

**RAPPORT D'ÉTUDE
N°AC13-26044181 CONCERNANT LA
SIMULATION DE PERFORMANCES
ACOUSTIQUES D'UNE LAINE PROJETÉE**

Rapport final

Pierre KERDUDOU

Jean-Baptiste CHÉNÉ

Responsable de pôle

Demandeur de l'étude

EURISOL

20 Avenue Eugène Gazeau

60300 SENLIS

Référence AC13-26044181

N/Réf. DSC/2013- PK

Toute reproduction partielle susceptible de dénaturer le contenu du présent document, qu'il s'agisse d'une omission, d'une modification ou d'une adaptation engage la responsabilité du client vis-à-vis du CSTB ainsi que des tiers concernés.

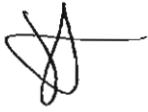
RAPPORT D'ÉTUDE
N°AC13-26044181 CONCERNANT LA
SIMULATION DE PERFORMANCES
ACOUSTIQUES D'UNE LAINE PROJETÉE

Rapport final

Demandeur de l'étude
EURISOL

Référence AC13-26044181

N/Réf. DAE/2013- PK

Auteur	Approbateur (s)	Vérificatrice
Pierre Kerdudou 	Gary JACQUS Jean-Baptiste CHÉNÉ  	G. ANDRUSIOW 

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT

ÉTABLISSEMENT DE GRENOBLE | 24 RUE JOSEPH FOURIER | 38400 SAINT-MARTIN D'HÈRES
TÉL. (33) 04 76 76 25 25 | FAX. (33) 04 76 44 20 46 | SIRET 775 688 229 000 50 | www.cstb.fr

SIÈGE SOCIAL > 84 AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2

ÉTABLISSEMENT PUBLIC À CARACTÈRE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL | RCS MEAUX 775 688 229 | TVA FR 70 775 688 229

MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

SOMMAIRE

1 - PRÉAMBULE.....	4
2 - MÉTHODE DE PRÉDICTION	5
2.1 - MÉTHODOLOGIE	5
2.2 - LOGICIEL DE PRÉDICTION ACOUSYS ET MODÈLE DE CALCULS.....	5
3 - CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS DE LA LAINE PROJETÉE.....	6
3.1 - RAIDEUR DYNAMIQUE	6
3.1.1 - Description de la méthode de mesure	6
3.1.2 - Résultats de la mesure de raideur dynamique.....	6
3.2 - RÉSISTANCE À L'ÉCOULEMENT DE L'AIR	7
3.2.1 - Description de la méthode de mesure.....	7
3.2.2 - Résultats de la mesure de résistance à l'écoulement de l'air	7
4 - RÉSULTATS DES SIMULATIONS	8
4.1 - DONNÉES D'ENTRÉE POUR LES SIMULATIONS ACOUSTIQUES	8
4.2 - COMPARAISON CALCUL/MESURE DU COEFFICIENT D'ABSORPTION ACOUSTIQUE.	9
4.3 - IMPACT DE LA VARIATION D'ÉPAISSEUR DE LA LAINE PROJETÉE SUR L'INDICE UNIQUE.	10
5 - CONCLUSION.....	12

Propriété d'EURISOL, Document pour information

1 - PRÉAMBULE

L'objectif de cette étude, à la demande de la société EURISOL, est d'évaluer l'impact sur l'absorption acoustique α_s de la variation d'épaisseur (de 100 à 200 mm, par pas de 10 mm) d'un procédé de laine projetée. Afin de compléter cette démarche, des calculs ont été également réalisés pour des épaisseurs plus faibles.

Le coefficient d'absorption acoustique du procédé ISOTHERM a été mesuré au LABE (Laboratoire d'Essais Acoustiques du CSTB) et le résultat obtenu pour une épaisseur d'environ 130 mm est $\alpha_s=1$. (Rapport d'essais CSTB n° AC12-26042053).

Dans une première partie, la méthodologie et le modèle de prédiction pour la simulation des performances acoustiques d'un système de laine projetée est détaillé.

