant notant le remplissage par le haut s'avère délicat. Nous avons donc cherché une solution plus ergonomique qui s'est avéré être de fixer les deux traverses sur un montant, l'ensemble couché pouvant être rempli aisément. Une fois l'ensemble parfaitement mis en place, il fallait maintenir l'ensemble à l'aide d'une sangle pour éviter que les traverses s'écartent et laissent sortir les panneaux d'isorels hors des rainures.

Nous pouvions alors remplir de ouate de cellulose le module. Pour donner les meilleures propriétés acoustiques possibles au panneau, il fallait que la ouate ne soit pas tassée et qu'elle remplisse la totalité du bloc une fois qu'il serait fermé. On pouvait alors refermé en ajoutant le deuxième montant. Lors du premier module, nous avons rencontré un problème de taille : les isorels ne supportaient pas la pression exercée par la ouate et sortait de la rainure. Il a donc fallu ajouter les renforts au centre. Nous avons



*Figure 43 Un sac de ouate de cellulose*

alors ajouté des pièces de faible section à mi-hauteur entre les deux montants en les plaçant au niveau de la rainure. Sur ces deux pièces, nous pouvions ajouter une vis permettant de maintenir le panneau d'isorel en son centre.

Lors de la manipulation des panneaux pour du montage, nous nous sommes rendu compte que le MDF était fragile. Il pourrait être intéressant pour les renforcer d'ajouter un placage de champ voire d'ajouter une finition qui leur donnerait une meilleure durabilité dans les salles. Une finition rendrait possible le lavage des panneaux acoustiques s'ils reçoivent par exemple de l'encre.



*Figure 44 Un panneau acoustique fini*

Vous pouvez voir ci-dessus un panneau acoustique terminé sa réalisation nous a en effet apporté un certain nombre de problème pour lesquels nous avons apporté des solutions. Il nous reste cependant un point que nous n'avons pas abordé. Les pieds des modules et les assemblages du haut ont été dessinés mais pas réalisés. En effet le manque de moyens et de temps nous ont contraints à mettre de côté ce point. De plus, si les résultats sont satisfaisants, les panneaux seront fixés au mur.

Tous les plans des différentes pièces sont fournis en annexes.

### **3.5. Étude de prix de nos panneaux**

Nous avons repris le prix des matériaux utilisés pour réaliser nos panneaux, ce qui nous permet d'obtenir le tableau suivant :

	<b>prix total (9 panneaux)</b>	<b>prix unitaire</b>	<b>Prix au m<sup>2</sup></b>
<b>isorel</b>	37,62	4,2	
<b>MDF</b>	15,15	1,7	
<b>toile de lin</b>	112,86	12,5	
<b>ouate de cellulose</b>	0	0	
<b>peinture intumescente</b>	700	77,8	
<b>TOTAL</b>	865,63	96,2	59,4

*Tableau 4 Prix des modules expérimentaux*

Nous obtenons alors un prix au m<sup>2</sup> de 59.4 €. Ce prix ne tient pas compte de la ouate de cellulose ni de la quincaillerie. En prenant en compte le prix de la ouate (14€/ 12,5kg) nous arrivons à 65€/m<sup>2</sup> (avec environ 8kg de ouate par panneau soit 68,4 kg/m<sup>3</sup>). En prenant en compte la quincaillerie nous serions autour de 67€/m<sup>2</sup>.

Ces prix sont réellement intéressants vis-à-vis des produits du commerce. Cependant nous n'avons pas tenu compte ici des pieds et assemblages de tête, qui nous augmenteraient probablement notre prix au m<sup>2</sup> de 10€. Malgré cela, par rapport au produit du commerce testé qui du type EPM 49 de la marque Spectra notre prix est bien inférieur. Ce panneau est en effet vendu à 800€ pièce soit 476€/m<sup>2</sup>. Ce prix est dans la même gamme que la majorité des produits commercialisés. Il existe naturellement des produits moins chers, mais les propriétés acoustiques ne sont pas toujours mises à disposition. Cependant, il est possible pour 70€/m<sup>2</sup> de mettre en place des dispositifs fixes d'absorbants acoustiques.



*Figure 45 Panneaux EPM 49*

Bien que ne tenant pas compte de la main d'œuvre, nos prix restent en dessous des produits standards. Dans le cadre scolaire la réalisation de ces modules est intéressante et peu coûteuse. La résolution et l'amélioration des gammes de fabrication pourraient permettre de gagner beaucoup de temps, d'énergie et d'argent rendant incontournable la réalisation des panneaux expérimentaux.

## **4. OPTIMISATION ACOUSTIQUE DES SALLES DE CLASSE**

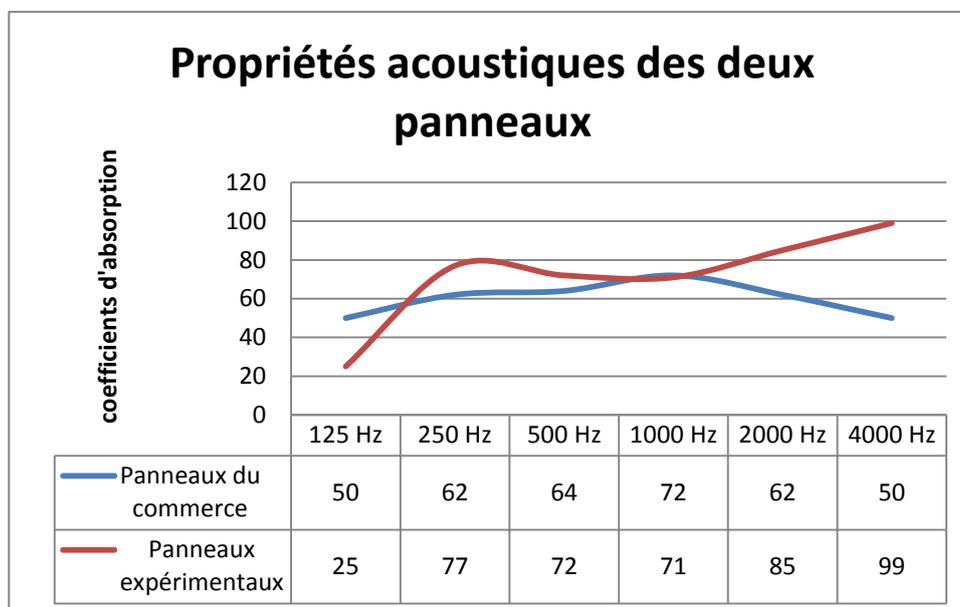
### **4.1. Test des panneaux expérimentaux**

Nous avons testé nos huit panneaux dans la salle de TD afin de caractériser les propriétés acoustiques de ceux-ci. Nous avons effectué nos essais pendant la pause du midi afin d'avoir la salle libre avec peu de bruits parasites dues aux activités extérieures.

