

RAPPORT D'ÉTUDE N°AC12-26040054 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 AC12-26040054

N/Réf. DAE/2012- PK

70034334

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°AC12-26040054
CONCERNANT LA SIMULATION DE
PERFORMANCES ACOUSTIQUES D'UNE
LAINE PROJÉTÉE**

Rapport final

Demandeur de l'étude
EURISOL

Référence AC12-26040054

N/Réf. DAE/2012- PK

70034334

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 - <i>MÉTHODOLOGIE</i>	5
2.2 - LOGICIEL DE PRÉDICTION ACOUSYS ET MODÈLE DE CALCULS	5
3 - CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE LA LAINE PROJETÉE DE 120 MM	7
3.1 - RAIDEUR DYNAMIQUE.....	7
3.1.1 - <i>Description de la méthode de mesure</i>	7
3.1.2 - <i>Résultats de la mesure de raideur dynamique</i>	7
3.2 - RÉSISTANCE À L'ÉCOULEMENT DE L'AIR	8
3.2.1 - <i>Description de la méthode de mesure</i>	8
3.2.2 - <i>Résultats de la mesure de résistance à l'écoulement de l'air</i>	8
4 - RÉSULTATS DES SIMULATIONS	9
4.1 - DONNÉES D'ENTRÉE POUR LES SIMULATIONS ACOUSTIQUES	9
4.2 - COMPARAISON MESURE/CALCUL DE L'INDICE D'AFFAIBLISSEMENT ACOUSTIQUE R ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.	10
4.3 - IMPACT DE LA VARIATION D'ÉPAISSEUR DE LA LAINE PROJETÉE ET DE LA DALLE BÉTON SUR L'INDICE R SIMULÉ	12
5 - CONCLUSION	15

1 - PRÉAMBULE

L'objectif de cette étude, à la demande de la société EURISOL, est d'évaluer l'impact sur l'indice d'affaiblissement acoustique R de la variation d'épaisseur (de 100 à 160 mm, par pas de 10 mm) d'un procédé de laine projetée sous dalle d'épaisseur 140 mm. Afin de compléter cette démarche, l'impact de la variation d'épaisseur de la dalle support a également été investigué (de 140 à 220 mm, par pas de 20 mm).

Les performances acoustiques au bruit aérien du procédé ISOTHERM en 120 mm d'épaisseur ont été mesurées au LABE (Laboratoire d'Essais Acoustiques du CSTB).

Lorsque le système ISOTHERM est projeté sur une feuille de métal déployée revêtue d'un papier kraft sous un plancher de 140 mm ayant pour performance $R_w(C;C_{tr})= 55(-2;-7)$ dB, l'indice d'affaiblissement mesuré sur l'ensemble (plancher + laine projetée) est $R_w(C;C_{tr})=62(-5;-13)$ dB (rapport d'essais CSTB n° AC12-26038558).

Dans une première partie, 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 essentielles pour simuler les performances acoustiques du système.

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 des épaisseurs des matériaux est détaillée.