Dans une seconde partie, les mesures de raideur dynamique (s') ainsi que de résistance à l'écoulement de l'air (r) de la laine projetée sont présentées. Ces données expérimentales sont issues d'une précédente étude réalisée à la demande de la société EURISOL (Rapport d'étude CSTB n° AC13-26040054_Rev 01).

La dernière partie présente les résultats des calculs obtenus via le logiciel AcouSYS. La corrélation entre calcul et mesure est d'abord présentée puis, l'étude paramétrique concernant la variation de l'épaisseur du matériau est détaillée.

2 - MÉTHODE DE PRÉDICTION

2.1 - Méthodologie

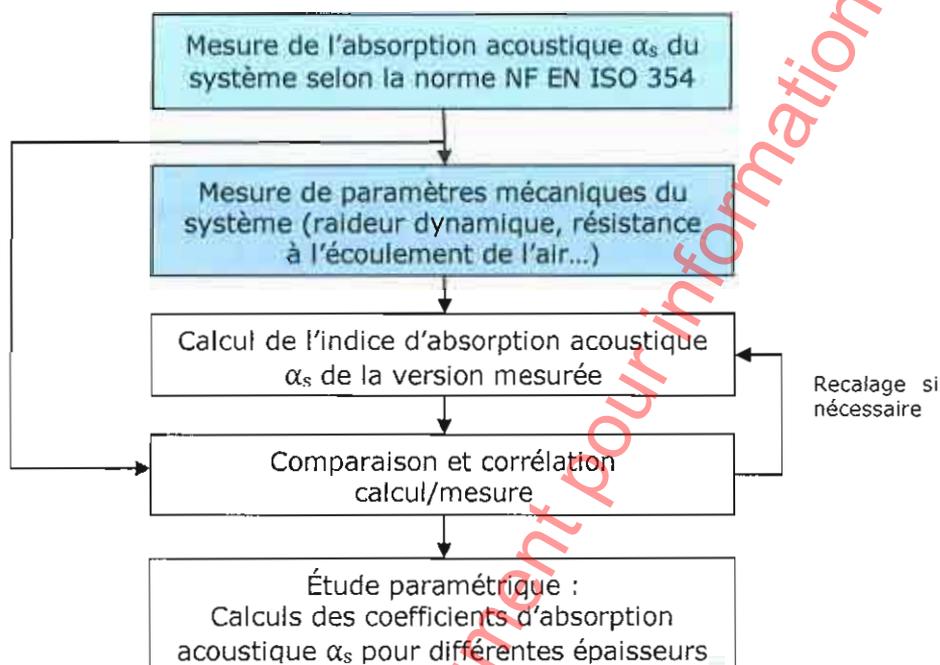


Figure 2.1 Méthodologie de prédiction des performances acoustiques

2.2 - Logiciel de prédiction AcouSYS et modèle de calculs

Le logiciel AcouSYS, développé par le CSTB, est couramment utilisé pour simuler l'indice d'affaiblissement acoustique, le coefficient d'absorption, le niveau de bruit de choc ou encore le niveau de bruit de pluie de composants du bâtiment qui sont également évalués en laboratoire. Ce logiciel de calcul acoustique de système multicouche tridimensionnel, utilise une approche par onde pour des couches planes et infinies. Chaque couche est représentée par une matrice de transfert reliant les champs de déplacement et de contrainte à chaque interface de la couche. Les couches peuvent être de 5 types : solide, fluide, poreux, viscoélastique ou élément perforé. Le logiciel permet également de considérer les conditions de montage entre chaque couche, c'est-à-dire en contact (collé) ou non. Notez que la prise en compte des dimensions (latérales) finies du système est effectuée par une technique de fenêtrage spatial lorsque l'excitation est aérienne de type champ diffus.

Tous les systèmes examinés ont pour dimensions 3.6 x 3 m; ces dimensions sont prises en compte par le modèle de prédiction.