Les valeurs que nous obtenons ne peuvent pas servir de référence officielle, étant donné que nos essais ne sont pas réalisés dans un environnement adéquat. Cependant, de la même manière que pour les panneaux du commerce testés précédemment, nous obtenons des valeurs moyennes représentatives de l'influence des différents éléments sur l'acoustique des salles de TD.

Lors des tests nous pouvions noter un amortissement des sons d'un point de vue strictement sensoriel. Les résultats ont pu ensuite confirmer nos impressions. Nous obtenons donc des temps de réverbération de 0.74 à 1.26 s. Ce qui correspond à un gain allant jusqu'à 39 %.

Nous avons ensuite rentré la disposition de nos panneaux lors de l'expérimentation dans notre modèle numérique sous Catt Acoustic. Puis en cherchant à se rapprocher des valeurs expérimentales nous avons pu définir les propriétés acoustiques de notre panneau. Nous obtenons alors des coefficients d'absorption en moyenne supérieure à celui testé précédemment.



*Figure 46 Propriétés acoustiques des panneaux testés*

Vous pouvez voir sur la figure ci-dessus les différences entre les deux panneaux absorbants. Les panneaux du commerce absorbent de manière plus homogène les différentes

fréquences tandis que nos prototypes de panneaux sont peu absorbants à 125 Hz, absorbants entre 250 et 2000 Hz et très absorbants pour les hautes fréquences. Les panneaux expérimentaux sont donc performants. La valeur à 4000Hz des panneaux expérimentaux est cependant faussée en raison des limites du logiciel Catt-Acoustique. En effet, avec ces valeurs nous nous retrouvons avec 20% d'erreur par rapport à l'expérimental, cette erreur étant due à la limite du coefficient d'absorption fixé à 100 par Catt-Acoustique. Nous devrions être au-dessus.

Dans notre cas, nous souhaitons de bonnes propriétés absorbantes entre 250 et 2000 Hz (cf. Figure 25). Le prototype répond bien à cette exigence, cependant l'absorption à 4000 Hz est très élevée, elle risque donc de nuire au confort acoustique de la salle. Pour vérifier si nos panneaux convenaient, nous avons lancé une simulation avec la configuration évoquée en 39.

Bien que nous ayons cherché à reproduire le panneau du commerce nous observons que les différences étaient grandes. Ces différences peuvent s'expliquer par le matériau isolant choisi. En raison de ses bonnes propriétés acoustiques, environnementales et des liens entre NrGaia (producteur de la ouate) et l'école, nous avons rempli nos modules avec de la ouate de cellulose or les panneaux industriels sont eux réalisés avec de la laine de verre. De plus, nous avons des nuances certaines de conception. N'ayant pas démonté les modules il a été difficile de connaître précisément leur composition.

Il est intéressant de savoir comment sont absorbés les basses ou les hautes fréquences pour comprendre nos différences :

- l'absorption dans les **fréquences élevées** est obtenue facilement avec les matériaux à porosité ouverte, fibreux, textiles.
- l'absorption dans les **fréquences basses** nécessite de l'espace pour installer des membranes ou des résonateurs dont l'encombrement est non négligeable lorsque l'on veut obtenir  $F_r$  faible.
- l'absorption dans les **fréquences moyennes** est réalisée par des matériaux poreux épais, des petits résonateurs ou plaques.

La faible absorption de nos panneaux à 125 Hz peut donc s'expliquer par l'absence de membrane dans nos modules. Tandis que la ouate permet d'absorber fortement les hautes fréquences mais également un peu les moyennes fréquences. La plaque perforée améliore l'absorption des moyennes fréquences.

Pour améliorer nos modules, en respectant leur conception actuelle nous pourrions faire varier le diamètre des perçages. Cela permettrait d'homogénéiser un peu la correction acoustique entre les moyennes et hautes fréquences. Pour les basses fréquences il serait intéressant de revoir la conception de nos modules. L'ajout d'une lame d'air ou le partage de nos modules en deux parties avec

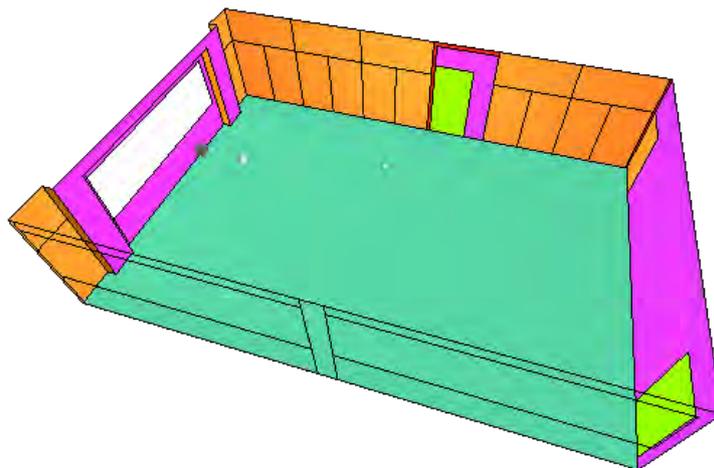


*Figure 47 Un mur de résonateurs constitué de lames de bois*

sur une moitié l'installation de lame de bois, comme vous pouvez le voir sur l'image ci-contre (Figure 47). Les intervalles entre lames seraient de hauteur variable afin de réaliser des fréquences de résonances différentes, dans les fréquences haut-grave et bas médiums. Nous perdriions cependant l'effet de plaque évoqué précédemment.

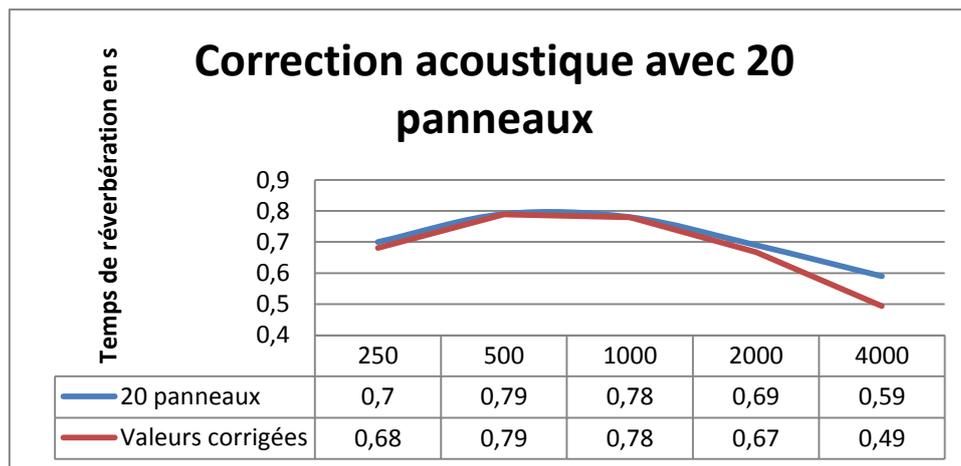
#### **4.2. Simulation acoustique de la salle 3N21 équipé avec les panneaux expérimentaux**

Étant donné que nous cherchons à améliorer l'acoustique des salles de TD nous avons relancé le modèle avec la disposition pour laquelle notre panneau avait été pensé précédemment. Nous avons ainsi relancé les calculs pour 20 panneaux disposés tels que vous pouvez le voir sur la figure suivante (Figure 48).