2 - MÉTHODE DE PRÉDICTION

2.1 - Méthodologie

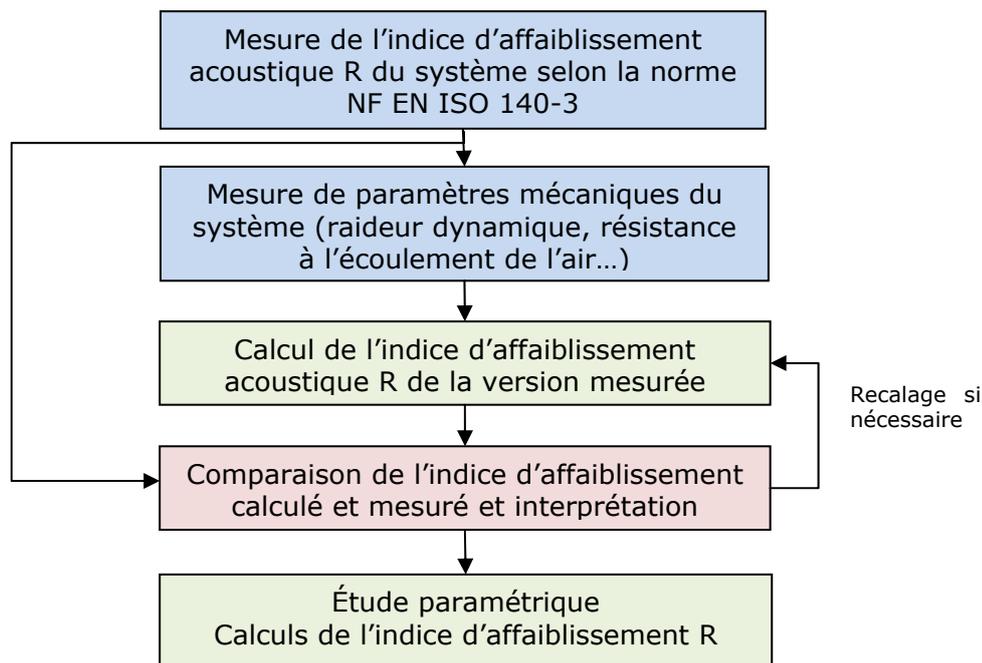
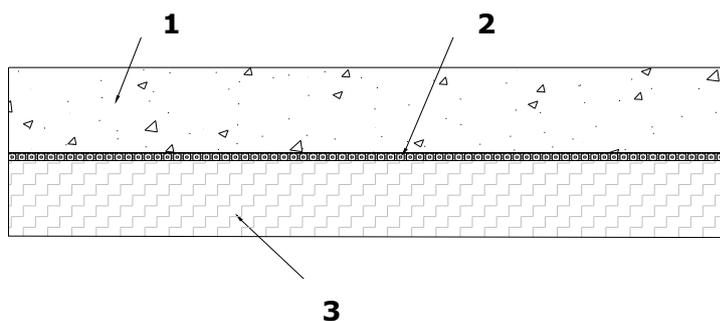


Figure 2.1 Méthodologie de prédiction des performances acoustiques

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 4.2 x 3.6 m; ces dimensions sont prises en compte par le modèle de prédiction.

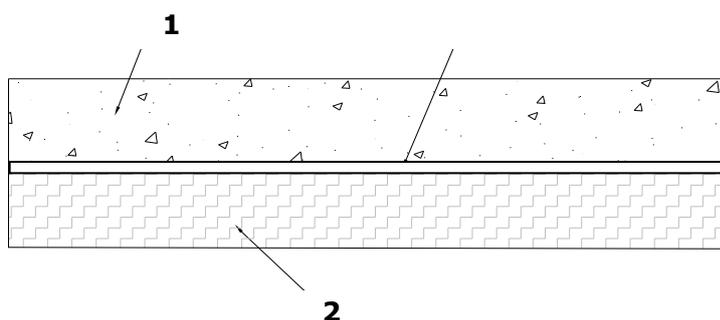


- 1** : Dalle béton 140 à 220 mm
- 2** : Métal déployé avec papier kraft
- 3** : Laine projetée ISOTHERM 100 à 160 mm.

Figure 2.2 Schéma de principe du système expérimental mesuré en laboratoire

La feuille de métal déployée avec papier kraft n'est pas modélisée dans le calcul. La laine projetée est considérée comme complètement désolidarisée du plancher béton ce qui n'est pas le cas dans la réalité. En effet le treillis métallique crée des contacts ponctuels entre les deux éléments qui ne sont pas modélisables avec AcouSYS.

Le système sera donc approché, en considérant un découplage complet entre le plancher béton et la laine minérale, modélisé par une non-continuité des contraintes et des déplacements, imposée à la jonction des surfaces de contact des matériaux entre eux.