3 - CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS DE LA LAINE PROJÉTÉE

3.1 - Raideur dynamique

3.1.1 - Description de la méthode de mesure

Les mesures sont réalisées selon la norme NF EN ISO 29052-1 « Détermination de la raideur dynamique – Matériaux utilisés sous les dalles flottantes dans les bâtiments d’habitation » tandis que le principe de la mesure est rappelé ci-dessous. La méthode de détermination de la raideur dynamique est décrite en Annexe 1.

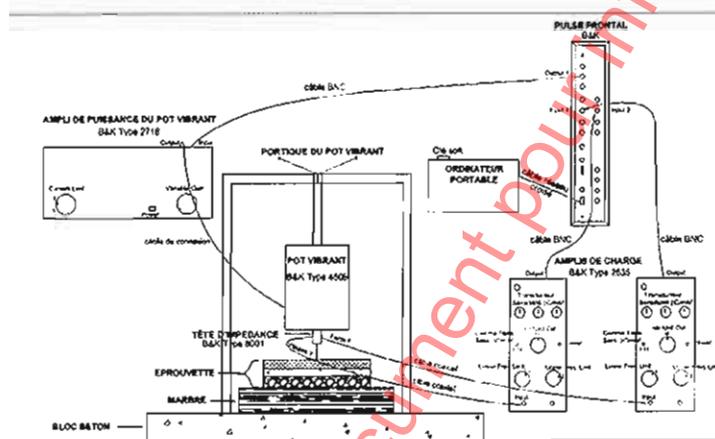


Figure 3.1 Schéma de principe du banc d’essai utilisé pour la mesure de la raideur dynamique

3.1.2 - Résultats de la mesure de raideur dynamique

Le tableau ci-dessous présente les résultats de la mesure de raideur dynamique.

FICHE RESULTAT RAIDEUR DYNAMIQUE					
RÉSULTAT DE RAIDEUR DYNAMIQUE					
Numéro d'essai	R12-20040004			Date de scelléme	17/02/2010
Nom du client	SUPRISOL			Date de l'essai	17/02/2010
Désignation du produit	ISOVERM			Température en °C	21
Appellation	laine projetée			Humidité relative en %	66
Titre	Laine minérale avec adhésif				
Essai sans ventouse sous 0 kg					
IDENTIFICATION ÉPROUVETTE	R12-20040004/1	R12-20040004/2	R12-20040004/3	Moyenne	Incertitude
Module dynamique de la charge appliqué sur le produit en kPa	200	201	201	201	± 3,00
Épaisseur de produit en mm	120,0	120,0	120,0	120,0	± 0,73
Épaisseur de la partie posée sur le produit en mm	120,0	120,0	120,0	120,0	± 0,73
h en m	0,12	0,12	0,12	0,12	± 0,01
E en Pa	2,0	1,6	2,0	2,0	± 0,15
RT en MPa	20,0	21,1	21,1	22,0	± 1,47
R en MPa	0,8	0,8	1,0	0,9	± 0,08
W en MPa	27,2	23,0	23,0	28	± 1,20

Tableau 3.1 Résultats de la mesure de raideur dynamique

NB : Le module d’Young E [Pa] déterminé à partir de la raideur dynamique par l’équation suivante:

$$E = s' \times h$$

Avec h , l’épaisseur du matériau en m.

3.2 - Résistance à l'écoulement de l'air

3.2.1 - Description de la méthode de mesure

Les mesures sont réalisées selon la norme NF EN 29053 – Méthode avec écoulement d'air direct (méthode A).

