



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE



Département de Génie Mécanique

Rapport de projet GMC721
Conception, fabrication et validation d'un encoffrement
acoustique

19/04/2013

LEUNG-TACK Arnaud
MAMLOUK Mohamed Hédi
SKALLI HOUSSEINI Aniss

Professeur: BERRY Alain

Sommaire

Liste des figures.....	4
Liste des tableaux	4
Introduction	5
I. Calcul de prédiction des performances de l'encoffrement :	5
1. Démarche théorique	5
Pression mesurée sans encoffrement	5
Pression mesurée avec encoffrement.....	5
La perte par insertion en bandes 1/3 d'octaves.....	8
La perte par insertion globale	9
Indicateur de masse	10
2. Implantation numérique.....	10
3. Choix du type de paroi (simple ou double) et des matériaux (absorbant et isolant).....	11
II. Concept et données techniques.....	13
III. Résultats de mesure de performance :	15
1. Tests préliminaires	15
1 ^{ère} série : encoffrement initial.....	15
2 ^{ème} série : influence de l'absorbant.....	17
3 ^{ème} série : évaluation et amélioration de l'étanchéité	18
2. Évaluation finale.....	19
IV. Discussion des résultats	21
1. Approximations théoriques	21
2. Incertitudes expérimentales	21
Conclusion.....	22
Annexe 1	23
Calcul de IL_G , IL_M , M_{tot} pour la simple paroi en bande de tiers d'octave	23
Calcul de IL_G , IL_M , M_{tot} pour la double paroi en bande de tiers d'octave	24
Annexe 2	27
Calcul de prédiction des performances pour choix de la conception simple paroi/double paroi puis des matériaux.....	27
Annexe 3	36
Laine de verre fixée pour le choix de l'isolant	36
Annexe 4	37
Script Matlab pour calculer IL et IL_M des mesures expérimentales	37
Annexe 5	40
SPL mesurées lors de l'évaluation finale par bande 1/3 octave [800; 1350] Hz	40

Script Matlab	42
Annexe 6	43
Script Matlab pour comparaison exp/théorie de $IL(\omega)$	43
Références	45

Liste des figures

Figure 1 - Description du champ direct et du champ réverbéré créés dans l'encoffrement	6
Figure 2 - Emplacement des microphones par rapport au centre de l'encoffrement	8
Figure 3 - Approximation du calcul intégral par la méthode des aires.....	10
Figure 4 - Fibre de verre.....	13
Figure 5 - Parois en bois MDF	13
Figure 6 - Grillage de poules	13
Figure 7 - Bois épinette	13
Figure 8 - Bouts de bois épinette.....	14
Figure 9 - Fibre de verre dans l'encoffrement	14
Figure 10 - Mousse de néoprène	14
Figure 11 - Toit de l'encoffrement.....	14
Figure 12 - Encoffrement avant de mettre les verrous	15
Figure 13 - Partie inférieure de l'encoffrement.....	15
Figure 14 - Tests préliminaires, encoffrement initial	16
Figure 15 - Tests préliminaires, système d'acquisition.....	16
Figure 16 - Tests préliminaires, ajout d'une couche de mélamine.....	17
Figure 17 - Évaluation finale, dispositif expérimental	19
Figure 18 - Comparaison entre mesures expérimentales (micro 4) et modèle de prédiction pour $IL(\omega)$	20

Liste des tableaux

Tableau 1 - Propriétés mécaniques des isolants testés	12
Tableau 2 – Propriétés des absorbants testés.....	12
Tableau 3 - Mesures SPL, encoffrement initial.....	17
Tableau 4 - Mesures de SPL, comparaison sans et avec mélamine.....	18
Tableau 5 - Tests préliminaires série 3, amélioration de l'étanchéité.....	19
Tableau 6 - Comparaison entre mesures expérimentales et modèle de prédiction pour IL et ILM.....	20

Introduction

Dans le cadre du cours de rayonnement acoustique des structures, il nous a été demandé de modéliser, concevoir puis fabriquer un encoffrement acoustique. Plusieurs contraintes ont été imposées, en particulier de respecter le seuil d'indice de performance global fixé à 15dB tout en ayant une masse minimale. Dans ce but, la démarche adoptée a été de :

- Prédire les performances de l'encoffrement en se basant sur un modèle numérique
- Choisir le type de conception (simple ou double paroi)
- Choisir les matériaux pour l'absorbant et l'isolant
- Définir le concept de l'encoffrement
- Fabriquer l'encoffrement
- Réaliser des tests de mesures préliminaires
- Comparer le modèle numérique et les mesures expérimentales

I. Calcul de prédiction des performances de l'encoffrement :

1. Démarche théorique

L'objectif de cette démarche a été de définir des relations liant les paramètres de l'encoffrement aux indices de performances. Elles permettront de savoir quelle est l'influence de chacun des paramètres puis leurs valeurs afin de réaliser la conception et les dimensionnements optimaux. Pour cela, le problème physique a été exprimé en faisant des hypothèses simplificatrices sur le rayonnement du haut-parleur avec et sans encoffrement.

La 1^{ère} étape a été d'exprimer les pressions mesurées aux micros.

Pression mesurée sans encoffrement

Comme les mesures sont faites en chambre semi-anéchoïque, il a été supposé que le haut-parleur seul rayonne en milieu infini. De plus, sa directivité étant difficile à définir en raison de sa géométrie et du bruit blanc généré, son rayonnement a été considéré omnidirectionnel.

Dans le cas d'une source monopolaire qui est placée en champ libre, il existe une relation entre sa puissance acoustique w et la pression quadratique du milieu. Celle-ci décroît avec le carré de la distance entre la source (haut parleur Studiofile DX4) et le receveur (le microphone). Elle peut s'écrire comme suit :

$$\langle p_{\text{sans}}^2 \rangle = \frac{\rho_0 c_0}{4\pi r^2} w$$



Pression mesurée avec encoffrement

En présence de l'encoffrement, la pression dépend de la puissance acoustique transmise w_t :

$$\langle p_{\text{avec}}^2 \rangle = \frac{\rho_0 c_0}{4\pi r^2} w_t$$



Il a été considéré que cette puissance acoustique transmise est la somme de deux contributions : une puissance transmise due au champ direct w_{tdirect} et une autre due à la réverbération w_{trev} .

$$w_t = w_{\text{tdirect}} + w_{\text{trev}}$$

Ces deux contributions viennent du fait que l'encoffrement est un milieu fermé et par conséquent qu'un champ diffus est créé. Celui-ci se représente comme une superposition d'ondes planes qui arrivent en un point avec toutes les incidences, à la suite des réflexions multiples des ondes sur les parois de l'encoffrement (Figure 1).

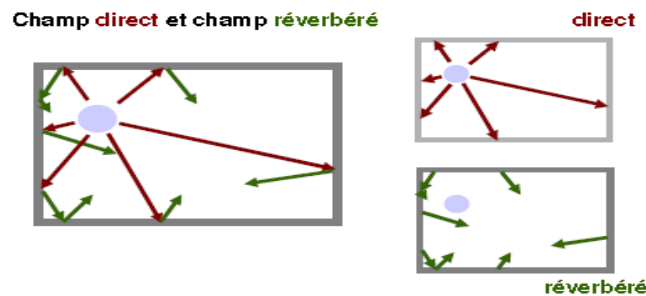


Figure 1 - Description du champ direct et du champ réverbéré créés dans l'encoffrement



La puissance transmise directe est la puissance incidente sur les parois de l'encoffrement. Elle dépend directement de la puissance de la source w et de la transparence acoustique des parois. Comme les dimensions de l'encoffrement seront du même ordre de grandeur que celles du haut-parleur, il a été supposé que les angles d'incidence des ondes sur les parois restent proches de la normale et donc que c'est la transparence acoustique en incidence normale τ_0 qui est prise en compte.

Par conséquent,

$$w_{\text{tdirect}} = \tau_0 w$$

Enfin, celle-ci est exprimée à partir de la transparence acoustique en champ diffus τ_d , en supposant que leurs indices d'affaiblissement R_0 et R_d sont en général reliés par :

$$R_d = R_0 - 5\text{dB}$$



avec $R_0 = 10\log\left(\frac{1}{\tau_0}\right)$ et $R_d = 10\log\left(\frac{1}{\tau_d}\right)$.

$$\Rightarrow \tau_0 = 0.3\tau_d$$

D'où :

$$w_{\text{tdirect}} = 0.3\tau_d w$$

La puissance transmise due à la réverbération dépend de la puissance réfléchie après absorption due au matériau qui recouvre les parois. Celle-ci peut s'exprimer par :

$$w_R = w(1 - \bar{\alpha})$$

$\bar{\alpha}$ est le coefficient d'absorption moyen des parois qui se calcule par $\bar{\alpha} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S_p}$ où α_i est le coefficient d'absorption de chaque surface élémentaire S_i tel que $S_p = \sum_i S_i$.

Le champ de pression réverbérée est :

$$p_R^2 = \frac{4\rho_0 c_0 w_R}{A}$$

avec $A = \bar{\alpha} S_i$ aire d'absorption de Sabine.

En remplaçant w_R et A par leurs valeurs, on obtient p_R^2 en fonction des coefficients d'absorption :

$$p_R^2 = \frac{4\rho_0 c_0 w}{\left(\frac{\bar{\alpha} S}{1 - \bar{\alpha}}\right)}$$

Cela permet d'exprimer la puissance incidente sur les parois de l'encoffrement due à la réverbération :

$$w_{inc} = \frac{p_R^2 S}{4\rho_0 c_0} = \frac{w(1 - \bar{\alpha})S}{\bar{\alpha} S_i}$$

Avec

- S : somme des surfaces des parois de l'encoffrement et de la source,
- S_i : somme des surfaces des parois de l'encoffrement.

Celle-ci est reliée à la puissance transmise due à la réverbération par :

$$w_{trev} = \tau_d w_{inc}$$

$$w_{trev} = \tau_d \frac{w(1 - \bar{\alpha})S}{\bar{\alpha} S_i}$$

La puissance totale transmise est alors connue.

$$w_T = 0.3\tau_d w + \tau_d \frac{w(1 - \bar{\alpha})S}{\bar{\alpha} S_i}$$



$$w_T = \tau_d w \left(0.3 + \frac{(1-\bar{\alpha})S}{\bar{\alpha}S_i} \right)$$

Finalement, on obtient la pression du champ acoustique en présence de l'enceinte.

$$p_{avec}^2 = \frac{\rho_0 c_0}{4\pi r^2} \tau_d w \left(0.3 + \frac{(1-\bar{\alpha})S}{\bar{\alpha}S_i} \right)$$

Ces expressions peuvent maintenant être introduites dans les indices de performances.

La perte par insertion en bandes 1/3 d'octaves

Elle est par définition égale à :

$$IL = 10 \log_{10} \frac{\sum_i |p_{sans}(\omega)|^2}{\sum_i |p_{avec}(\omega)|^2} = 10 \log_{10} \frac{w}{w_T}$$

Vu que lors de la prise des mesures, l'enceinte sera installée sur un support à 1m environ du sol, des matériaux acoustiques seront placés au sol pour minimiser l'effet des réflexions. La mesure de pressions sonores i P sera effectuée aux 5 positions indiquées sur la figure 2. Les points de mesure seront à une distance fixe de 1.5m environ du centre géométrique de l'enceinte.