- 1** : Dalle béton 140 à 220 mm
- 2** : Laine projetée ISOTHERM 100 à 160 mm.

Figure 2.3 Schéma de principe du système simulé par AcouSYS

3 - CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE LA LAINE PROJETÉE DE 120 MM

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 ». La méthode de détermination de la raideur dynamique est décrite en Annexe 1.

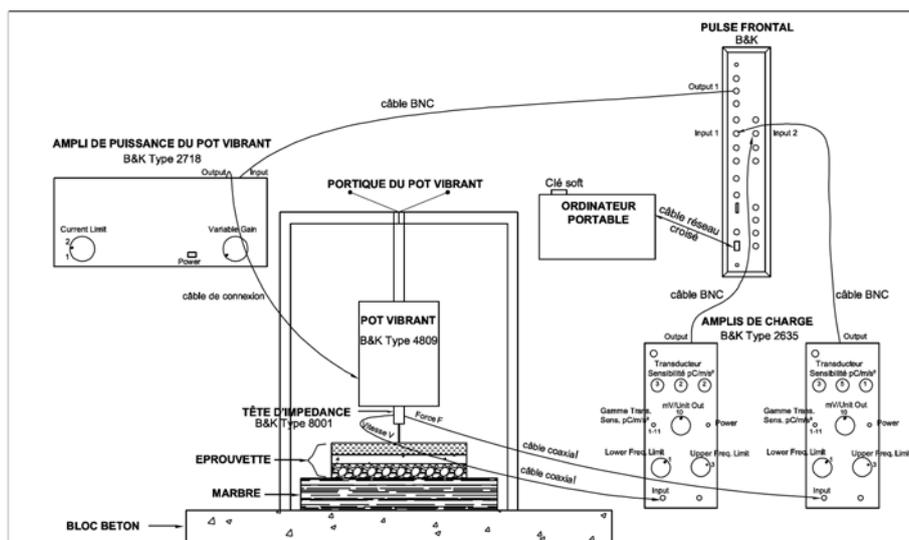


Figure 3.1 Schéma de principe du banc d'essai utilisé pour la mesure de la raideur dynamique

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					
ESSAI DE RAIDEUR DYNAMIQUE					
Numéro d'essai :	R12-26040054			Date de scellement :	-
Nom du client :	EURISOL			Date de l'essai :	17/09/2012
Désignation du produit :	ISOTHERM			Température en °C :	21
Appellation :	Isolant projeté			Humidité relative en % :	56
Type :	Laine minérale avec adjuvant				
Dossier AC12-26040054	Essai sans vaseline sous 3 kg				
IDENTIFICATION EPROUVETTE	R12-26040054/1	R12-26040054/2	R12-26040054/3	MOYENNE	Incertitude
Masse surfacique de la charge appliqué sur le produit en kg/m²	201	201	201	201	± 2,05
Epaisseur du produit en mm	128,0	125,0	123,0	125,3	± 4,73
Epaisseur de la partie poreuse du produit en mm	128,0	125,0	123,0	125,3	± 4,73
f _r en Hz	57,5	51,5	51,5	53,5	± 2,41
η en %	2,0	1,9	2,0	2,0	± 0,15
S ^t en MN/m³	26,3	21,1	21,1	22,8	± 1,47
S ^a en MN/m³	0,9	0,9	0,9	0,9	± 0,05
S ^r en MN/m³	27,2	22,0	22,0	24	± 1,52

Tableau 3.1 Résultats de la mesure de raideur dynamique

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, c'est-à-dire : l'épaisseur, la masse volumique, le module d'Young, la résistivité à l'écoulement de l'air et le facteur de perte. Ces données sont issues de la phase de caractérisation décrite précédemment.