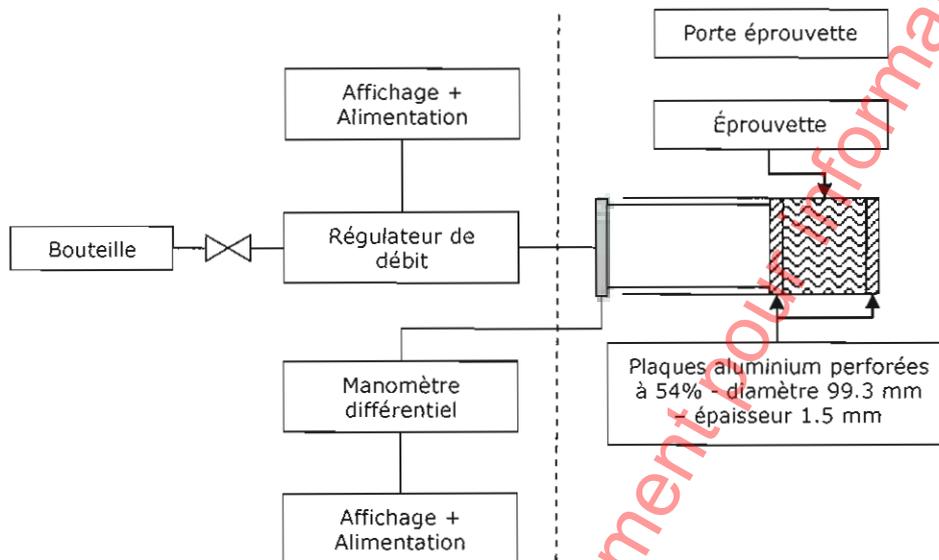


Figure 3.2 Schéma de principe du banc d'essais utilisé pour la mesure de la résistance à l'écoulement de l'air

3.2.2 - Résultats de la mesure de résistance à l'écoulement de l'air

Le tableau ci-dessous présente les résultats de la mesure de résistance à l'écoulement de l'air.

RÉSISTANCE A L'ÉCOULEMENT DE L'AIR selon la norme NF EN ISO 29053 - méthode A						
Numéro du dossier :	AC12-29040054	Température (en °C) :	21			
Nom du client :	EURIBOL	HR (en %) :	48			
Nature de l'élément :	Laine minérale + liant (projeté)					
Appellation :	ROTHERME 120 mm					
Date de l'essai :	12/02/012					
Responsable de l'essai :	P. KERDUDOUJ					
Paramètres						
Débit volumique q_v en cm^3/min (SCCM)	240	soit	$4\text{E-}06 \text{ m}^3/\text{s}$			
Diamètre des éprouvettes en mm :	99	soit	0,099 m			
Vitesse de l'air en m/s :	0,5					
Surface A d'un échantillon en m^2 :	0,008					
Rappel :						
Résistance à l'écoulement de l'air : $R = \Delta p / q_v$						
Résistance spécifique à l'écoulement de l'air : $R_s = R \times A$						
Résistivité à l'écoulement de l'air : $r = R_s / d$						
	Numéro éprouvette	Épaisseur éprouvette en mm	Δp en Pa	R en kPa.s/m^3	R_s en kPa.s/m^2	r en kPa.s/m^2
	1	121	1,710	428	3,22	26,65
	2	120	2,650	663	5,00	41,64
	3	119	2,780	695	5,24	44,05
	4	123	2,650	663	5,00	41,64
	5	120	2,190	545	4,11	34,26
	6	123	1,920	480	3,62	29,44
	7	120	2,410	603	4,54	37,87
	8	120	1,940	485	3,66	30,49
	9	119	2,800	700	5,28	44,37
	Moyenne	120,222	2,336	584	4,41	36,71
	Ecart type	1,20	0,41	103,12	0,76	6,72
	Incertitude	$\pm 0,699$	$\pm 0,369$	$\pm 92,319$	$\pm 0,699$	$\pm 5,641$

Tableau 3.2 Résultats de la mesure de résistance à l'écoulement de l'air

4 - RÉSULTATS DES SIMULATIONS

4.1 - Données d'entrée pour les simulations acoustiques

Le tableau ci-dessous présente les données d'entrée nécessaires au logiciel AcouSYS pour la simulation des performances acoustiques du procédé de laine projetée ISOTHERM.