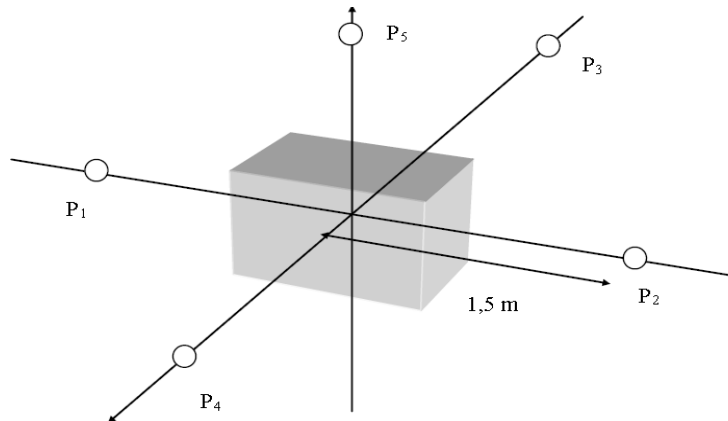


Figure 2 - Emplacement des microphones par rapport au centre de l'enceinte

En remplaçant $|p_{sans}|^2$ et $|p_{avec}|^2$ par leurs valeurs, on obtient :

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{5 |p_{sans}|^2}{5 |p_{avec}|^2} \right)$$

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau_d \left(0.3 + \frac{1 - \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} \right) \frac{S}{S_i}} \right)$$

D'autres hypothèses ont encore été faites afin de simplifier cette expression :

- La surface intérieure S_i (surface des parois et de la source) est équivalente à l'aire de l'enclassement : $\frac{S}{S_i} \cong 1$,
- L'absorbant est identique sur toutes les surfaces des parois. Par conséquent :

$$\frac{1 - \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} = \frac{1 - \alpha}{\alpha}$$

La perte par insertion devient :

$$IL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau_d \left(0.3 + \frac{1 - \alpha}{\alpha} \right)} \right)$$

La transparence acoustique en champ diffus τ_d a été calculée par son expression intégrale :

$$\tau_d(\omega) = 2 \int_0^{2\pi} \tau(\omega, \theta) \cos \theta \sin \theta d\theta$$

où $\tau(\omega, \theta)$ est la transparence acoustique en incidence oblique,

$$\tau(\omega, \theta) = \frac{1}{1 + \frac{\omega^2 \cdot (\mu \cdot \cos(\theta))^2}{(2\rho_0 c_0)^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{coin}} \right)^2 \right]^2}$$

avec $\omega_{coin} = \frac{c_0^2}{(\sin(\theta))^2} \sqrt{\frac{\mu}{D}}$ la pulsation de coïncidence

La perte par insertion globale

Il est l'indicateur permettant de quantifier la performance de l'enclassement sur la bande de fréquences mesurée sera la perte par insertion globale :

$$IL_G = 10 \log_{10} \left(\frac{\int \sum_i |p_{i,sans}(\omega)|^2 d\omega}{\int \sum_i |p_{i,avec}(\omega)|^2 d\omega} \right)$$

Où l'intégration en fréquence sera faite entre 100 Hz et 10 kHz. IL devra être supérieur à 15dB.

En remplaçant les expressions de $|p_{\text{sans}}|^2$ et $|p_{\text{avec}}|^2$ par leurs valeurs, on obtient :

$$IL_G = 10 \log_{10}(\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}) - 10 \log_{10} \left(\int_{\omega} \tau_d \left(0.3 + \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \right) d\omega \right)$$

Indicateur de masse

La métrique finale pour quantifier le compromis entre isolation acoustique et légèreté est définie comme :

$$IL_M = IL - 10 \log_{10}(M^2), \text{ où } M \text{ est la masse de l'encoffrement}$$

2. Implantation numérique

D'abord des données à valeurs arbitraires ont été choisies, à savoir épaisseur du matériau, aussi bien pour une paroi simple que double, et d'un absorbant choisi en se basant sur le modèle de Miki [4]. Puis les expressions analytiques décrites plus haut ont été implémentées sur Matlab (voir Annexe 1) pour pouvoir déterminer le 1^{er} indicateur de performance : la perte par insertion $IL(\omega)$. L'intégration de la transparence acoustique en champ diffus a été réalisée par le biais de la méthode des trapèzes. Cet indicateur n'est pas utilisé pour le choix d'un éventuel matériau. Néanmoins, il sert plutôt à visualiser les plages de fréquence où la perte par insertion sera acceptable.

Pour la perte par insertion globale IL_G qui résulte de la formule analytique décrite dans la section précédente, son expression a été implémentée sous Matlab avec les mêmes données d'entrée. L'intégration des pressions acoustiques en fréquence dans l'expression de IL_G a été effectuée manuellement. Par exemple, pour l'intégrale au dénominateur définie par :

$$D = \int \sum_i |p_{i,\text{avec}}(\omega)|^2 d\omega,$$



Elle peut être approximée comme sur la Figure 3. L'intégrale est obtenue en sommant les aires A1, A2 et A3.

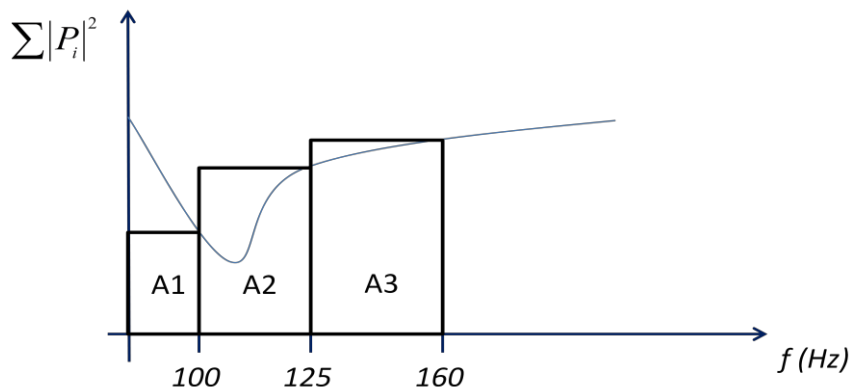


Figure 3 - Approximation du calcul intégral par la méthode des aires

Quant au 3^{ème} indicateur IL_M , l'expression analytique qui lui est associée a été implémentée en ayant comme données d'entrée : les masses volumiques de l'isolant et de l'absorbant et le volume de l'encoffrement. Pour le choix de ce dernier, il a d'abord été remarqué que l'expression analytique de la perte par insertion ne dépend plus des dimensions de l'encoffrement. Par conséquent la masse peut être diminuée en choisissant le volume minimal qui est défini par les dimensions du haut-parleur.

Les dimensions de l'encoffrement interviennent aussi dans les modes de cavité de l'encoffrement. Leurs fréquences d'apparition sont dictées par l'équation suivante :

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$$

Où :

- f_n : n^{ème} fréquence du mode de cavité (en Hz)
- n_x, n_y, n_z : entiers qui peuvent être choisis séparément. Ils peuvent prendre des valeurs entre 0 et l'infini
- l_x, l_y, l_z : dimensions de l'encoffrement en m
- c : vitesse du son dans l'air (en m/s)

Ainsi les fréquences de résonances augmentent avec la diminution des dimensions. Cela justifie encore plus le choix de réaliser un encoffrement de volume minimal.

Les dimensions du haut-parleur étant inférieures à 30cm et le volume maximal étant imposé à 1m³, un compromis a été fait en choisissant un encoffrement cubique de côté 50cm pour la modélisation. De façon plus pratique, en ajoutant l'épaisseur de l'absorbant supposée entre 1 et 4cm et celle de l'isolant supposée entre 1 et 2cm, il reste à l'intérieur de l'encoffrement une cavité d'environ 40cm³. Ce volume est assez étroit pour insérer le haut-parleur.

Avec ces dimensions, la fréquence du 1^{er} mode peut être calculée. Ce qui revient à $n = n_x = n_y = n_z = 1$, on a alors $f_1 = 588$ Hz.

3. Choix du type de paroi (simple ou double) et des matériaux (absorbant et isolant)

Afin de choisir l'absorbant et l'isolant adéquats, les scripts Matlab ont été utilisés pour calculer les paramètres IL_M , IL_G et M_{TOT} (masse totale de l'encoffrement). Les résultats de calculs sont présentés dans l'Annexe 2 et l'Annexe 3.

En premier lieu, les matériaux absorbants dont le prix est convenable ont été choisis, c'est-à-dire la laine de verre, la laine de roche, la mousse polyuréthane. Pour chaque absorbant, les divers paramètres ont été calculés pour le cas d'une simple paroi et pour celui d'une double paroi.

Dans le cas d'une simple paroi, l'isolant acoustique fixé est le bois MDF. On fait varier l'épaisseur de l'absorbant parmi les valeurs 1cm, 2cm et 3cm. Pour chaque épaisseur différente d'absorbant, l'épaisseur de l'isolant a été variée à 1cm, 2cm et 3cm.

Les valeurs correspondantes de IL_G sont ainsi comparées pour choisir le meilleur absorbant. Le matériau choisi finalement après cette comparaison était la laine de verre.

L'absorbant étant choisi, on fait varier la nature de l'isolant parmi les matériaux suivants (bois MDF, cèdre, gypse, Novapan). On remarque que le meilleur IL_G correspond au bois MDF.

Ainsi dans le cas d'une simple paroi, le meilleur absorbant est la laine de verre et le meilleur isolant est le bois MDF.

Dans le cas d'une double paroi, on fixe le bois MDF comme isolant externe, son épaisseur est de 1.3cm. Les isolants internes testés sont le bois MDF, le cèdre, le gypse ainsi que le Novapan. Les épaisseurs ont été variées parmi les valeurs 1cm, 2cm et 3cm et ce pour chaque épaisseur d'absorbant sonore.

On remarque qu'avec notre modèle Matlab, **le cas d'une simple paroi n'est pas vraiment différent du cas double paroi**. Pour faciliter la conception et en tenant compte du budget, c'est la simple paroi qui a été choisie.



Les paramètres des matériaux comparés sont présentés

Tableau 1 et Tableau 2.

Propriétés Des isolants	Bois MDF	Planche de gypse	Bois de cèdre	Novapan
Module d'Young (Pa)	$3 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^9$	$10,1 \cdot 10^9$	$2,05 \cdot 10^9$
Masse volumique (kg/m^3)	710	1000	490	700
Coefficient de poisson	0.33	0.3	0.3	0.3

Tableau 1 - Propriétés mécaniques des isolants testés

Propriétés des absorbants	Mousse polyuréthane	Laine de verre	Laine de roche		Mélatamine
Résistivité (Pa.s.m^{-2})	20000	32000	17000	27000	10000
Masse volumique (kg/m^3)	40	25	45	60	1.6

Tableau 2 – Propriétés des absorbants testés

II. Concept et données techniques

Après avoir choisi les matériaux adéquats pour notre encoffrement, le site de RONA a été consulté puis un employé a été contacté pour voir les matériaux et les épaisseurs disponibles. Une liste de prix munie des produits qui lui est associés a été fournie. Et ce, en vue de respecter le budget réservé à chaque projet limité à 100 \$. Comme matériau absorbant, la laine de verre a été choisie initialement après les calculs analytiques mais c'est la fibre de verre qui a été finalement utilisée (Figure 4). Son épaisseur a été fixée à 30mm. Pour chaque face, des sections carrées de 415mm *415mm ont été coupées. Concernant l'isolation acoustique, le choix s'est porté sur le bois MDF. Son épaisseur est de 12.5mm. Ceci est illustré dans la Figure 5.