Référence	ISOTHERM
Nature	Laine projetée
Dossier	AC12-26038558
Épaisseur totale [mm]	120
Masse surfacique m_s [kg/m ²]	30
Masse volumique ρ [kg/m ³]	150
Module d'Young E [Pa]	2,9 e+06
Résistivité à l'écoulement de l'air r [Pa.s/m ²]	36 e+03
Facteur de perte structural η [%]	2

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

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.

4.2 - Comparaison mesure/calcul de l'indice d'affaiblissement acoustique R et interprétation des résultats.

Le graphique ci-dessous présente l'indice d'affaiblissement acoustique R de la laine projetée ISOTHERM en 120 mm d'épaisseur sur une feuille de métal déployée, fixée sous une dalle de 140 mm mesuré au LABE et simulé par AcouSYS.

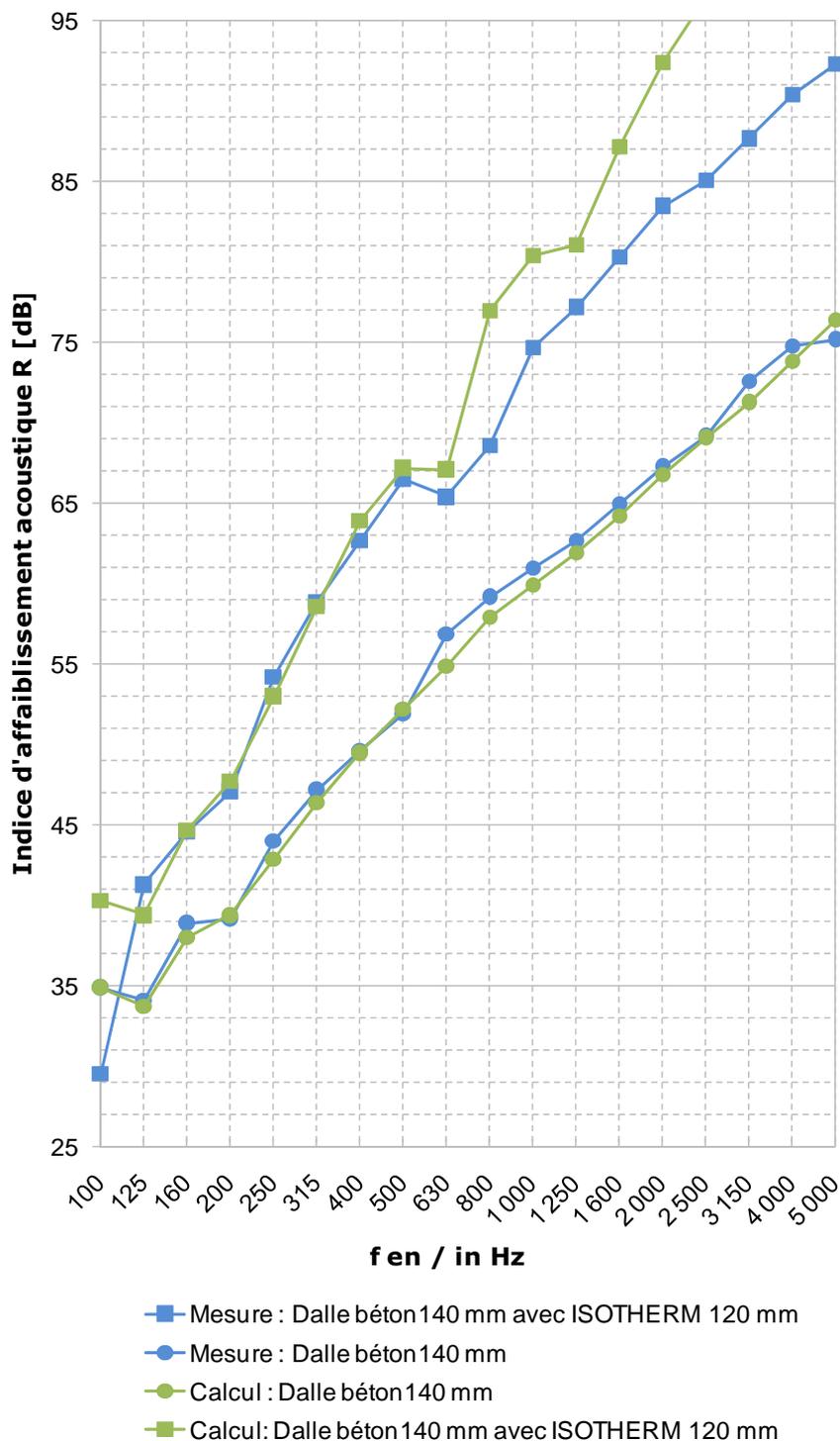


Figure 4.1 Comparaison mesure/calcul de l'indice d'affaiblissement acoustique R d'une laine projetée de 120 mm sous un plancher béton de 140 mm

La Figure 4.1 montre une corrélation satisfaisante entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées, permettant ainsi de valider le modèle utilisé.

Au-delà de 800 Hz, les niveaux d'atténuation mesurés deviennent trop élevés et d'autres sources de bruits (transmissions latérales, bruit de fond) interviennent alors. De plus, Le modèle de calcul utilisé ne considère pas les contacts ponctuels créés par le treillis métallique entre la laine projetée et le plancher. C'est probablement ce qui explique les écarts observés. Notons néanmoins que les indices uniques sont peu impactés par ces écarts moyennes et hautes fréquences.