La modélisation du matériau poreux permettant le calcul du coefficient d'absorption acoustique est réalisée à partir du modèle de Biot-Allard. La description complète du matériau poreux nécessite alors 9 paramètres d'entrés : la densité ρ en kg/m^3 , le module d'Young E en Pa, le facteur de perte η en %, le coefficient de poisson ν , la résistivité à l'écoulement de l'air σ en Pa.s/m^2 , la porosité ouverte Φ en %, la longueur caractéristique thermique λ' , la longueur caractéristique visqueuse λ et la tortuosité α_∞ .

Certains de ces paramètres sont issus de la phase de caractérisation décrite précédemment ou ont été mesurés (ρ , E , η , r), d'autres sont estimés (Φ) ou encore issus de la littérature (ν , λ' , λ , α_∞).

Référence	ISOTHERM
Nature	Laine projetée
Épaisseur totale [mm]	125
Masse volumique ρ [kg/m^3]	160 ⁽¹⁾
Module d'Young E [Pa]	2,9 e+06 ⁽¹⁾
Résistivité à l'écoulement de l'air σ [Pa.s/m^2]	37 e+03 ⁽¹⁾
Facteur de perte structural η [%]	2 ⁽¹⁾
Porosité Φ [%]	63 ⁽²⁾

Tableau 4.1 Données d'entrée utilisées pour les simulations de performances acoustiques



Figure 4.2 Vue en coupe du procédé de laine projetée ISOTHERM d'environ 130 mm.

⁽¹⁾ Valeurs mesurées

⁽²⁾ Valeurs estimées et ajustées lors de la comparaison Calculs/Mesures permettant la prise en compte de la présence de liant dans le produit fini.

4.2 - Comparaison Calcul/Mesure du coefficient d'absorption acoustique.

Le graphique ci-dessous présente le coefficient d'absorption acoustique de la laine projetée ISOTHERM en 130 mm d'épaisseur mesuré au LABE et calculé par AcouSYS. La mesure est réalisée en salle réverbérante selon la norme ISO 354 sur une maquette de 10,8 m². Le calcul est réalisé en champs diffus et le fenêtrage spatial permet la prise en compte des dimensions de la maquette.

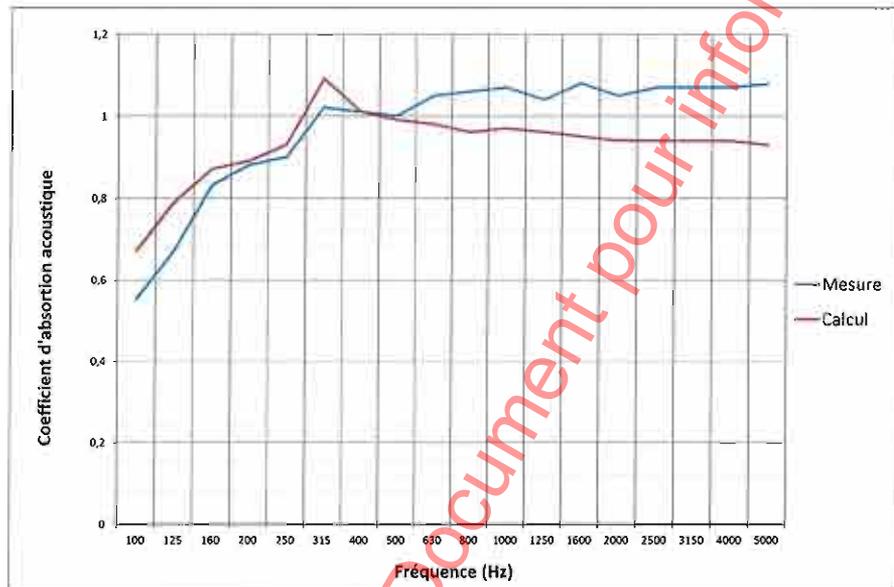


Figure 4.2 Comparaison mesure/calcul du coefficient d'absorption acoustique d'une laine projetée d'environ 130 mm

Coefficient d'absorption acoustique. ISOTHERM 130 mm	α_w
Mesure	1.00
Calcul	1.00

Tableau 4.2 Indice unique d'absorption acoustique α_w d'une laine projetée d'environ 130 mm

Les résultats détaillés de la mesure sont présentés en Annexe 3.