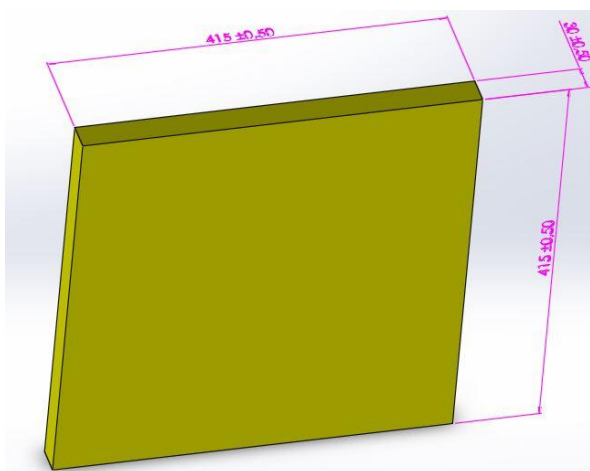


Figure 4 - Fibre de verre

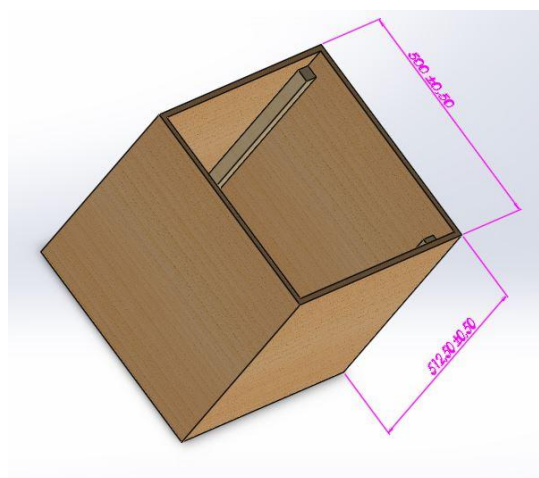


Figure 5 - Parois en bois MDF

Le grillage de poules (Figure 6) a été employé pour serrer la fibre de verre contre les parois de l'encoffrement. Le grillage a été attachée par des clous sur du bois de construction « Épinette ». Les bouts de bois Épinette sont de dimensions 445mm *30mm*30mm (Figure 7).

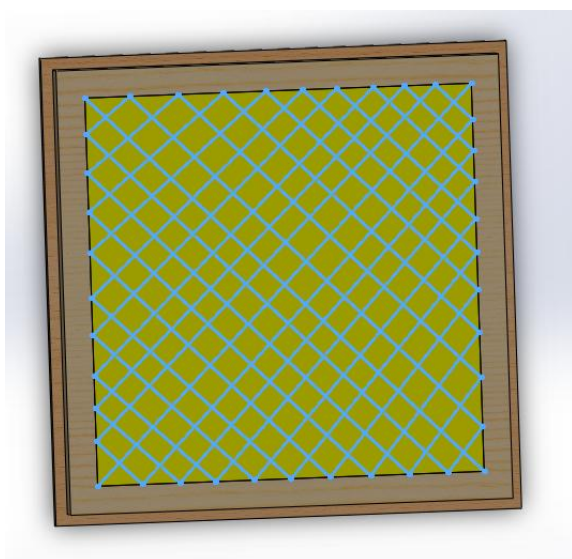


Figure 6 - Grillage de poules

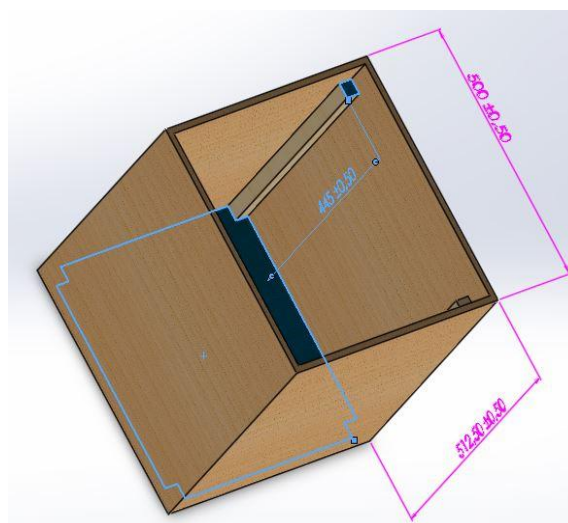


Figure 7 - Bois épinette

En effet, 8 bouts de bois épinette (Figure 8) ont été utilisés au niveau des arêtes se trouvant entre les plaques de bois MDF dans la partie inférieure de l'encoffrement. Ces bouts sont utiles pour fixer les plaques et contenir la fibre de verre comme c'est illustré sur la Figure 9.

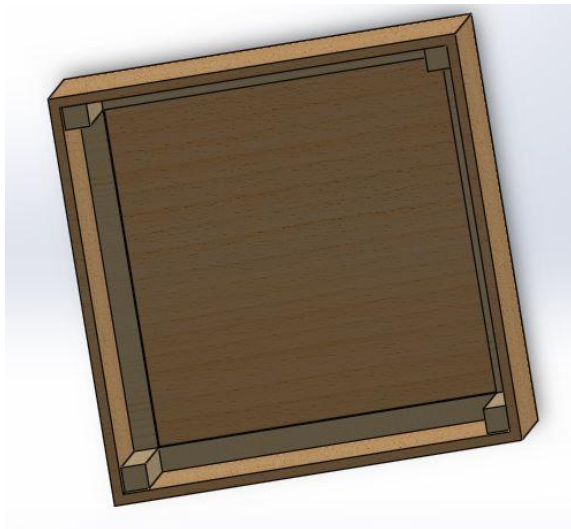


Figure 8 - Bouts de bois épinette

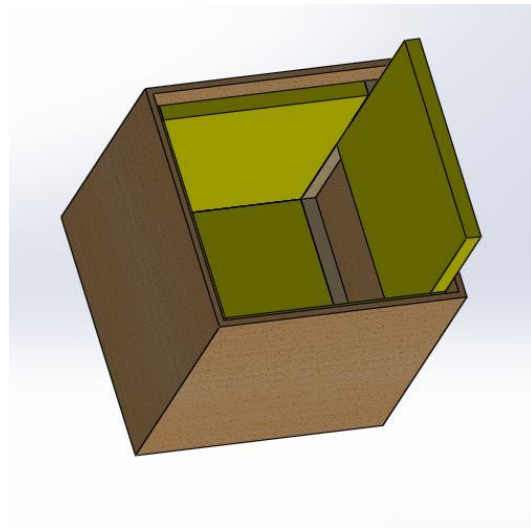


Figure 9 - Fibre de verre dans l'encoffrement

Pour les fuites acoustiques, la mousse de néoprène (Figure 10) muni d'un arrière adhésif a été appliquée sur le contour du toit de l'encoffrement (Figure 11).

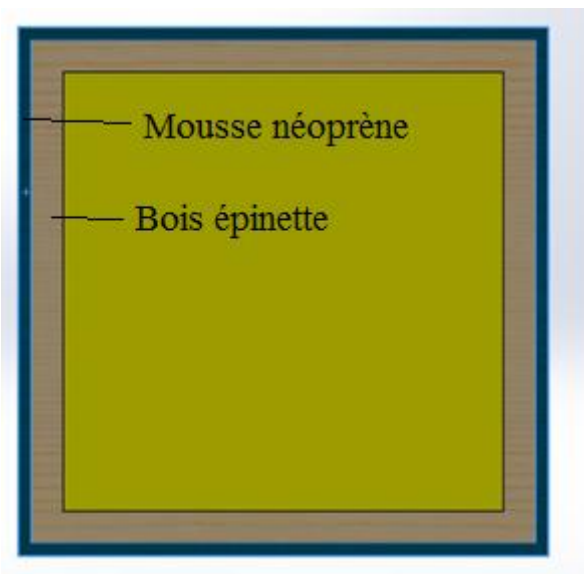


Figure 10 - Mousse de néoprène

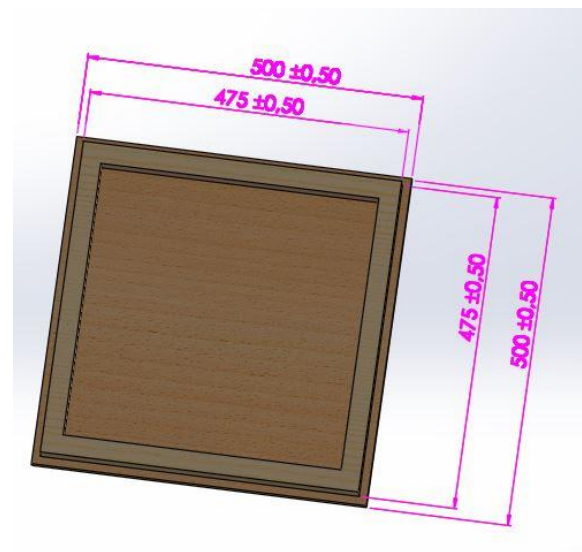


Figure 11 - Toit de l'encoffrement

Le joint de silicone a été mis sur toutes les petites faces d'épaisseur 12.5mm se trouvant entre les plaques en bois MDF. Les verrous (Figure 13) ont été utilisés pour serrer le toit de l'encoffrement (Figure 12) et éviter les fuites acoustiques par ces ouvertures.

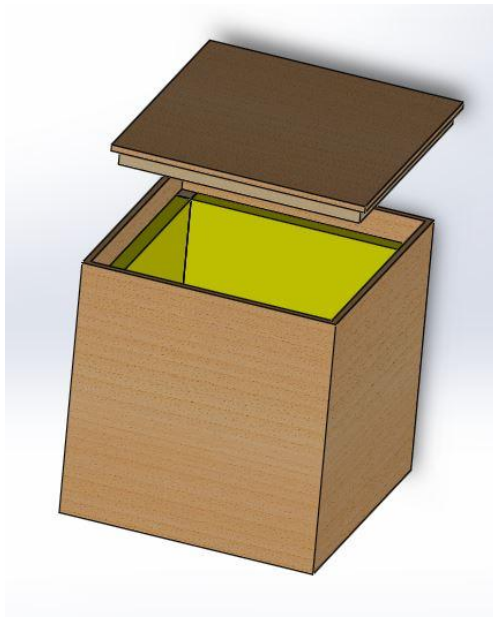


Figure 12 - Encoffrement avant de mettre les verrous

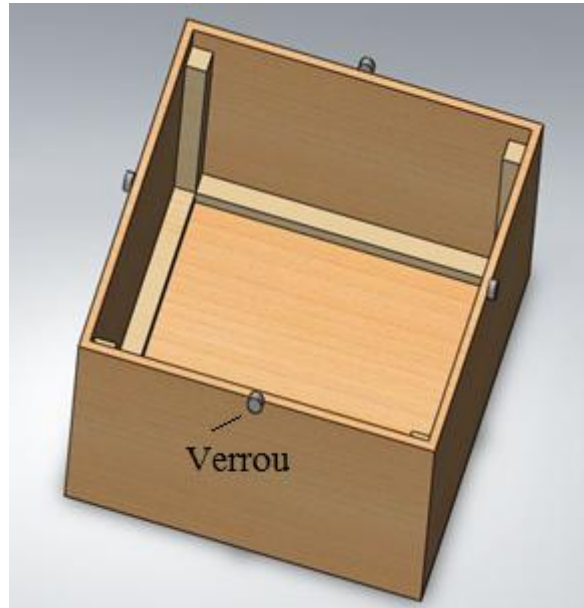


Figure 13 - Partie inférieure de l'encoffrement

III. Résultats de mesure de performance :

1. Tests préliminaires

Au fur et à mesure de sa fabrication, plusieurs tests expérimentaux ont été effectués afin d'évaluer l'impact de chaque solution technologique sur les performances de l'encoffrement.

1^{ère} série : encoffrement initial

La 1^{ère} série s'est faite pour l'encoffrement initial composé de :

- La paroi simple en bois MDF
- La fibre de verre
- Les poutres en bois permettant la fixation des parois et du grillage
- La mousse de néoprène
- Le grillage de poule
- Les vis de fixation

Elle a été réalisée dans la chambre semi-anéchoïque. L'instrumentation de mesures a été empruntée au laboratoire LCMA et était composée de :

- 2 microphones ICP non polarisés 5V, câbles BNC

- Un système d'acquisition : carte d'acquisition, logiciel « analyseur » pour tube d'impédance (Figure 15)
- Un haut-parleur de tube d'impédance (Figure 14) et son amplificateur



Figure 14 - Tests préliminaires, encoffrement initial



Figure 15 - Tests préliminaires, système d'acquisition

Le niveau de pression SPL_{micro} a été mesuré par un micro positionné latéralement à 1.5m du haut-parleur. Les tests ont d'abord été réalisés avec puis sans encoffrement. Le niveau de pression (SPL) a ensuite été évalué visuellement sur le logiciel « Analyseur » pour différents niveaux de pression de la source et avec un bruit blanc [500;6500] Hz. Finalement la perte par insertion a été calculée suivant la formule suivante :

$$IL = 20 \log_{10} \left(\frac{10^{\frac{SPL_{micro \text{ min sans}}}{20}}}{10^{\frac{SPL_{micro \text{ max avec}}}{20}}} \right)$$

Les résultats sont donnés dans le Tableau 3.