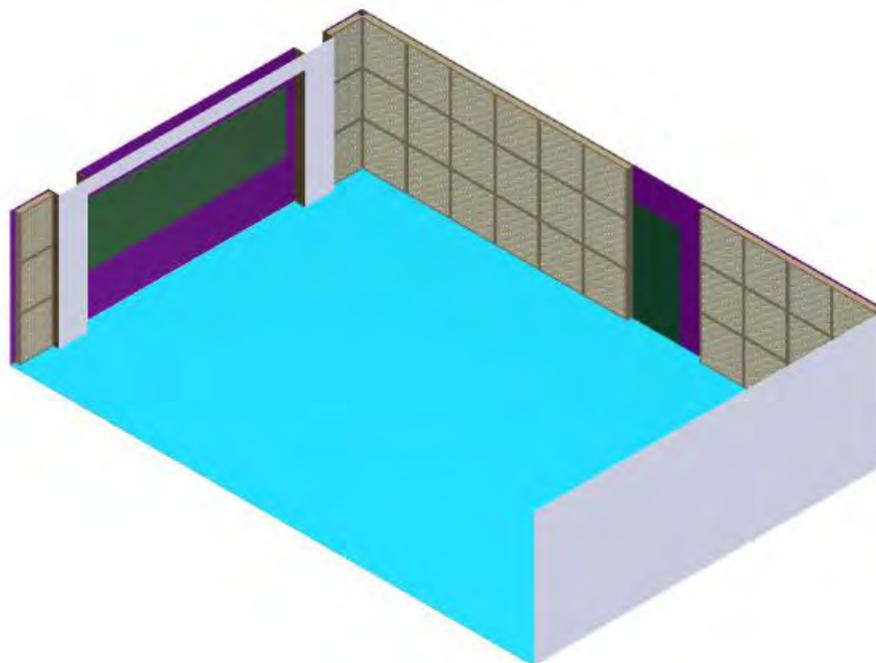
*Figure 48 Disposition finale des panneaux acoustique*

Avec cette disposition qui couvre pratiquement la totalité du mur face aux fenêtres ( $30\text{m}^2$ ), nous obtenons une correction acoustique suffisante au regard de la norme. Entre 250 et 4000 Hz, nous sommes entre 0,4 et 0,8s dans une salle vide.



*Figure 49 Correction acoustique de la salle 3N21 avec 20 panneaux*

Comme vous pouvez le voir ci-dessus avec 20 panneaux nous sommes en dessous de 0.8s. Nous avons cependant évoqué précédemment l'erreur due aux limites du logiciel à 4000 Hz, nous avons donc corrigé nos temps de réverbération avec les erreurs obtenues entre les mesures expérimentales et la simulation. Les valeurs obtenues, bien que non validées permettent de représenter plus précisément les valeurs pouvant être obtenues expérimentalement. Nous pouvons constater qu'à 4000 Hz nous sommes supérieurs à 0.4 s ce qui correct.



*Figure 50 Aperçu de la salle*

# CONCLUSION

L'étude des salles de TD 3N21 et 3N22 nous a permis de constater réellement l'importance de l'acoustique dans les salles de classe. Elle nous a conduits à faire des recherches sur l'acoustique et nous avons trouvé, entre autre, que les normes fixent un paramètre important. Le temps de réverbération, qui correspond au temps de décroissance du niveau sonore d'un certain niveau doit être de 0,8s maximum en milieu scolaire dans une pièce de volume donné. Nous pouvions aisément dire, de part les cours suivis dans cette salle, que cette limite devait être dépassée.

Les mesures réalisées par la suite à l'aide d'une source sonore omnidirectionnelle et d'un sonomètre ont confirmé l'importance du travail à accomplir ici. Nous avons donc modélisé nos salles de classes sur le logiciel Catt Acoustic puis développé un modèle numérique de calcul acoustique à l'aide de la formule d'Eyring. En combinant les 3 méthodes d'obtention des valeurs, nous avons pu en déduire les coefficients d'absorption des différents matériaux composant la pièce. Ces résultats ont mis en valeur l'influence de certains matériaux dans le mauvais confort acoustique de ces salles.

Le coût nécessaire à l'amélioration du confort acoustique de ces salles en utilisant des produits commercialisés était nettement supérieur au budget ce qui nous a orienté vers la conception d'un nouveau panneau utilisant les savoir-faire de l'ENSTIB. Cette idée a été renforcée par l'absence de produits absorbants « verts » dans ces panneaux commercialisés. En s'orientant vers la conception, nous nous sommes confrontés aux différentes normes de résistances au feu qui ne sont pas adaptés à l'utilisation de ce genre de matériaux.

A l'issue de la réalisation de ces panneaux, nous avons pu tester leurs propriétés et voir s'ils convenaient aux besoins de la salle. Les résultats nous ont montrés que les panneaux convenaient bien aux salles et permettraient de satisfaire les besoins de confort acoustique à faible coût de ces salles.

En mettant en œuvre ces modifications, la qualité de l'environnement de travail sera améliorée ce qui permettra une meilleure transmission de connaissances des professeurs aux étudiants. Il s'agit donc d'une étape incontournable dans l'amélioration de l'enseignement à l'ENSTIB.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] [http://membres.multimania.fr/audioprovence/bibliographie/son\\_1/son\\_1.html](http://membres.multimania.fr/audioprovence/bibliographie/son_1/son_1.html)
- [2] <http://www.audio-maniac.com/le-son/physique-du-son>
- [3] S. SAN SOUCI 2003 - « Situation actuelle des salles de classe en terme de qualité acoustique dans les établissements primaire, secondaire et universitaire. » Ingénieur acousticien, AIA, Décembre.
- [4] "Improvement of Acoustic Conditions for Speech Communication in Classrooms", E. Sala
- [5] "Reverberation times and speech transmission indices in classrooms", S.K. Tang, M.H. Yeung
- [6] "Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms", Arianna Astolfi, Vincenzo Corrado, Alessia Griginis
- [7] "Case-study evaluations of the acoustical designs of renovated university classrooms", Murray Hodgson
- [8] "Computer modelling with Catt-Acoustic theory and practice of diffuse reflection and array modeling" Adrian James, Adrian James Acoustics, UK
- [9] RESUMÉ» J.J. Delétré – École d'architecture de Grenoble

# TABLEAU DES VALEURS DE « ALPHAANNEXES »

## A. Le tableau de calcul analytique du TR

I
II
III
IV

1

2

3

4

5

6

V

VI

VII

VIII

VII

7

8

9

VIII

- I- Entrée des paramètres de la salle
  - 1- Nom des faces
  - 2- Surface des faces
  - 3- Coefficients d'absorption des faces
  - 4- Commentaires
- II- Calcul de : coef. Sabine x Surface
- III- Calcul avec mise en place de parois absorbantes
  - 5- Surfaces avec prise en compte des surfaces absorbantes correctives
  - 6- Calcul de : coef. Sabine x Surface corrigées
- IV- Constante d'atténuation du son dans l'air
- V- Différentes courbes de TR corrigées, non corrigées, réelles et simulé par Catt-A

## ***TABLEAU DES VALEURS DE « ALPHAANNEXES »***

---

- VI- Résultats et erreurs pour les TR
- VII- Courbes de TR en fonction des fréquences pour les panneaux acoustiques
- VIII- Tableaux des panneaux acoustiques commerciaux.
  - 7- Désignations commerciales des différents panneaux
  - 8- Coefficients alpha sabine par fréquences
  - 9- Estimation des prix en fonction des panneaux et des surfaces nécessaires.