D'une manière générale, le comportement acoustique du matériau est correctement prédit. Cependant, on observe une divergence entre calcul et mesure à partir du tiers d'octave 600 Hz. Cela est certainement dû aux effets de bord importants lors de la mesure en salle réverbérante qui ont pour conséquence de surévaluer légèrement le coefficient d'absorption acoustique. Les calculs effectués seront donc légèrement pénalisants par rapport à la mesure en salle réverbérante.

La corrélation entre calcul et mesure reste tout de même satisfaisante et permet la réalisation d'une étude paramétrique concernant l'épaisseur du matériau.

4.3 - Impact de la variation d'épaisseur de la laine projetée sur l'indice unique

Le tableau ci-dessous présente le coefficient d'absorption acoustique de la laine projetée ISOTHERM pour différentes épaisseurs, calculés par AcouSYS.

Fréquence (Hz)	Epaisseur de la laine projetée (mm)															
	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
100	0,11	0,17	0,25	0,34	0,43	0,52	0,59	0,65	0,67	0,72	0,74	0,75	0,75	0,74	0,74	0,73
125	0,17	0,26	0,37	0,48	0,58	0,67	0,73	0,77	0,79	0,81	0,81	0,8	0,79	0,78	0,77	0,76
160	0,27	0,4	0,54	0,66	0,75	0,82	0,85	0,87	0,87	0,85	0,84	0,83	0,82	0,82	0,83	0,97
200	0,4	0,56	0,7	0,81	0,88	0,91	0,92	0,9	0,89	0,88	0,86	0,97	1,04	1,09	1,11	1
250	0,56	0,73	0,85	0,92	0,94	0,94	0,92	0,9	0,93	1,06	1,11	1,04	0,99	0,96	0,95	0,94
315	0,72	0,86	0,94	0,95	0,94	0,94	1,04	1,11	1,09	1,01	0,99	0,98	0,97	0,96	0,96	0,96
400	0,85	0,93	0,94	0,95	1,05	1,09	1,04	1,01	1,01	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97
500	0,91	0,91	0,99	1,08	1,04	1,02	1	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,96	0,95	0,96	0,98
630	0,88	1,03	1,05	1,02	1	0,99	0,98	0,98	0,98	0,95	0,96	0,97	0,98	1	1	0,99
800	1,03	1,03	1,01	0,99	0,98	0,97	0,95	0,95	0,96	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97
1000	1,01	1	0,98	0,96	0,95	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97
1250	0,99	0,97	0,95	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
1600	0,96	0,93	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
2000	0,92	0,93	0,94	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
2500	0,92	0,94	0,95	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
3150	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
4000	0,95	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
5000	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
α_w	0.85	0.95	1	1	1	1	1	1	1	1	0.95	1	0.95	1	1	1

Tableau 4.3 Indice unique d'absorption acoustique α_w d'une laine projetée pour différentes épaisseurs

L'indice unique α_w n'est pratiquement pas impacté par les variations d'épaisseur comprises entre 100 et 200 mm. De légères variations sont toutefois observées pour les épaisseurs 150 et 170 mm mais ces écarts ne sont pas significatifs et ont pour origine la méthode de calcul de l'indice unique. Par contre, une réduction significative de l'indice unique α_w apparaît lorsque l'épaisseur du produit est inférieure à 60 mm.

Ces résultats sont tout de même à mettre en perspective avec l'allure et l'évolution des courbes complètes d'absorption acoustique.

En effet, la Figure 4.3 montre une diminution significative du coefficient d'absorption sur les premiers tiers d'octave dès que l'épaisseur du produit est inférieure à 100 mm. Cependant, l'indice unique ne permet pas de mettre en évidence l'impact de cette dégradation du coefficient d'absorption que l'on observe aux basses fréquences (inférieure à 300 Hz).