SPL _{source} (dB re 20 µPa)	Plage de SPL _{micro} (dB re 20µPa)		IL _G (dB)
	Avec	Sans	
80	63.9-68	75-76.4	7
85	66-73	80.9-81	7.9
90	69-71	86.1-86.2	15.1
95	72.1-74	91.1-91.3	17.1
100	77.9-78.2	96.2-96.4	18
105	82.5-82.7	100.9-101.1	18.2
110	86.1-86.3	105.9-106.0	19.6
115	86.2-86.4	106.2-106.5	19.8

Tableau 3 - Mesures SPL, encoffrement initial

On constate que la perte par insertion mesurée varie en fonction du SPL de la source. Cette variation devient plus faible pour $SPL_{source} > 90dB$. Cela peut être du à la sensibilité des micros qui sont normalement adaptés à la mesure en tube de Kundt, de même pour le type de haut-parleur. Le IL_G mesuré à $SPL_{source} = 90dB$ étant 24% plus important que celui mesuré à $SPL_{source} = 115dB$, l'incertitude des mesures reste importante. De plus, ces valeurs restent proches de la limite inférieure de 15dB à respecter. Nous avons donc voulu comparer les performances de l'encoffrement en regardant l'impact d'un nouvel absorbant.



2^{ème} série : influence de l'absorbant

La fibre de verre achetée étant avant tout utilisée pour une isolation thermique qu'acoustique, un absorbant acoustique usuel a été testé. Une couche de mélamine, provenant de chutes du laboratoire du GAUS et d'épaisseur 4mm, a été superposée à celle de la fibre de verre (Figure 16). Les tests ont été effectués suivant le même procédé expérimental que la 1^{ère} série mais uniquement pour $SPL_{source} = \{80,90,105\} dB$. Les résultats sont donnés dans le Tableau 4.

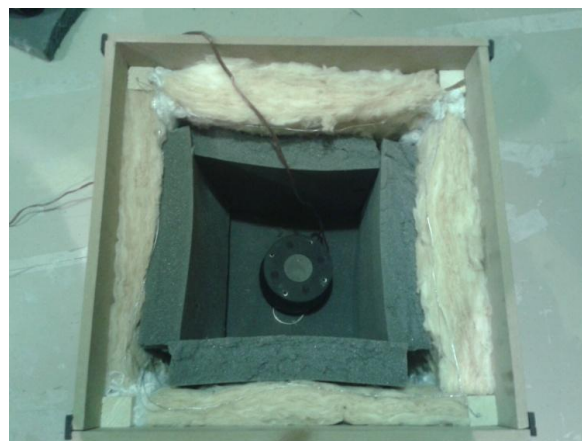


Figure 16 - Tests préliminaires, ajout d'une couche de mélamine

SPL _{source} (dB re 20 µPa)	Plage de SPL _{micro} (dB re 20µPa)		IL _G (dB)	
	sans mélamine (résultats 1 ^{ère} série)	avec mélamine	sans mélamine (résultats 1 ^{ère} série)	avec mélamine
80	63.9-68	67-70	7	5
90	69-71	68-71	15.1	15.1
105	82.5-82.7	82.5-82.7	18.2	18.2

Tableau 4 - Mesures de SPL, comparaison sans et avec mélamine

Les IL_G mesurés avec et sans mélamine sont pratiquement identiques. L'ajout de la mélamine n'améliore donc pas les performances de l'encoffrement. Cependant de nouveau, l'incertitude des mesures reste importante en regard du procédé expérimental utilisé (évaluation de SPL_{micro} à l'œil nu, micros adaptés pour le tube de Kundt, bruit ambiant...). La mélamine a été retirée et nous nous sommes penchés sur la détection et la réduction des fuites acoustiques.

3^{ème} série : évaluation et amélioration de l'étanchéité

Les principales fuites acoustiques possibles sont les espaces entre les parois de l'isolant suite à l'assemblage (surfaces non planes, montage pas assez serré), ceux entre le capot de fermeture et la partie principale et celui créé par le passage des câbles du haut-parleur. Pour la 1^{ère}, les parois ont été légèrement dévissées et du joint de silicone a été introduit dans l'interstice créé. Pour les 2 dernières, un verrou a été rajouté pour chaque côté de l'encoffrement afin de comprimer uniformément la mousse de néoprène et assurer l'étanchéité. En effet, lors des tests préliminaires, il a été observé que les diamètres des câbles du haut-parleur étaient suffisamment petits pour qu'ils compriment la mousse de néoprène et n'empêchent pas la fermeture de l'encoffrement.

Cette 3^{ème} et dernière série de tests ayant été faite un jour différent, l'instrumentation des 2^{èmes} séries n'était pas disponible et un autre dispositif expérimental a été utilisé. Il était composé de :

- Un haut-parleur Brüel & Kjaer unidirectionnel d'environ 20*50cm,
- relié à une source d'alimentation « Sound Power Type 4205 » Brüel & Kjaer délivrant un bruit blanc [100;10000] Hz
- Un sonomètre Piccolo, mesurant le SPL en pondération C

La principale différence avec les 2^{èmes} séries de test était que le diamètre du câble d'alimentation du haut-parleur était plus grand que l'épaisseur de la mousse de néoprène. Celle-ci ne pouvait donc plus assurer l'étanchéité et les verrous n'ont pas pu être tous fermés.

Pour mesurer l'impact de cette fuite, une 2^{ème} mesure a été faite en champ proche en déplaçant le micro autour de l'encoffrement et en observant les variations de SPL_{micro} . Pour un $SPL_{source} = 100dB \text{ re } 1pW$, il a été noté qu'il variait peu autour des arêtes où le joint d'étanchéité avait été rajouté. En revanche sa valeur augmentait de 6 à 9dB à proximité de l'ouverture créée par le câble du haut-parleur.

Le sonomètre a été placé de même à 1.5m latéralement par rapport à la source. Le SPL mesuré au micro a été relevé en notant la valeur moyenne approximative affichée sur 5s. Le IL a été déduit de façon identique aux 2^{èmes} séries. Enfin, les mesures ont aussi été réalisées dans la chambre semi-anéchoïque. Elles sont présentées Tableau 5.

SPL _{source} (dB re 1pW)	SPL _{micro} (dB pond. C)		IL _G (dB)
	Avec	Sans	
0 (bruit ambiant)	34		
50	34.4	38.2	3.8
60	35.3	46	10.7
70	38.8	55.7	16.9
80	46.7	65.3	18.6
90	55.4	75.5	20.1
100	65.5	85.4	19.9

Tableau 5 - Tests préliminaires série 3, amélioration de l'étanchéité

Au final, la remarque est identique concernant la variation de IL en fonction de la puissance de la source. A $SPL_{source} = 50dB$, la sensibilité du sonomètre Piccolo n'est pas assez grande pour distinguer le bruit du haut-parleur au bruit ambiant. En revanche, le IL semble se stabiliser pour $SPL_{source} > 90dB$. En comparant avec les valeurs correspondantes du Tableau 3, on note une augmentation du IL de 25% pour $SPL_{source} = 90dB$ et de 9.6% pour $SPL_{source} = 100dB$. Il est conclu que cette dernière série de mesure comporte moins d'incertitudes et permet de montrer un gain net en isolement en améliorant l'étanchéité.

2. Évaluation finale

Les mesures finales ont été réalisées dans la chambre semi-anéchoïque avec $SPL_{source} = 85 - 90dB$ re $20\mu Pa$ et 5 micros à 1.5m de l'encoffrement (Figure 17).

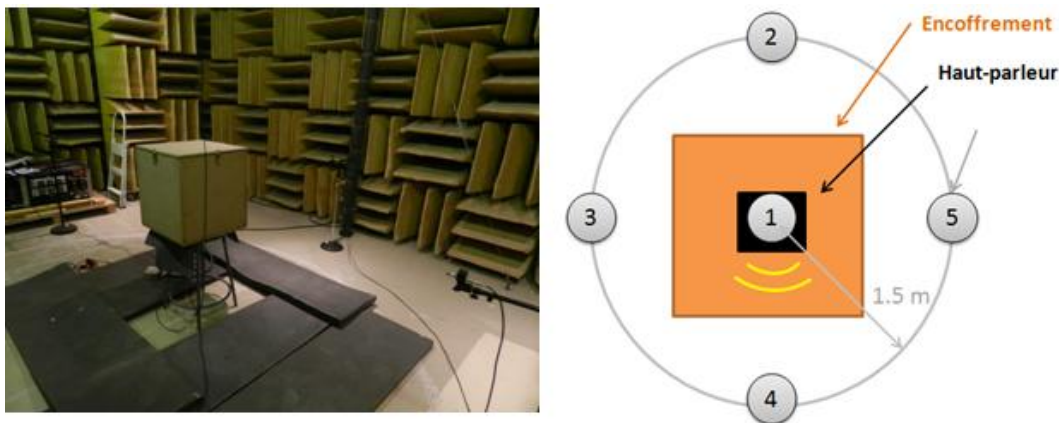


Figure 17 - Évaluation finale, dispositif expérimental

Les mesures relevées dans le fichier Excel permettent de tracer le SPL en pression par bande de tiers d'octave pour chaque micro, avec et sans encoffrement (Annexe 5). Les mesures n'étant pas fiables en hautes fréquences, toutes les courbes expérimentales ont été tracées sur

la plage de fréquence [100;3150] Hz. L'indicateur $IL(\omega)$ a été tracé Figure 18 (script Matlab en Annexe 2).

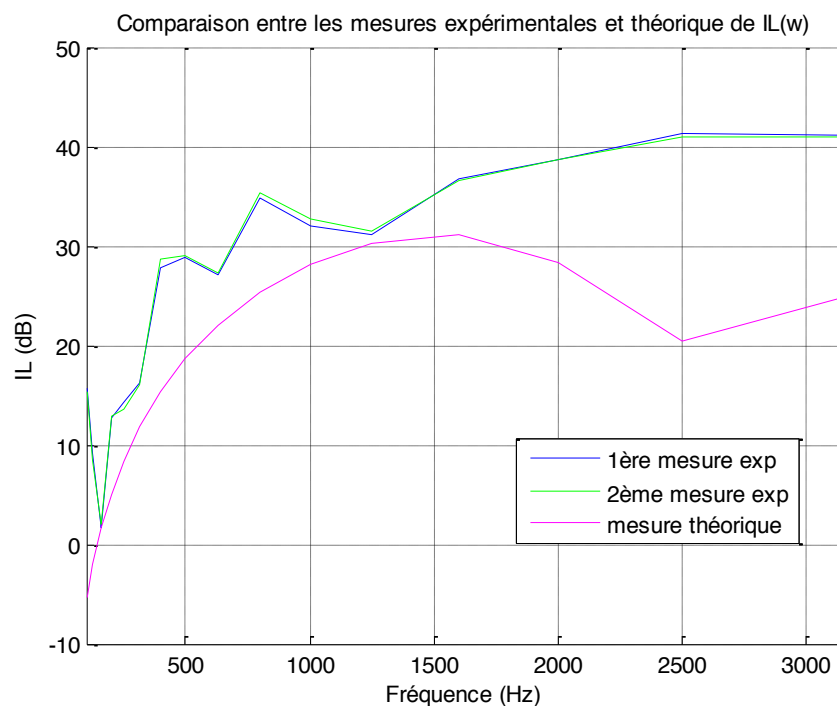


Figure 18 - Comparaison entre mesures expérimentales (micro 4) et modèle de prédiction pour $IL(\omega)$

Les indicateurs IL_G et IL_M pour les mesures expérimentales (script Matlab en Annexe 6) et le modèle de prédiction sont comparés Tableau 6.