## **B. Les normes au feu**

**Exigence réglementaire (NF p 92-501)**

**M0** : produit non combustible

**M1** : produit faiblement combustible

**M2** : produit combustible

**M3** : produit très combustible

**M4** : produit très inflammable

**Euroclasse de produit (NF EN 13501-1)**

**A1 et A2** : produit non combustible

**B** : produit faiblement combustible

**C** : produit combustible

**D** : produit très combustible

**E** : produit très inflammable et propagateur de flamme

**F** : produit non classé ou non testé

**Classement s pour la production de fumées**

**s1** : dégagement de fumées très limité

**s2** : dégagement de fumées limité

**s3** : matériau ne répondant ni aux critères S1 ni au critère s2.

**Classement d pour la production de gouttelettes / particules enflammées**

**d0** : pas de gouttelettes

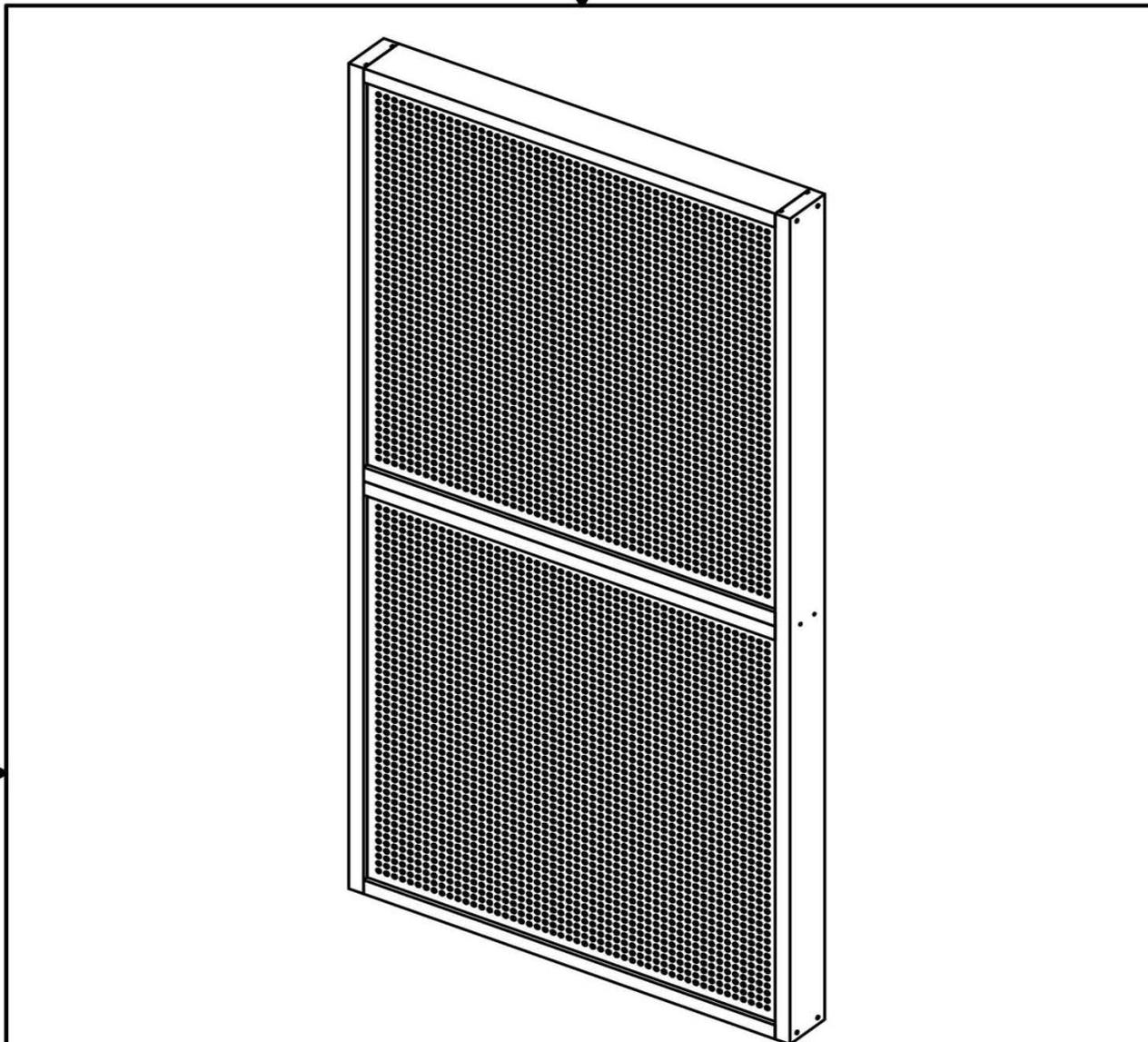
**d1** : dégagement de gouttelettes persistant pendant au plus 10 s (essai SBI)

**d2** : matériau ne répondant ni au critère d0 ni au critère d1.



## D. Mise en plan des panneaux acoustiques

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

### LISTE DE PIECES

QTE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION
1	panneau perforé	
1	panneau arrière	
1	renforcement	
2	montant	
2	traverse	
2	fausse traverse	

Conçu par V. Champilou - B. Coutant	Vérifié par	Approuvé par	Date	Date 19/01/2012
--	-------------	--------------	------	--------------------