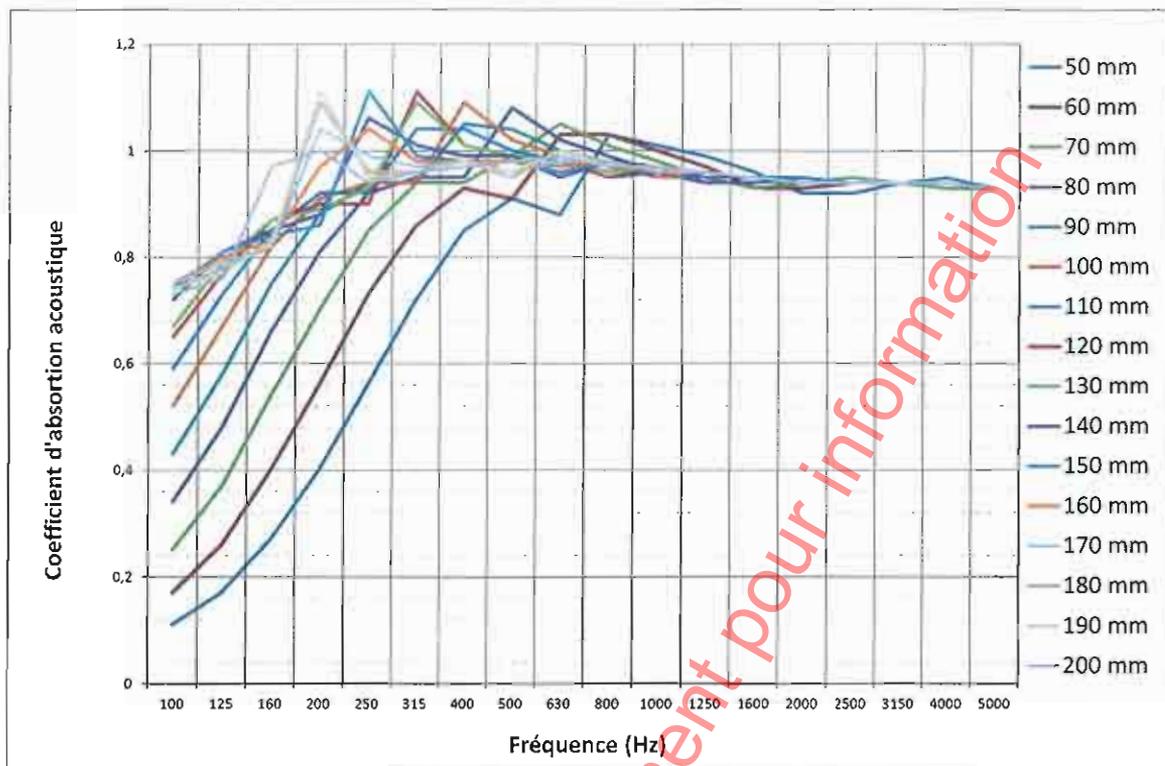


Figure 4.3 Calcul du coefficient d'absorption acoustique d'une laine projetée pour différentes épaisseurs

5 - CONCLUSION

Le coefficient d'absorption acoustique d'un procédé de laine projetée (ISOTHERM) d'épaisseur 130 mm a été mesuré au LABE. Des mesures de caractérisation des propriétés du produit, telles que la raideur dynamique et la résistance à l'écoulement de l'air, avaient été réalisées pour une précédente étude concernant le même produit.

Ces données d'entrée ont permis de simuler les performances acoustiques (coefficient d'absorption acoustique) du procédé testé en laboratoire à l'aide du logiciel AcouSys, développé par le CSTB. Une corrélation satisfaisante entre le calcul et la mesure de la configuration de référence (ISOTHERM 130 mm) a permis de valider le modèle utilisé. Une étude paramétrique a donc pu être réalisée afin de quantifier l'impact de la variation de l'épaisseur du produit sur le coefficient d'absorption acoustique.