	Mesures expérimentales		Modèle de prédiction
	Mesure 1	Mesure 2	
IL (dB)	32.65	32.65	19.91
IL_M (dB)	8.53	8.53	3.78

Tableau 6 - Comparaison entre mesures expérimentales et modèle de prédiction pour IL et IL_M

IV. Discussion des résultats

En se basant sur la Figure 18, on peut remarquer que les allures des courbes expérimentales et théoriques sont assez similaires pour la plage fréquentielle [0; 1500] Hz. Néanmoins les courbes divergent pour les fréquences supérieures. De manière générale, la perte par insertion est sous-estimée tout au long du domaine fréquentiel. Ces différences peuvent être dues aux :

- Approximations théoriques prises en considération (hypothèses du modèle, approximation numérique...)
- Incertitudes expérimentales (conditions des mesures, imperfections causées par la fabrication manuelle...)

1. Approximations théoriques

- ✓ La méthode trapézoïdale est une méthode approximative pour calculer numériquement l'intégrale de la transparence en champ diffus.
- ✓ Dans le modèle de prédiction, le haut-parleur a été considéré comme une source omnidirectionnelle alors qu'en réalité le haut-parleur a une directivité prononcée. Ceci implique que la pression acoustique calculée aux 5 haut-parleurs est identique alors qu'en réalité la différence de pression acoustique mesurée à l'arrière et à l'avant est d'environ 10 dB. En effet, la membrane de la source sonore est contenue dans une enceinte acoustique, le haut-parleur est une source bafflée.
- ✓ Dans le modèle de prédiction, les bouts de bois en épinette ne sont pas pris en compte. En fait, ces derniers contribuent implicitement à améliorer l'isolation de l'encoffrement (plus d'épaisseur donc plus d'isolation).
- ✓ La surface du haut-parleur a été négligée par rapport à la surface totale des parois de l'encoffrement dans le modèle de prédiction.
- ✓ Dans le modèle de prédiction acoustique, le comportement de l'absorbant est modélisé par le modèle de Miki, qui est aussi valable selon certaines hypothèses. Il dépend de la résistivité et de l'épaisseur. Or la fibre de verre achetée a été comprimée pour respecter les 3cm d'épaisseur et n'a donc plus les mêmes propriétés d'absorption.
- ✓ En basses fréquences, la laine de verre a un coefficient d'absorption sensiblement inférieur à 1, ce qui justifie les valeurs médiocres de perte par insertion obtenues en basses fréquences.
- ✓ Les modes de cavités ne sont pas pris en compte dans le modèle de prédiction acoustique.

2. Incertitudes expérimentales

- ✓ De la laine de verre a été ajoutée pour combler les parties creuses de la fibre de verre. La laine de verre est malléable et peut s'insérer facilement à travers le grillage de poule. L'absorbant n'est plus uniforme et les propriétés d'absorption acoustique sont donc modifiées.
- ✓ Le modèle de prédiction ne tient pas compte des fuites acoustiques qui peuvent être créés dans la fabrication de l'encoffrement réel. L'ouverture entre les plaques de bois

lors de la mise en place des câbles du haut-parleur crée une fuite acoustique supplémentaire. De la laine de verre a été ajoutée pour obturer l'ouverture.

- ✓ Il existe des imperfections au niveau des matériaux (épaisseur variable). De plus, les propriétés mécaniques (module de Young, masse volumique, coefficient de Poisson, résistivité...) des matériaux achetés peuvent différer de ceux entrés dans le modèle de prédiction.
- ✓ Des éléments de mélamine ont été posés sur le sol pour limiter les réflexions de la chambre semi-anéchoïque. Néanmoins, une grande partie du sol n'en est pas recouverte. Elle se comporte comme une surface rigide qui réfléchit les ondes émises par le haut-parleur. Les ondes émises par le haut-parleur sont aussi réfléchies par les objets présents (individus, matériel) dans la salle. Le niveau de pression mesurée expérimentalement est donc surestimé.
- ✓ Les microphones ont une certaine sensibilité qui peut être source d'erreur. Ils fournissent des valeurs de pression qui sont légèrement variables pour chaque fréquence. Une calibration en amplitude a dû être réalisée pour tenir compte des erreurs de pressions fournies par les microphones. En revanche, le modèle de prédiction les considère comme parfaits.
- ✓ Même si la mousse de néoprène et le joint de silicone ont été utilisés pour optimiser l'étanchéité et étant donné la fabrication manuelle de l'encoffrement, des fuites restent présentes.
- ✓ La fixation des verrous sur le bois MDF a créé des fissures au niveau de l'épaisseur qui diminue les propriétés d'isolation du matériau.



Conclusion

L'encoffrement fabriqué satisfait les contraintes imposées. En effet, l'indice de performance global IL_G mesuré lors de l'évaluation finale est de 32.65dB. Il est donc supérieur à 15dB. Le modèle de prédiction de $IL(\omega)$ simule bien les mesures expérimentales sur la bande fréquentielle désirée, en particulier en basses fréquences où les valeurs de IL sont les plus critiques pour notre conception. Certes il existe des différences entre le modèle numérique et les mesures expérimentales mais les sources d'erreurs qui ont engendré les points de divergence ont été cernées. Sans la limitation de budget, d'autres solutions technologiques auraient pu être mises en place pour améliorer les performances acoustiques tout en gardant une masse minimale. On aurait pu avoir recours à la mélamine (solution d'absorbant), la masse bitumineuse (solution d'isolant).

Annexe 1

Calcul de IL_G , IL_M , M_{tot} pour la simple paroi en bande de tiers d'octave

```
function [ ILG,ILM,Mtot ] = IL_calcul_tiers_octave_simple_paro(
epaisseur,rhoabs,sigma,h,rho,E,nu )
% Calcule le critère IL à partir du ILOmega en bande de tiers d'octave
%% Données du problème
% Domaine acoustique
c0=340;
rho0=1.2;
% Absorbant
% rhoabs=25; % masse volumique laine de verre
% epaisseur=0.02; % épaisseur absorbant
% sigma=32000; % résistivité absorbant

% Isolant
% rho=710; % pour bois MDF
% E=3e9; % pour bois MDF
% nu=0.33; % pour bois MDF
% h=0.03; % épaisseur de la paroi
D=(E*h^3)/(12*(1-nu^2));
mu=rho*h;
%% Donnée pour intégration
theta=1e-6:pi/40000:pi/2;
%% Transparence en champ diffus
f_tiers_octave=[100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000
2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000];
wcoin=(c0./sin(theta)).^2*sqrt(mu/D);
% fmin=100;
% fmax=10000;
% pas=10;
% nbfreq=(fmax-fmin)/pas;
taud=zeros(1,length(f_tiers_octave));
for i=1:length(f_tiers_octave)
    w=2*pi*f_tiers_octave(i);
    tau=1./(1+((w*mu*cos(theta))/(2*rho0*c0)).*(1-(w./wcoin).^2)).^2);
    I=2*tau.*cos(theta).*sin(theta);
    taud(1,i)=trapz(theta,I);
end
%% Indice d'affaiblissement en champ diffus
Rd=10*log10(1./taud);
% semilogx(f_tiers_octave,Rd);
% grid on;
% xlabel('Fréquence [Hz]');
% ylabel('R_d [dB]');
% title('Transparence acoustique en champ diffus pour une paroi en MDF');
%fcrit=c0^2/(2*pi)*sqrt(mu/D);
%% Coefficient d'absorption
a=0.0699;
b=-0.632;
c=0.107;
d=-0.632;
p=0.160;
q=-0.618;
r=0.109;
s=-0.618;
w=2.*pi.*f_tiers_octave;
R=rho0*c0.*(1+a.*((f_tiers_octave/sigma).^b));
X= -rho0*c0.*(c.*((f_tiers_octave/sigma).^d));
```

```

alph=(w./c0).*p.*((f_tiers_octave/sigma).^q);
beta=(w./c0).* (1+r.*((f_tiers_octave/sigma).^s));
Zc=R+1i.*X;
K=alph+1i.*beta;
Zs=Zc.*coth(K.*epaisseur);
R=((Zs./(rho0*c0))-1)./((Zs./(rho0*c0))+1);
alpha=1-abs(R).^2;
% plot(f_vec, alpha);
% title('Coefficient d'absorption d'un matériau fibreux-modele de Miki-
épaisseur=20mm');
% xlabel('fréquence(Hz)');
% ylabel('coefficient d'absorption');
%% Insertion Loss IL(omega)
figure(1)
IL=Rd-10*log10(0.3+(1-alpha)./alpha);
semilogx(f_tiers_octave,IL);
grid on;
xlabel('Fréquence [Hz]');
ylabel('IL(\omega) [dB]');
title('IL(\omega) pour une paroi en MDF');
%% Critère IL global
N=10000-100;
J=taud.*((1-alpha)./alpha);
Dtot=0;
for i=1:(length(f_tiers_octave)-1)
    D=J(i+1)*(f_tiers_octave(i+1)-f_tiers_octave(i));
    Dtot=Dtot+D;
end
ILG=10*log10(N./Dtot);
%% Masse globale
% Dimensions du haut-parleur
% Hhp=0.215;
% Lhp=0.146;
% Php=0.159;
% Absorbant
Labs=0.5;
Mabs=6*(Labs^2*epaisseur+epaisseur^2)*rhoabs;
% Parois de l'isolant
L=Labs+2*epaisseur;
M=6*L^2*h*rho;
% Total
Mtot=Mabs+M;
ILM=ILG-10*log10(Mtot)^2;
end

```

faire avec
trapeze

Calcul de IL_G , IL_M , M_{tot} pour la double paroi en bande de tiers d'octave

```

function
[ILG,ILM,Mtot]=IL_calcul_tiers_octave_double_paroι(hint,rhoιnt,Eιnt,nuιnt,e
,rhoabs,sigma,hext,rhoext,Eext,nuext)
%% Données du problème
% Paroi intérieure
% rhoιnt=1250; % masse volumique plaque de gypse
% hint=0.01; % épaisseur plaque
% Eιnt=580e3; % module de Young plaque de gypse
% nuιnt=0.3; % coefficient de Poisson plaque de gypse
muιnt=rhoιnt*hint; % masse surfacique
Dιnt=(Eιnt*hint^3)/(12*(1-nuιnt^2)); % rigidité de flexion
% Absorbant dans la cavité
% rhoabs=25; % masse volumique laine de verre
epaisseur=e; %épaisseur absorbant