**Vue d'ensemble**

Panneau acoustique

Modification	Feuille 1 / 8
--------------	------------------

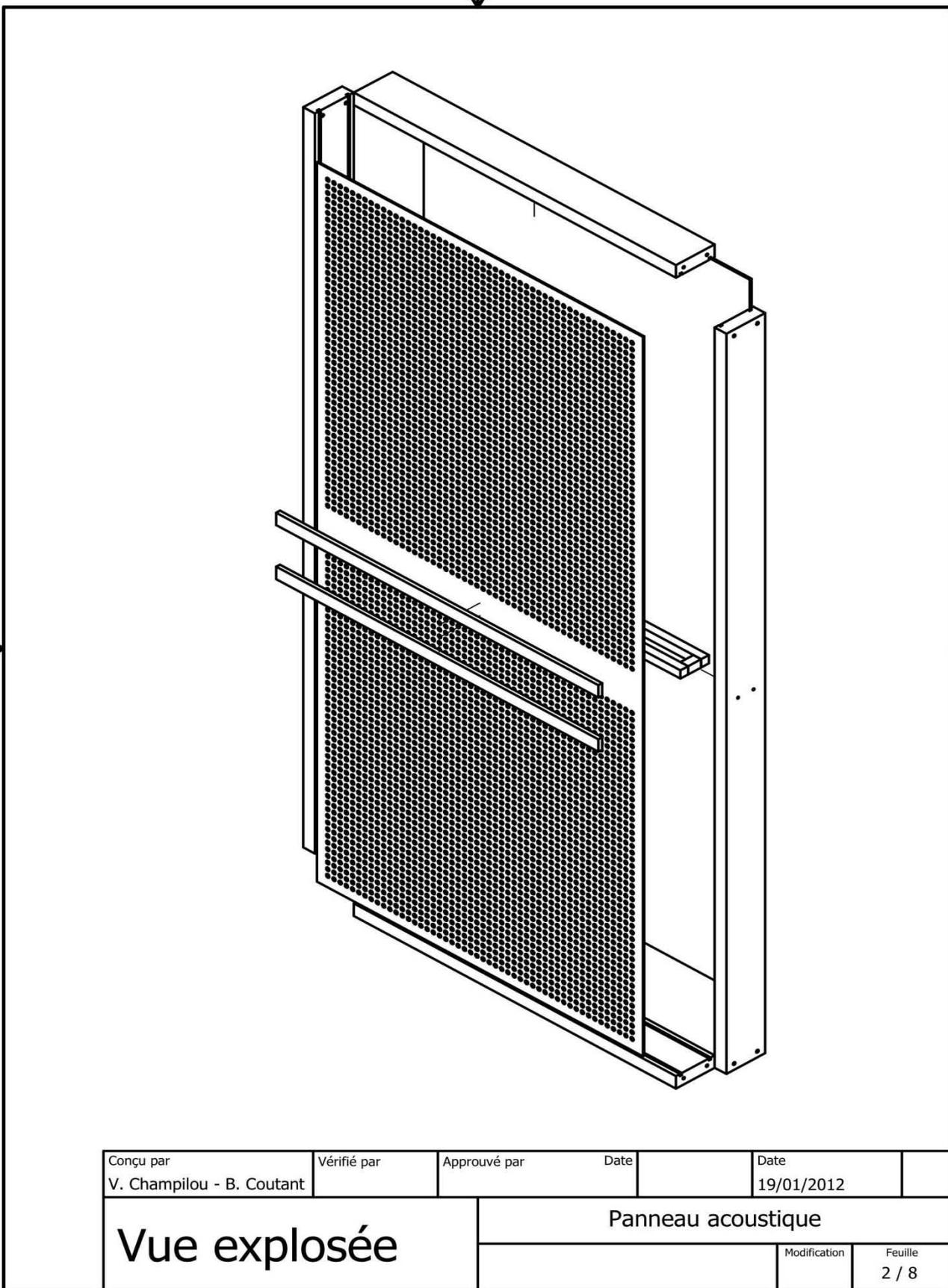


REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



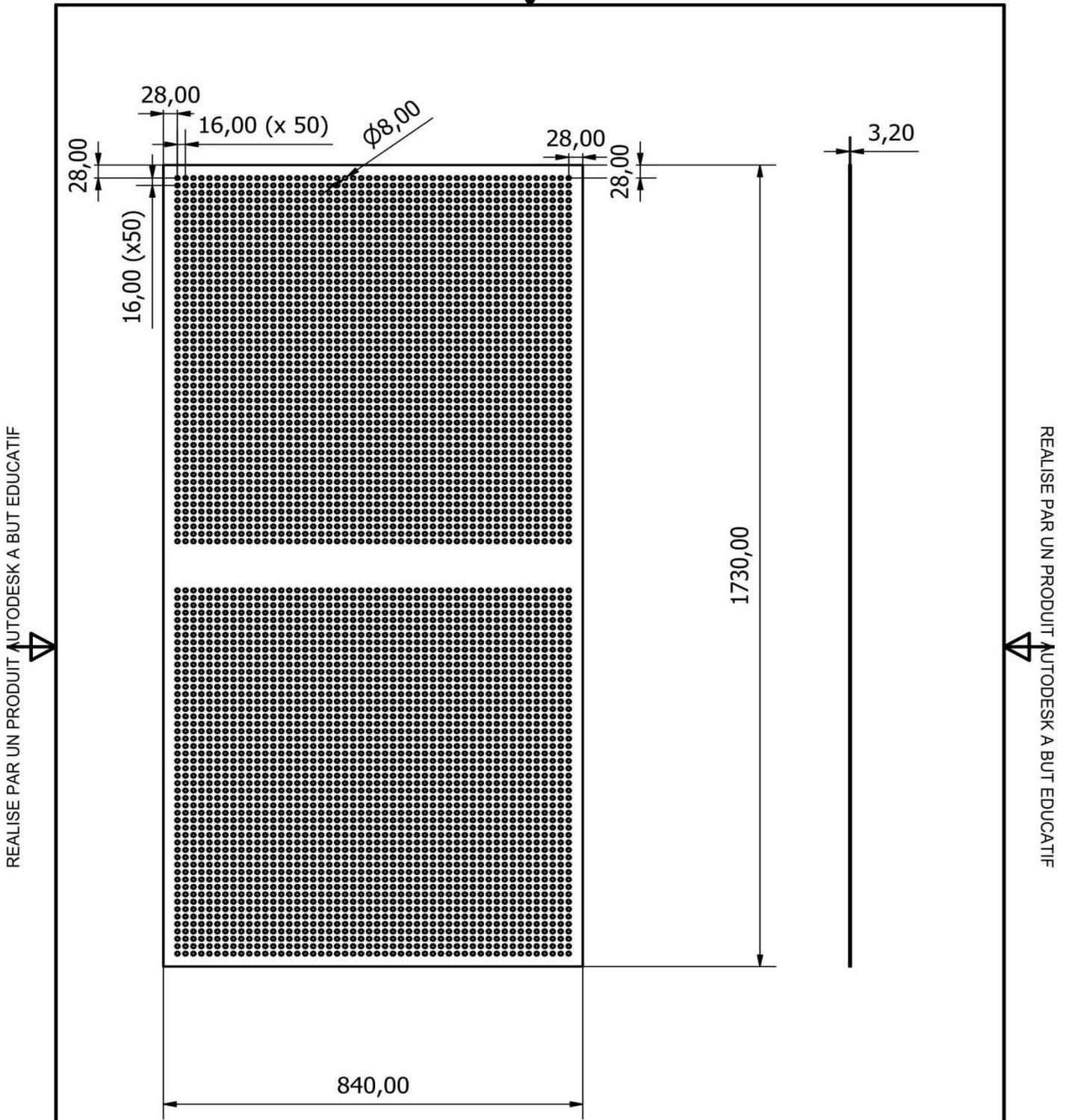
Conçu par V. Champilou - B. Coutant	Vérifié par	Approuvé par	Date	Date 19/01/2012
<b>Vue explosée</b>		Panneau acoustique		
		Modification	Feuille 2 / 8	