Les variations d'épaisseur ont été effectuées par pas de 10 mm de 100 à 200 mm, les résultats obtenus par simulation ont montré que l'indice unique d'absorption acoustique α_w reste quasiment constant ($\alpha_w = 1$ ou 0,95) pour ces différentes épaisseurs. Afin de compléter la démarche, le coefficient d'absorption acoustique pour des épaisseurs plus faibles a été calculé jusqu'à obtenir une variation significative de l'indice unique. Il apparaît que l'indice unique d'absorption acoustique α_w est égal à 0,85 lorsque le procédé de laine projetée a une épaisseur inférieure à 60 mm.

ANNEXE 1 - DÉTERMINATION DE LA RAIDEUR DYNAMIQUE

La détermination de la fréquence de résonance f_r du système masse-ressort-masse permet de d'obtenir la raideur dynamique apparente par unité de surface s'_t de l'éprouvette suivant l'équation :

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'_t}{m'_t}}$$

Avec m'_t : masse totale par unité de surface utilisée pendant l'essai

Le dispositif de mesure utilisé par le laboratoire est constitué d'un système Pulse qui génère un signal d'excitation dit « bruit blanc », amplifié par un amplificateur de puissance avant d'être transmis à un pot vibrant.

Une tête d'impédance permet de récupérer la force injectée ainsi que la vitesse de déplacement du système masse-ressort-masse.

Ces signaux sont ensuite amplifiés par des amplificateurs de charge avant d'être transmis au système Pulse pour être traités et analysés.

Les calculs de la raideur dynamique par unité de surface s' et du facteur de perte à partir des mesures sont effectués de la manière suivante :

- Raideur dynamique par unité de surface s' , en N/m^3 :

$$s' = s'_t + s'_a$$

Avec s'_t ; raideur dynamique apparente par unité de surface de l'éprouvette, en N/m^3

$$s'_t = 4\pi \times m_t \times f_r^2$$

où : m_t est la masse surfacique de la charge appliquée sur l'éprouvette en kg/m^2
 f_r est la fréquence de résonance en Hz du système masse-ressort-masse

s'_a : raideur dynamique par unité de surface du gaz captif, en N/m^3

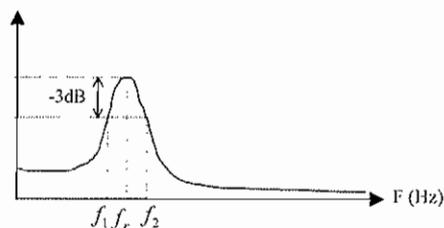
$$s'_a = \frac{P_0}{d_t \times \varepsilon}$$

où : P_0 est la pression atmosphérique en Pa
 d_t est l'épaisseur de l'éprouvette sous la charge statique appliquée en mm
 ε est la porosité du matériau¹

- Facteur de perte, en % :

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_r} \times 100$$

$$\text{Avec } \Delta f = \frac{f_2 - f_1}{f_r}$$



¹ La porosité est estimée d'après $\varepsilon = 1 - M/(\rho d)$ avec M : masse surfacique du produit résilient, ρ : masse volumique du constituant solide du produit résilient, d : l'épaisseur de la partie poreuse de l'éprouvette (sous charge).

ANNEXE 2 - GLOSSAIRE

η : Facteur de perte ou amortissement du matériau, exprimé en %

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

dB : déciBel est une échelle de mesure logarithmique en acoustique, notée dB

E : Module d'Young ou module d'élasticité longitudinale est la constante qui relie la contrainte de traction et la déformation pour un matériau isotrope, exprimé en N/m^2 ou Pa

Propriété d'EURISOL - Document pour information

ANNEXE 3 - RÉSULTATS DE MESURES AC12-26042053

Fréquence [Hz]	Coefficient d'absorption acoustique. ISOTHERM 130 mm
100	0,55
125	0,67
160	0,83
200	0,88
250	0,9
315	1,02
400	1,01
500	1
630	1,05
800	1,06
1000	1,07
1250	1,04
1600	1,08
2000	1,05
2500	1,07
3150	1,07
4000	1,07
5000	1,08
α_w	1

FIN DE RAPPORT

Propriété d'EURISOL - Document pour information