```



```

% sigma=32000; % résistivité laine de verre
% Paroi extérieure
% rhoext=710; % masse volumique bois MDF
% hext=0.01; % épaisseur plaque
% Eext=3e9; % module de Young bois MDF
% nuext=0.33; % coefficient de Poisson bois MDF
muext=rhoext*hext; % masse surfacique
Dext=(Eext*hext^3)/(12*(1-nuext^2)); % rigidité de flexion

% Données globales
c0=340; % vitesse du son dans l'air
%theta=pi/6; % angle d'incidence
%e=5e-2; % épaisseur de la cloison
rho0=1.2; % masse volumique de l'air

%% Transparence en champ diffus
f_tiers_octave=[100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000
2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000];
thetamin=0;
thetapas=pi/1000;
thetamax=pi/2;
theta_vec=thetamin:thetapas:thetamax;
A=zeros(6,length(theta_vec));
tau=zeros(1,length(theta_vec));
taud=zeros(1,length(f_tiers_octave));
for j=1:length(f_tiers_octave)
    i=1;
    for theta=thetamin:thetapas:thetamax
        omega=2*pi*f_tiers_octave(j); % pulsation temporelle des ondes
        k=omega/c0; % nombre d'onde des ondes acoustiques
        kx=k*cos(theta); % projeté sur x
        ky=k*sin(theta); % projeté sur y
        B=[-1 1 1 0 -muext*omega^2+Dext*ky^4 0;
            0 -exp(1j*kx*e) -exp(-1j*kx*e) exp(1j*kx*e) 0 -
muext*omega^2+Dext*ky^4;
            1j*kx 0 0 0 rho0*omega^2 0;
            0 1j*kx -1j*kx 0 -rho0*omega^2 0;
            0 1j*kx*exp(1j*kx*e) -1j*kx*exp(-1j*kx*e) 0 0 -rho0*omega^2;
            0 0 0 1j*kx*exp(1j*kx*e) 0 -rho0*omega^2];
        C=[1;0;1j*kx;0;0;0];
        A(:,i)=B\C;
        tau(i)=abs(A(4,i)).^2;
        i=i+1;
    end
    I=2*tau.*cos(theta_vec).*sin(theta_vec);
    taud(1,j)=trapz(theta_vec,I);
end
%% Indice d'affaiblissement en champ diffus
Rd=10*log10(1./taud);
% figure(1)
% semilogx(f_tiers_octave,Rd,'g');
% grid on;
% xlabel('Fréquence [Hz]');
% ylabel('R_d [dB]');
% title('Indice d'affaiblissement en champ diffus pour une double paroi
gypse/MDF');
%% Coefficient d'absorption
a=0.0699;
b=-0.632;
c=0.107;
d=-0.632;

```

```

p=0.160;
q=-0.618;
r=0.109;
s=-0.618;
w=2.*pi.*f_tiers_octave;
R=rho0*c0.*(1+a.*((f_tiers_octave/sigma).^b));
X= -rho0*c0.*(c.*((f_tiers_octave/sigma).^d));
alph=(w./c0).*p.*((f_tiers_octave/sigma).^q);
beta=(w./c0).* (1+r.*((f_tiers_octave/sigma).^s));
Zc=R+1i.*X;
K=alph+1i.*beta;
Zs=Zc.*coth(K.*epaisseur);
R=((Zs./(rho0*c0))-1)./((Zs./(rho0*c0))+1);
alpha=1-abs(R).^2;
% plot(f_tiers_octave, alpha);
% title('Coefficient d'absorption d'un matériau fibreux-modele de Miki-
épaisseur=20mm');
% xlabel('fréquence(Hz)');
% ylabel('coefficient d'absorption');
%% Insertion Loss IL(omega)
figure(2)
IL_omega=Rd-10*log10(0.3+(1-alpha)./alpha);
semilogx(f_tiers_octave,IL_omega);
grid on;
xlabel('Fréquence [Hz]');
ylabel('IL(\omega) [dB]');
title('IL(\omega) pour une double paroi en gypse/MDF');
%% Critère IL global
N=10000-100;
J=taud.*(0.3+(1-alpha)./alpha);
Dtot=0;
for i=1:(length(f_tiers_octave)-1)
    D=J(i+1)*(f_tiers_octave(i+1)-f_tiers_octave(i));
    Dtot=Dtot+D;
end
ILG=10*log10(N./Dtot);
%% Fréquences importantes
%fresp=1/(2*pi)*sqrt((rhooint*hint+rhoext*hext)/(rhooint*hint*rhoext*hext)*(r
ho0*c0^2)/(e*cos(theta)^2));
% fmodEint=c0/(2*e);
%% Masse globale
% Dimensions du haut-parleur
% Hhp=0.215;
% Lhp=0.146;
% Php=0.159;
% Parois intérieures
Lint=0.3;
Mint=6*Lint^2*hint*rhooint;
% Absorbant dans cavité
Labs=Lint;
Mabs=6*(Labs^2*e+e^2)*rhoabs;
% Parois extérieures
Lext=Lint+2*e;
Mext=6*Lext^2*hext*rhoext;
% Total
Mtot=Mint+Mabs+Mext;
ILM=ILG-10*log10(Mtot)^2;
end

```



Annexe 2

Calcul de prédiction des performances pour choix de la conception simple paroi/double paroi puis des matériaux

Avec absorbant : mousse polyuréthane

MDF simple paroi

Epaisseur (m)	Hint (m)	Simple paroi		
		ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	9.76	5.37	4.6
	0.02	13.8	5.75	8.96
	0.03	15.37	2.72	13.33
0.02	0.01	14.16	8.74	5.45
	0.02	18.5	8.18	10.4
	0.03	20.3	6.25	15.3
0.03	0.01	17.28	10.8	6.4
	0.02	21.8	10.2	11.9
	0.03	23.8	8.35	17.4

MDF +Gypse

Epaisseur (m)	Hint (m)	Hext (m)	Double paroi		
			ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	0.013	11.96	0.86	11.31
	0.02		13.77	-1.19	16.71
	0.03		15.79	-2.29	22.11
0.02	0.01	0.013	14.40	2.49	12.33
	0.02		17.27	1.68	17.73
	0.03		18.36	-0.25	23.13
0.03	0.01	0.013	16.51	3.77	13.44
	0.02		19.43	3.17	18.84
	0.03		21.50	2.33	24.24

MDF +cèdre

Epaisseur (m)	Hint (m)	Hext (m)	Double paroi		
			ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	0.013	11.67	2.98	8.56
	0.02		12.06	1.05	11.2
	0.03		12.36	-0.67	13.85
0.02	0.01	0.013	14.52	4.90	9.58
	0.02		14.34	2.52	12.22
	0.03		15.56	1.82	14.87
0.03	0.01	0.013	16.90	6.31	10.69
	0.02		16.48	3.82	13.33
	0.03		17.60	3.11	15.98

MDF + Novapan

Epaisseur (m)	Hint (m)	Hext (m)	Double paroi		
			ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	0.013	11.14	1.42	9.69
	0.02		12.70	-0.06	13.47
	0.03		14.03	-1.26	17.25
0.02	0.01	0.013	14.79	4.19	10.71
	0.02		15.63	2.15	14.49
	0.03		17.48	1.56	18.27
0.03	0.01	0.013	17.07	5.57	11.82
	0.02		17.62	3.39	15.60
	0.03		19.69	3.12	19.38

MDF+ MDF

Epaisseur (m)	Hint (m)	Hext (m)	Double paroi		
			ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	0.013	11.11	1.33	9.74
	0.02		12.73	-0.11	13.6
	0.03		14.00	-1.40	17.4
0.02	0.01	0.013	14.79	4.14	10.76
	0.02		15.70	2.14	14.60
	0.03		17.46	1.44	18.43
0.03	0.01	0.013	17.07	5.52	11.9
	0.02		17.69	3.38	15.71
	0.03		19.71	3.05	19.54

Avec absorbant : laine de roche

MDF simple paroi

Epaisseur (m)	Hint (m)	Simple paroi		
		ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	9.35	4.81	4.72
	0.02	13.54	4.35	9.08
	0.03	15.23	2.49	13.45
0.02	0.01	14.24	8.51	5.72
	0.02	18.65	8.10	10.64
	0.03	20.56	6.35	15.56
0.03	0.01	17.69	10.74	6.82
	0.02	22.18	10.27	12.34
	0.03	24.26	8.58	17.86

MDF +Gypse

Epaisseur (m)	Hint (m)	Hext (m)	Double paroi		
			ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	0.013	11.76	0.56	11.43
	0.02		13.53	-1.49	16.83
	0.03		15.56	-2.58	22.23
0.02	0.01	0.013	14.58	2.48	12.59
	0.02		17.46	1.07	17.99
	0.03		18.52	-0.2	23.39
0.03	0.01	0.013	17.00	3.95	13.87
	0.02		19.93	3.41	19.27
	0.03		21.99	2.61	24.67

MDF +cèdre

Epaisseur (m)	Hint (m)	Hext (m)	Double paroi		
			ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	0.013	11.41	2.6	8.67
	0.02		11.81	0.7	11.32
	0.03		12.09	-1.02	13.96
0.02	0.01	0.013	14.73	4.87	9.83
	0.02		14.52	2.50	12.48
	0.03		15.74	1.82	15.13
0.03	0.01	0.013	17.42	6.88	11.12
	0.02		16.98	4.01	13.76
	0.03		18.09	3.33	16.41

MDF + Novapan

Epaisseur (m)	Hint (m)	Hext (m)	Double paroi		
			ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	0.013	10.92	1.08	9.81
	0.02		12.48	-0.36	13.59
	0.03		13.79	-1.57	17.37
0.02	0.01	0.013	15.01	4.19	10.97
	0.02		15.81	2.15	14.75
	0.03		17.66	1.59	18.53
0.03	0.01	0.013	17.59	5.75	12.25
	0.02		18.11	3.59	16.03
	0.03		20.19	3.37	19.81

MDF+ MDF

Epaisseur (m)	Hint (m)	Hext (m)	Double paroi		
			ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	0.013	10.89	1.01	9.86
	0.02		12.49	-0.42	13.69
	0.03		13.76	-1.7	17.53
0.02	0.01	0.013	15.00	4.13	11.03
	0.02		15.88	2.14	14.86
	0.03		17.64	1.46	18.69
0.03	0.01	0.013	17.59	5.70	12.30
	0.02		18.18	3.59	16.14
	0.03		20.21	3.3	19.97

Avec absorbant : laine de verre

MDF simple paroi

Epaisseur (m)	Hint (m)	Simple paroi		
		ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	9.12	4.84	4.51
	0.02	13.38	4.33	8.87
	0.03	15.14	2.56	13.23
0.02	0.01	14.36	9.16	5.25
	0.02	18.8	8.64	10.17
	0.03	20.77	6.86	15.1
0.03	0.01	17.98	11.86	6.06
	0.02	22.47	11.15	11.58
	0.03	24.56	9.36	17.10

MDF +Gypse

Epaisseur (m)	Hint (m)	Hext (m)	Double paroi		
			ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	0.013	12.45	0.37	12.57
	0.02		14.68	1.85	19.32
	0.03		19.95	3.09	26.07
0.02	0.01	0.013	13.46	1.37	13.58
	0.02		15.68	2.85	20.32
	0.03		20.95	4.09	27.07
0.03	0.01	0.013	14.47	4.09	28.09
	0.02		16.68	3.85	21.32
	0.03		21.95	5.09	28.08

MDF +cèdre

Epaisseur (m)	Hint (m)	Hext (m)	Double paroi		
			ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	0.013	11.27	2.67	8.46
	0.02		13.68	1.63	15.36
	0.03		11.02	4.01	19.08
0.02	0.01	0.013	12.26	3.69	9.57
	0.02		14.69	2.69	15.46
	0.03		12.02	5.01	20.09
0.03	0.01	0.013	13.23	3.56	10.45
	0.02		14.58	2.89	16.79
	0.03		13.03	2.89	21.1

MDF + Novapan

Epaisseur (m)	Hint (m)	Hext (m)	Double paroi		
			ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	0.013	10.80	1.15	9.6
	0.02		12.34	1.13	9.5
	0.03		13.67	1.5	17.16
0.02	0.01	0.013	11.90	1.16	10.9
	0.02		12.45	1.16	10.5
	0.03		13.97	2.56	18.16
0.03	0.01	0.013	12.33	1.18	11.2
	0.02		13.45	1.45	10.6
	0.03		14.05	2.78	18.45