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



**TABLEAU DES VALEURS DE « ALPHAANNEXES »**

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

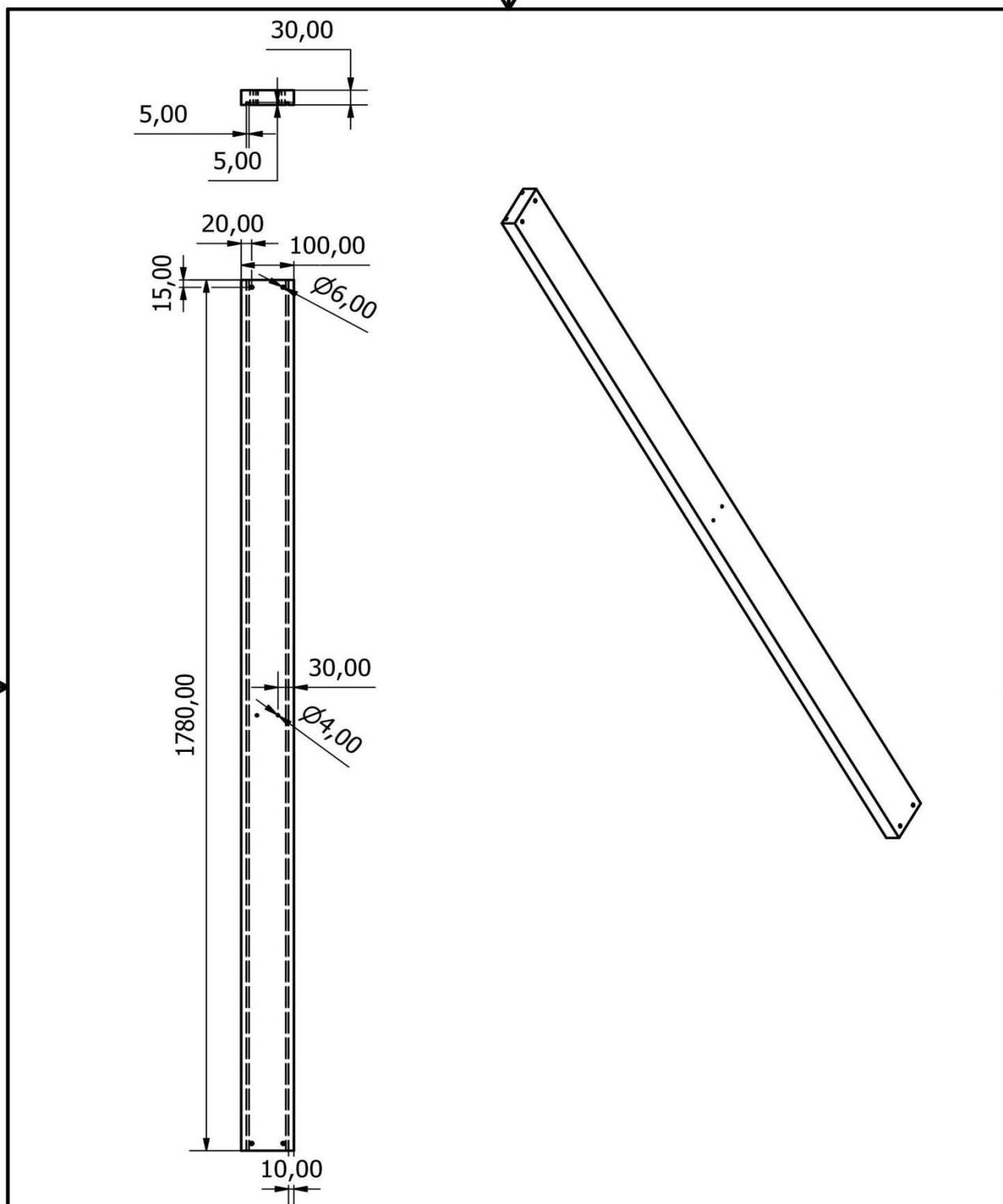


Conçu par V. Champilou - B. Coutant	Vérifié par	Approuvé par	Date	Date 19/01/2012	
<b>Panneau perforé</b>		<b>Panneau acoustique</b>			
		Modification	Feuille 3 / 8		

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

**TABLEAU DES VALEURS DE « ALPHAANNEXES »**

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

Conçu par V. Champilou - B. Coutant	Vérfié par	Approuvé par	Date	Date 19/01/2012
<b>Montant</b>	<b>Panneau acoustique</b>			
		Modification	Feuille 4 / 8	

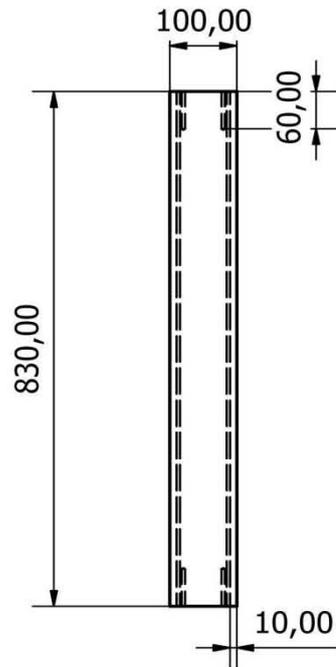
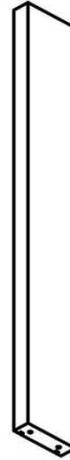
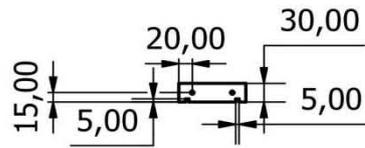
REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



Conçu par V. Champilou - B. Coutant	Vérifié par	Approuvé par	Date	Date 19/01/2012	
<b>Traverse</b>		<b>Panneau acoustique</b>			
		Modification	Feuille 5 / 8		