Cependant, on observe un écart conséquent (≈ 10 dB) sur le tiers d'octave centré sur 100 Hz. Cette différence s'explique par le fait que l'outil de prédiction AcouSYS ne prend pas en compte le comportement modal du système (cf. § 2.2 Logiciel de prédiction AcouSYS et modèle de calculs), non négligeable aux basses fréquences.

Référence	$R_w(C;C_{tr})$ [dB]	R_w+C [dB]
Mesure – Plancher béton	55(-2;-7)	53
Calcul – Plancher béton	54(-1;-6)	53
Mesure – Plancher béton + laine 120 mm	62(-5;-13)	57
Calcul – Plancher béton + laine 120 mm	64(-3;-9)	61

Tableau 4.2 Indice acoustique global $R_w(C;C_{tr})$ [dB]

Le résultat du calcul de l'indice unique $R_w(C;C_{tr})$ [dB] entre 100 et 3150 Hz selon la NF EN ISO 717-1 est essentiellement piloté par les valeurs de l'indice d'affaiblissement acoustique R centré sur les premiers tiers d'octave (basses fréquences). Cela se traduit par un écart significatif (4 dB) sur l'indice unique $\Delta(R_w+C)$ [dB] entre la mesure et le calcul.

Référence	$\Delta(R_w+C)$ [dB]
Mesure – Plancher béton + laine 120 mm	+ 4
Calcul – Plancher béton + laine 120 mm	+ 8

Tableau 4.3 Indice acoustique global $\Delta(R_w+C)$ [dB]

NB : L'indice $\Delta(R_w+C)$ [dB] est une différence brute des R_w+C et n'est pas calculé selon la norme ISO 140-16 (ISO 10140-2)

Cependant, l'objet de l'étude est d'évaluer l'impact des variations d'épaisseur de laine et du plancher sur l'indice unique par rapport à la configuration de base testée en laboratoire. L'outil de calcul est donc utilisé dans l'optique de quantifier les écarts relatifs à cette configuration de référence (plancher béton de 140 mm et laine projetée de 120 mm).