MDF+ MDF

Epaisseur (m)	Hint (m)	Hext (m)	Double paroi		
			ILG	ILM	MTOT
0.01	0.01	0.013	10.79	1.09	9.65
	0.02		12.63	1.03	16.32
	0.03		13.64	1.69	17.16
0.02	0.01	0.013	11.79	2.09	10.65
	0.02		13.63	2.03	17.32
	0.03		14.64	2.69	18.16
0.03	0.01	0.013	13	1.01	17.09
	0.02		17.8	1.9	18.23
	0.03		20.57	4.09	19.21

Annexe 3

Laine de verre fixée pour le choix de l'isolant

Épaisseur de la laine de verre : 0.03m

Épaisseur de l'isolant : 0.01m

	IL_G	IL_M	M_{tot}
Novopan	17.97	11.93	5.98
Cèdre	15.57	11.50	4.35
Gypse	21.84	11.62	10.26
MDF	17.98	11.90	6.06

Annexe 4

Script Matlab pour calculer IL et IL_M des mesures expérimentales

```
clear all
close all
clc

n=importdata('freq.txt',' ');
m11sans=importdata('mesure1micro1sans.txt',' ');
m12sans=importdata('mesure1micro2sans.txt',' ');
m13sans=importdata('mesure1micro3sans.txt',' ');
m14sans=importdata('mesure1micro4sans.txt',' ');
m15sans=importdata('mesure1micro5sans.txt',' ');

m11avec=importdata('mesure1micro1avec.txt',' ');
m12avec=importdata('mesure1micro2avec.txt',' ');
m13avec=importdata('mesure1micro3avec.txt',' ');
m14avec=importdata('mesure1micro4avec.txt',' ');
m15avec=importdata('mesure1micro5avec.txt',' ');

f=n(:,1);
SPL11sans=m11sans(:,1);
SPL12sans=m12sans(:,1);
SPL13sans=m13sans(:,1);
SPL14sans=m14sans(:,1);
SPL15sans=m15sans(:,1);

SPL11avec=m11avec(:,1);
SPL12avec=m12avec(:,1);
SPL13avec=m13avec(:,1);
SPL14avec=m14avec(:,1);
SPL15avec=m15avec(:,1);
Pref=20*((10)^(-6));

P11sans=Pref*10.^(SPL11sans./20);
P12sans=Pref*10.^(SPL12sans./20);
P13sans=Pref*10.^(SPL13sans./20);
P14sans=Pref*10.^(SPL14sans./20);
P15sans=Pref*10.^(SPL15sans./20);

P11avec=Pref*10.^(SPL11avec./20);
P12avec=Pref*10.^(SPL12avec./20);
P13avec=Pref*10.^(SPL13avec./20);
P14avec=Pref*10.^(SPL14avec./20);
P15avec=Pref*10.^(SPL15avec./20);

termesans1=abs(P11sans).^2+abs(P12sans).^2+abs(P13sans).^2+abs(P14sans).^2+
abs(P15sans).^2;
termeavec1=abs(P11avec).^2+abs(P12avec).^2+abs(P13avec).^2+abs(P14avec).^2+
abs(P15avec).^2;

m21sans=importdata('mesure2micro1sans.txt',' ');
m22sans=importdata('mesure2micro2sans.txt',' ');
m23sans=importdata('mesure2micro3sans.txt',' ');
m24sans=importdata('mesure2micro4sans.txt',' ');
m25sans=importdata('mesure2micro5sans.txt',' ');
```

```

m21avec=importdata('mesure2micro1avec.txt',' ');
m22avec=importdata('mesure2micro2avec.txt',' ');
m23avec=importdata('mesure2micro3avec.txt',' ');
m24avec=importdata('mesure2micro4avec.txt',' ');
m25avec=importdata('mesure2micro5avec.txt',' ');

SPL21sans=m21sans(:,1);
SPL22sans=m22sans(:,1);
SPL23sans=m23sans(:,1);
SPL24sans=m24sans(:,1);
SPL25sans=m25sans(:,1);

SPL21avec=m21avec(:,1);
SPL22avec=m22avec(:,1);
SPL23avec=m23avec(:,1);
SPL24avec=m24avec(:,1);
SPL25avec=m25avec(:,1);
Pref=20*((10)^(-6));

P21sans=Pref*10.^(SPL21sans./20);
P22sans=Pref*10.^(SPL22sans./20);
P23sans=Pref*10.^(SPL23sans./20);
P24sans=Pref*10.^(SPL24sans./20);
P25sans=Pref*10.^(SPL25sans./20);

P21avec=Pref*10.^(SPL21avec./20);
P22avec=Pref*10.^(SPL22avec./20);
P23avec=Pref*10.^(SPL23avec./20);
P24avec=Pref*10.^(SPL24avec./20);
P25avec=Pref*10.^(SPL25avec./20);

termesans2=abs(P21sans).^2+abs(P22sans).^2+abs(P23sans).^2+abs(P24sans).^2+
abs(P25sans).^2;
termeavec2=abs(P21avec).^2+abs(P22avec).^2+abs(P23avec).^2+abs(P24avec).^2+
abs(P25avec).^2;
M=16.08;

Dtotsans2=0;
for i=1:(length(f)-1)
    DSANS=termesans2(i+1)*(f(i+1)-f(i));
    Dtotsans2=Dtotsans2+DSANS;
end
Dtotavec2=0;
for i=1:(length(f)-1)
    DAVEC=termeavec2(i+1)*(f(i+1)-f(i));
    Dtotavec2=Dtotavec2+DAVEC;
end

D2=Dtotsans2/Dtotavec2;

IL2=10*log10(D2)
ILM2=IL2-10*log10(M^2)

Dtotsans1=0;
for i=1:(length(f)-1)
    DSANS=termesans2(i+1)*(f(i+1)-f(i));
    Dtotsans1=Dtotsans1+DSANS;
end
Dtotavec1=0;

```

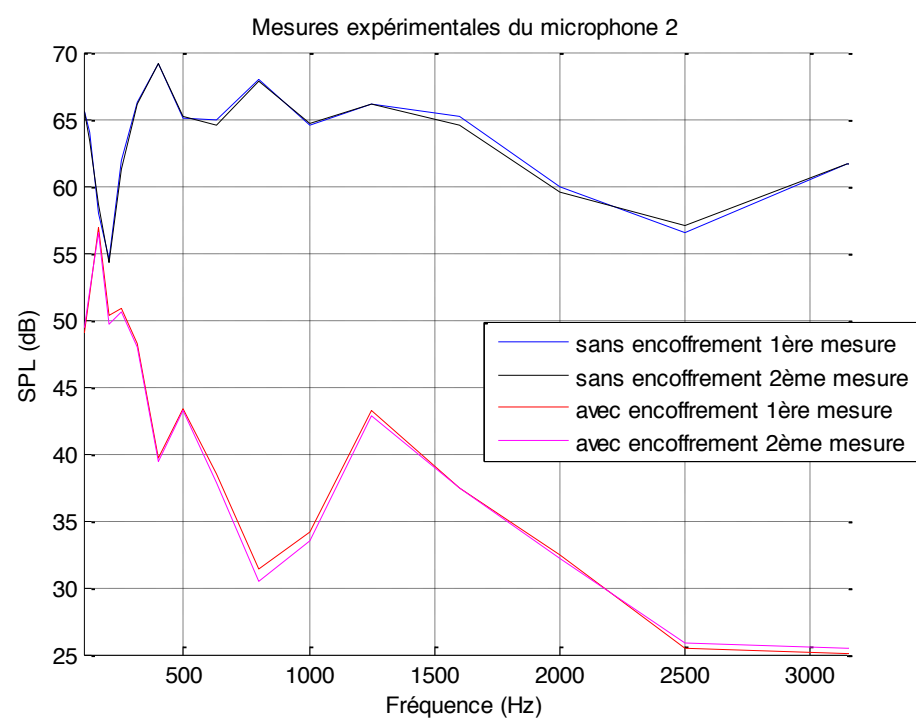
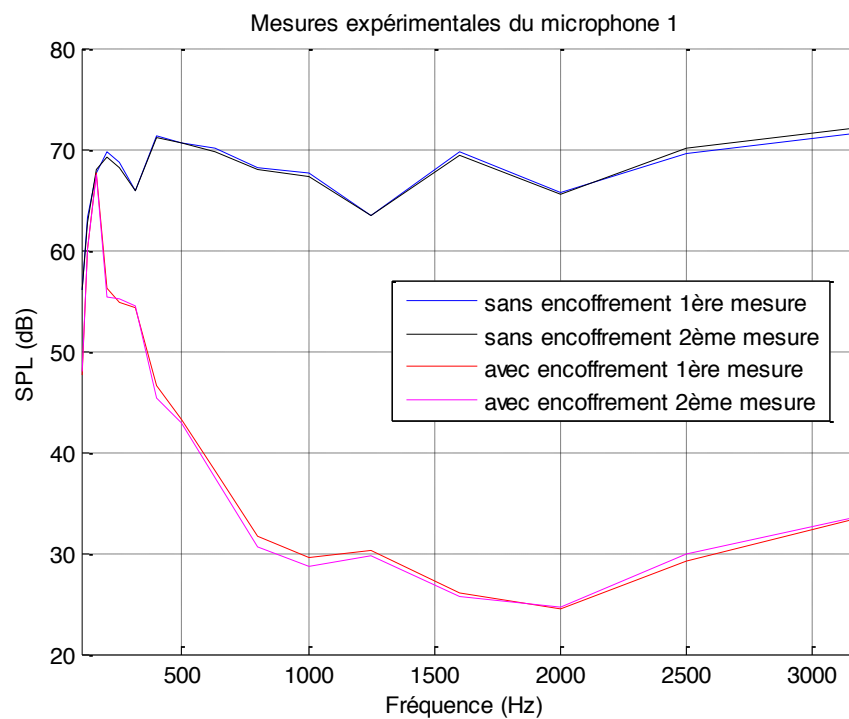
```
for i=1:(length(f)-1)
    DAVEC=termeavec2(i+1)*(f(i+1)-f(i));
    Dtotavec1=Dtotavec1+DAVEC;
end

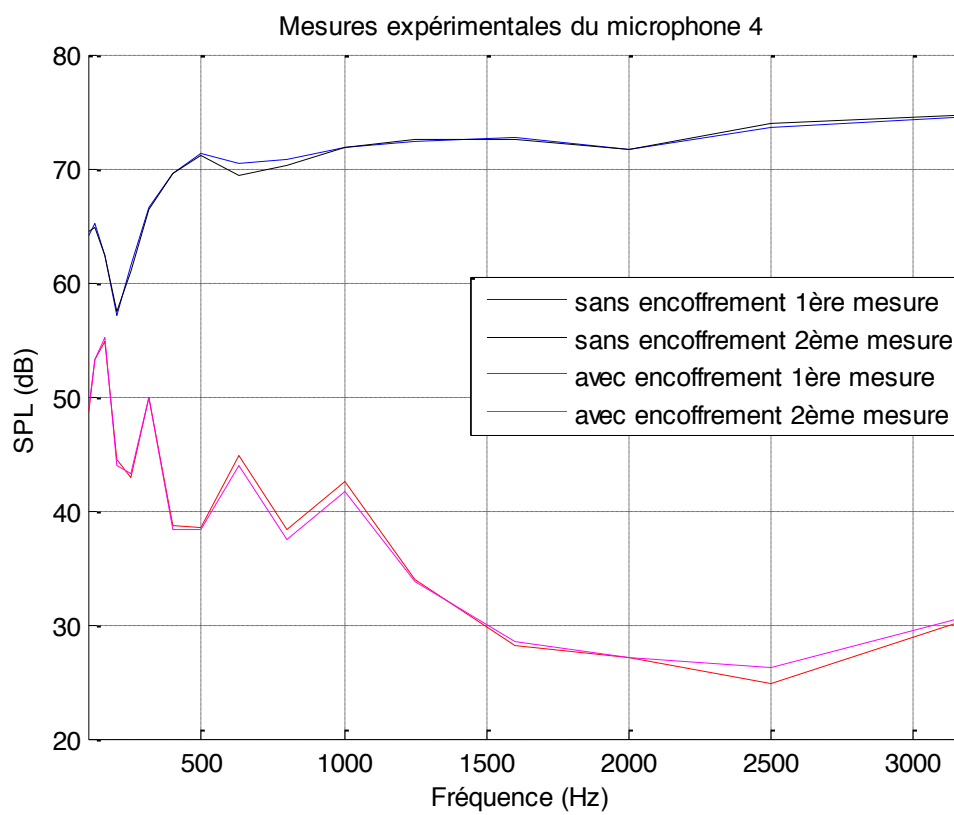
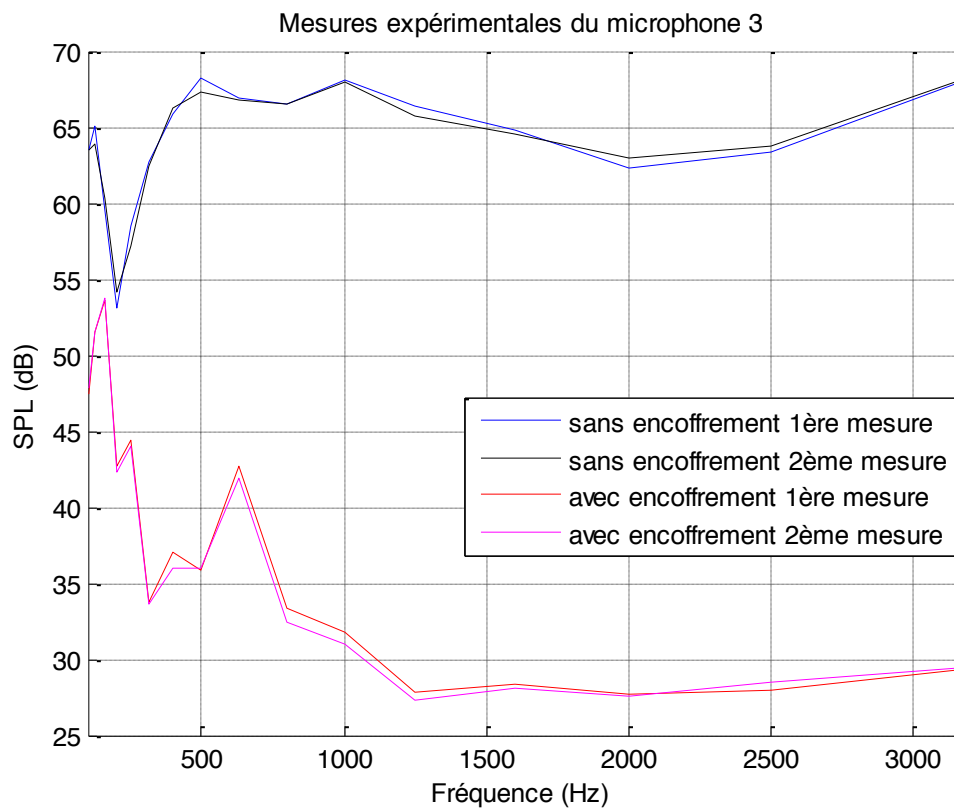
D1=Dtotsans1/Dtotavec1;

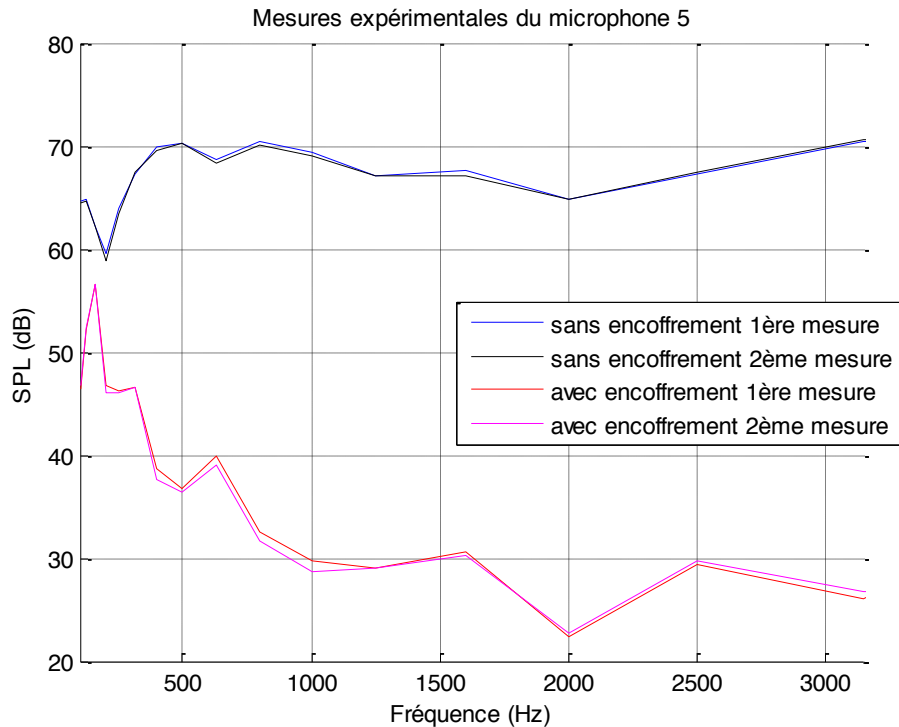
IL1=10*log10(D2)
ILM1=IL1-10*log10(M^2)
```