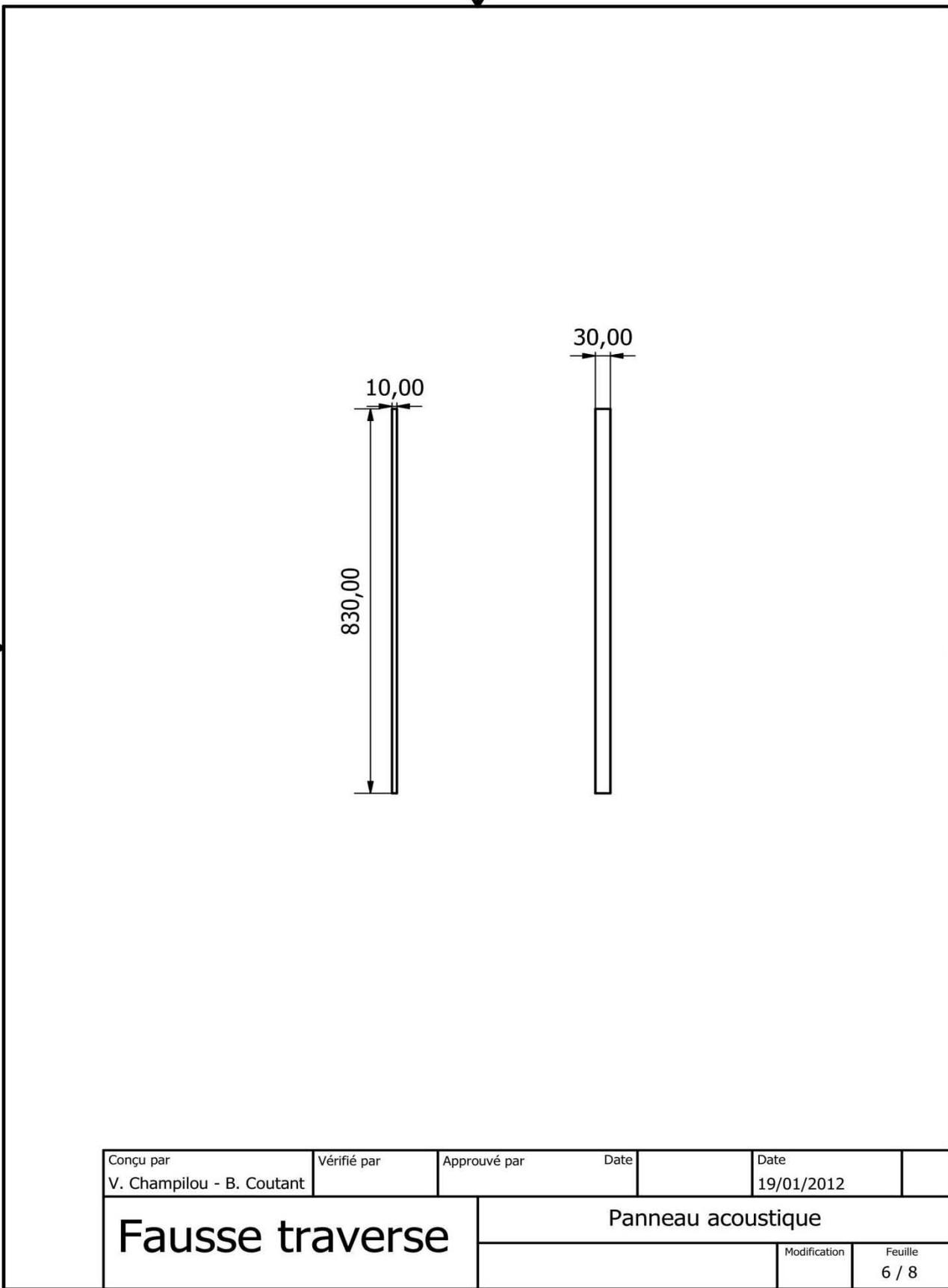
REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

**TABLEAU DES VALEURS DE « ALPHAANNEXES »**

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



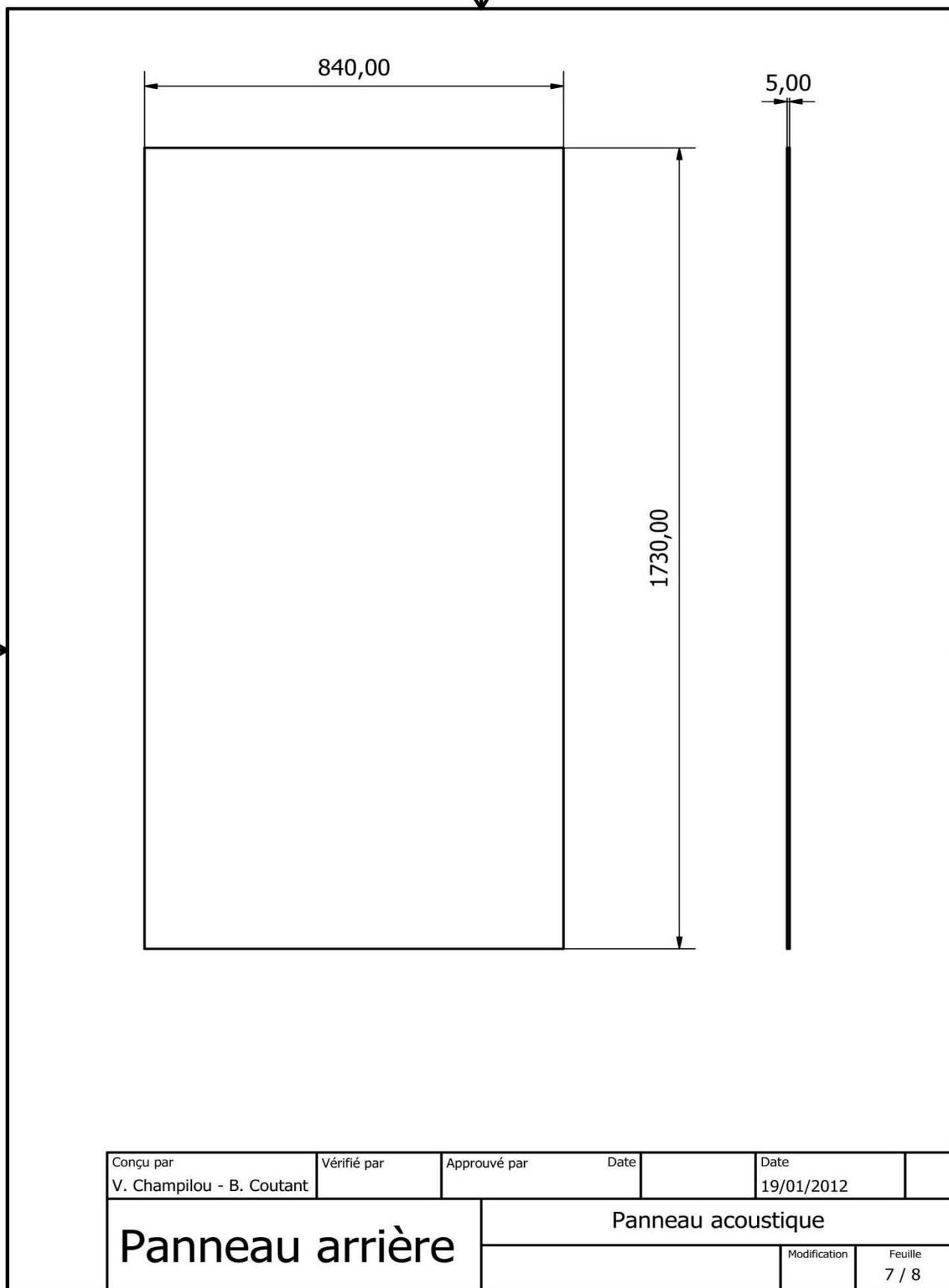
Conçu par V. Champilou - B. Coutant	Vérifié par	Approuvé par	Date	Date 19/01/2012	
<b>Fausse traverse</b>		<b>Panneau acoustique</b>			
		Modification	Feuille 6 / 8		