Annexe 5

SPL mesurées lors de l'évaluation finale par bande 1/3 octave [800; 1350] Hz







Script Matlab

```
clear all
close all
clc

n=importdata('freq.txt',' ');
m1sans=importdata('mesure1micro5sans.txt',' ');
m2sans=importdata('mesure2micro5sans.txt',' ');
m1avec=importdata('mesure1micro5avec.txt',' ');
m2avec=importdata('mesure2micro5avec.txt',' ');

f= n(:,1);
SPL1sans=m1sans(:,1);
SPL1avec=m1avec(:,1);
SPL2sans=m2sans(:,1);
SPL2avec=m2avec(:,1);

hold on;
plot(f,SPL1sans,'b');
hold on;
plot(f,SPL2sans,'k');
hold on;
plot(f,SPL1avec,'r');
hold on;
plot(f,SPL2avec,'m');
hold off;
grid;
title('Mesures expérimentales du microphone 5');
xlabel('Fréquence (Hz)');
ylabel('SPL (dB)');
legend('sans encoffrement 1ère mesure','sans encoffrement 2ème mesure','avec encoffrement 1ère mesure','avec encoffrement 2ème mesure');
xlim([100 3150]);
```

Annexe 6

Script Matlab pour comparaison exp/théorie de $IL(\omega)$

```
clear all
close all
clc

n=importdata('freq.txt',' ');
m11sans=importdata('mesure1micro1sans.txt',' ');
m12sans=importdata('mesure1micro2sans.txt',' ');
m13sans=importdata('mesure1micro3sans.txt',' ');
m14sans=importdata('mesure1micro4sans.txt',' ');
m15sans=importdata('mesure1micro5sans.txt',' ');

m11avec=importdata('mesure1micro1avec.txt',' ');
m12avec=importdata('mesure1micro2avec.txt',' ');
m13avec=importdata('mesure1micro3avec.txt',' ');
m14avec=importdata('mesure1micro4avec.txt',' ');
m15avec=importdata('mesure1micro5avec.txt',' ');

mtheo=importdata('IL_theorique.txt',' ');

f=n(:,1);
SPL11sans=m11sans(:,1);
SPL12sans=m12sans(:,1);
SPL13sans=m13sans(:,1);
SPL14sans=m14sans(:,1);
SPL15sans=m15sans(:,1);

SPL11avec=m11avec(:,1);
SPL12avec=m12avec(:,1);
SPL13avec=m13avec(:,1);
SPL14avec=m14avec(:,1);
SPL15avec=m15avec(:,1);
Pref=20*((10)^(-6));

P11sans=Pref*10.^(SPL11sans./20);
P12sans=Pref*10.^(SPL12sans./20);
P13sans=Pref*10.^(SPL13sans./20);
P14sans=Pref*10.^(SPL14sans./20);
P15sans=Pref*10.^(SPL15sans./20);

P11avec=Pref*10.^(SPL11avec./20);
P12avec=Pref*10.^(SPL12avec./20);
P13avec=Pref*10.^(SPL13avec./20);
P14avec=Pref*10.^(SPL14avec./20);
P15avec=Pref*10.^(SPL15avec./20);

termesans1=abs(P11sans).^2+abs(P12sans).^2+abs(P13sans).^2+abs(P14sans).^2+
abs(P15sans).^2;
termeavec1=abs(P11avec).^2+abs(P12avec).^2+abs(P13avec).^2+abs(P14avec).^2+
abs(P15avec).^2;
ILexp1=10.*log10(termesans1./termeavec1);

m21sans=importdata('mesure2micro1sans.txt',' ');
m22sans=importdata('mesure2micro2sans.txt',' ');
```

```

m23sans=importdata('mesure2micro3sans.txt',' ');
m24sans=importdata('mesure2micro4sans.txt',' ');
m25sans=importdata('mesure2micro5sans.txt',' ');

m21avec=importdata('mesure2micro1avec.txt',' ');
m22avec=importdata('mesure2micro2avec.txt',' ');
m23avec=importdata('mesure2micro3avec.txt',' ');
m24avec=importdata('mesure2micro4avec.txt',' ');
m25avec=importdata('mesure2micro5avec.txt',' ');

SPL21sans=m21sans(:,1);
SPL22sans=m22sans(:,1);
SPL23sans=m23sans(:,1);
SPL24sans=m24sans(:,1);
SPL25sans=m25sans(:,1);

SPL21avec=m21avec(:,1);
SPL22avec=m22avec(:,1);
SPL23avec=m23avec(:,1);
SPL24avec=m24avec(:,1);
SPL25avec=m25avec(:,1);
Pref=20*((10)^(-6));

P21sans=Pref*10.^(SPL21sans./20);
P22sans=Pref*10.^(SPL22sans./20);
P23sans=Pref*10.^(SPL23sans./20);
P24sans=Pref*10.^(SPL24sans./20);
P25sans=Pref*10.^(SPL25sans./20);

P21avec=Pref*10.^(SPL21avec./20);
P22avec=Pref*10.^(SPL22avec./20);
P23avec=Pref*10.^(SPL23avec./20);
P24avec=Pref*10.^(SPL24avec./20);
P25avec=Pref*10.^(SPL25avec./20);

termesans2=abs(P21sans).^2+abs(P22sans).^2+abs(P23sans).^2+abs(P24sans).^2+
abs(P25sans).^2;
termeavec2=abs(P21avec).^2+abs(P22avec).^2+abs(P23avec).^2+abs(P24avec).^2+
abs(P25avec).^2;
ILexp2=10.*log10(termesans2./termeavec2);
ILtheorique=mtheo(:,1);

hold on;
plot(f,ILexp1,'b');
hold on;
plot(f,ILexp2,'g');
hold on;
plot(f,ILtheorique,'m');
hold off;
grid;
title('Comparaison entre les mesures expérimentales et théorique de
IL(w)');
xlabel('Fréquence (Hz)');
ylabel('IL (dB)');
legend('1ère mesure exp','2ème mesure exp','mesure théorique');
xlim([100 3150]);

```

Références

- [1] A.Berry 2013, Rayonnement acoustique des structures Département Génie Mécanique Université de Sherbrooke**
- [2] J-C.Pascal 2009, Insonorisation industrielle : les encoffrements, Ecole Nationale Supérieure du Mans (ENSIM) Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine.**
- [3] Leo L. Beranek 1954, Acoustics, Acoustic Laboratory, Massachusetts Institute of Technology**
- [4] T. Komatsu 2008, Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials, The Acoustical Society of Japan**