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



**TABLEAU DES VALEURS DE « ALPHAANNEXES »**

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

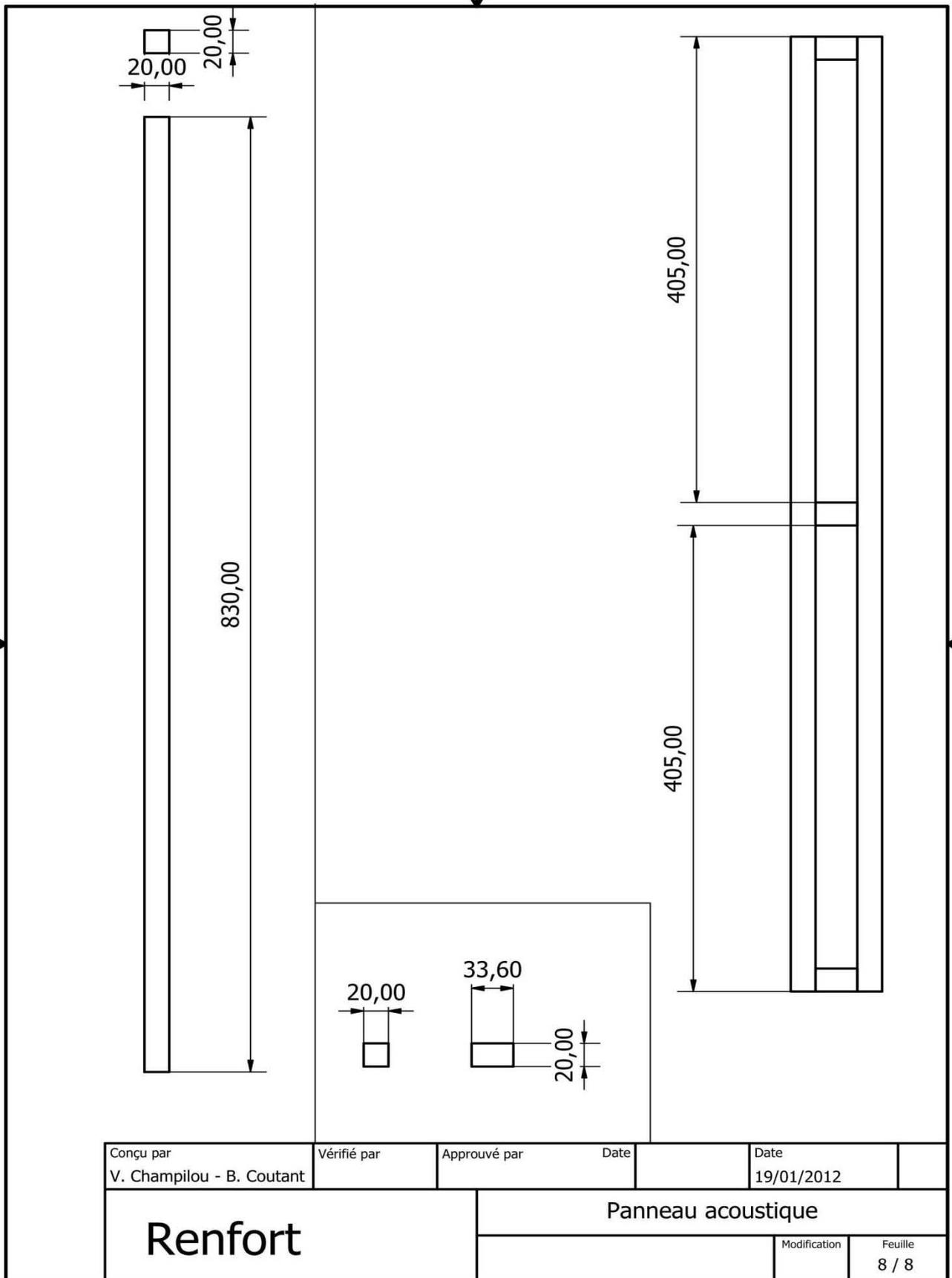
REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

**TABLEAU DES VALEURS DE « ALPHAANNEXES »**

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF



REALISE PAR UN PRODUIT AUTODESK A BUT EDUCATIF

### RESUMÉ

Les propriétés acoustiques d'une salle de classe sont extrêmement importantes. Quand elles sont bonnes, elles facilitent la compréhension de la parole de l'enseignant, favorisant donc l'assimilation du cours par les élèves et rendant le travail de l'enseignant plus confortable. Notre projet a eu pour objectif de caractériser les besoins d'améliorations acoustiques des salles de TD 3N21 et 3N22 de l'ENSTIB et apporter des solutions.

Pour ce faire, nous avons étudié le comportement acoustique de deux salles de TD de l'ENSTIB. De nombreuses mesures et simulations ont été réalisées, dans différentes configurations, afin d'évaluer le temps de réverbération, qui correspond au temps de décroissance du niveau sonore. Tout au long de ce projet, plusieurs comparaisons ont été faites entre les valeurs numériques obtenues à l'aide du logiciel Catt Acoustic, les valeurs analytiques obtenues à l'aide de la formule d'Eyring et les valeurs expérimentales. Des recherches sur les propriétés acoustiques de différents produits nous ont amenés à concevoir puis fabriquer des panneaux acoustiques. Pour les matériaux, notre choix s'est porté sur des matériaux « verts » tels que la ouate de cellulose et différents panneaux à base de bois pour s'inscrire dans la démarche de développement durable de l'école.

Suite à cette étude, nous pouvons quantifier les carences acoustiques des salles. Nous confirmons ainsi l'existence d'un réel besoin auquel nous proposons une solution concrète : la création de panneaux acoustiques.

**Mots clés: temps de réverbération, salle de cours, acoustique, ouate de cellulose, panneau acoustique.**

### ABSTRACT

The acoustic properties of a classroom are extremely important. When they are good, they facilitate the understanding of the word of the teacher, thus promoting the assimilation of the course by students and making work more comfortable for the teacher. This project aimed to characterize the needs of acoustic improvements of 3N21 and 3N22 classrooms of the ENSTIB and offering adequate solutions.

We therefore studied the acoustic behavior of the two ENSTIB classrooms. Many measurements and simulations were performed in different configurations, so as to assess the reverberation time, which is the decay time of the sound level. Throughout this project, several comparisons were made between the numerical values obtained using the Catt Acoustic software, the analytical values obtained using the Eyring formula and the experimental values. Research on acoustic properties of different products led us to the design and the manufacture of acoustic panels. The choice of materials was focused on "green" materials such as cellulose wadding and various wood-based panels to fit into the sustainable development approach of the school.

Following this study, we can quantify the acoustic deficiencies of the classrooms. We therefore confirm the existence of a real need for which we propose a concrete solution: the creation of acoustic panels.

**Keywords: reverberation time, classroom, acoustic, cellulose wadding, acoustic panel.**