4.3 - Impact de la variation d'épaisseur de la laine projetée et de la dalle béton sur l'indice R simulé

Les valeurs présentées dans cette partie correspondent aux gains ou pertes calculés (Δ) de l'indice unique $\Delta(R_w+C)$ [dB] par rapport à la configuration de référence calculée :

$$\Delta(\Delta(R_w+C)_{\text{calculé}}) = \Delta(R_w+C)_{\text{calculé}} + \Delta(R_w+C)_{\text{calculé-réf.}} \quad [\text{dB}]$$

Pour rappel, la configuration de référence est un plancher béton de 140 mm avec laine projetée sur un treillis métallique en 120 mm d'épaisseur dont la performance mesurée est de $\Delta(R_w+C)_{\text{mesuré-réf.}} = 4$ dB

Le tableau ci-dessous présente l'impact sur l'indice d'affaiblissement acoustique R de la variation d'épaisseur de 40 à 160 mm (par pas de 10 mm) de la laine projetée en sous-face ainsi que de la variation d'un plancher béton d'épaisseur de 140 à 220 mm (par pas de 20 mm).

Épaisseur de la laine projetée (mm) \ Épaisseur du plancher béton (mm)	Épaisseur de la laine projetée (mm)						
	100	110	120	130	140	150	160
140	-2	-1	-	+1	+2	+2	+3
160	-2	-1	0	-1	+1	+2	+3
180	-2	-1	0	+1	+2	+2	+3
200	-1	0	+1	+1	+2	+3	+4
220	0	+1	+1	+2	+3	+4	+4

Tableau 4.4 Impact de la variation d'épaisseur de laine projetée et de la dalle béton : $\Delta(\Delta(R_w+C)_{\text{calculé}})$ [dB]

NB : Afin de quantifier l'impact sur l'indice d'affaiblissement acoustique des différentes configurations investiguées, il convient d'utiliser le Tableau 4.4 en appliquant la formule suivante :

$$\Delta(R_w+C)_{\text{estimé}} = \Delta(R_w+C)_{\text{mesuré-réf.}} + \Delta(\Delta(R_w+C)_{\text{calculé}}) \quad [\text{dB}]$$

Exemple : Pour un plancher béton d'épaisseur 180 mm et une épaisseur de laine minérale de 140 mm, on a $\Delta(R_w+C)_{\text{estimé}} = 4 + 2 = +6$ dB

À l'aide du tableau ci-dessus, on peut observer l'impact sur l'indice d'affaiblissement R d'une laine projetée en fonction de l'épaisseur de celle-ci ; plus l'épaisseur de la laine augmente plus la performance acoustique du système est importante. Le gain par rapport à la configuration de référence peut atteindre 3 dB pour une épaisseur de laine projetée de 160 mm. Le gain apporté par l'augmentation de l'épaisseur du plancher varie quant à lui de 1 à 2 dB.

Les valeurs de l'indice unique R_w+C [dB] présentées dans le tableau suivant sont calculées à partir du tableau 4.4, des valeurs de l'indice d'affaiblissement du plancher béton de 140 mm mesuré et des valeurs de l'indice d'affaiblissement de plancher béton issu de la base de données Acoubat Sound 2010 v6 pour les épaisseurs non testées (160, 180, 200, 220 mm).

		Plancher béton seul R_w+C [dB]	Epaisseur de la laine projetée (mm)						
			100	110	120	130	140	150	160
Epaisseur du plancher béton (mm)	140	53	55	56	57	58	59	59	60
	160	57	59	60	61	60	62	63	64
	180	60	62	63	64	65	66	66	67
	200	62	65	66	67	67	68	69	70
	220	64	68	69	69	70	71	72	72

Tableau 4.5 Estimation de l'indice unique R_w+C [dB] pour les différentes configurations

NB : Les valeurs présentées dans les cases rouges sont directement issues des mesures effectuées en laboratoire (Annexe 3).

La Figure 4.2 présente l'évolution de l'indice d'affaiblissement acoustique R en fonction de la fréquence et de la variation d'épaisseur du système de laine projetée en sous-face d'une dalle de 140 mm d'épaisseur.

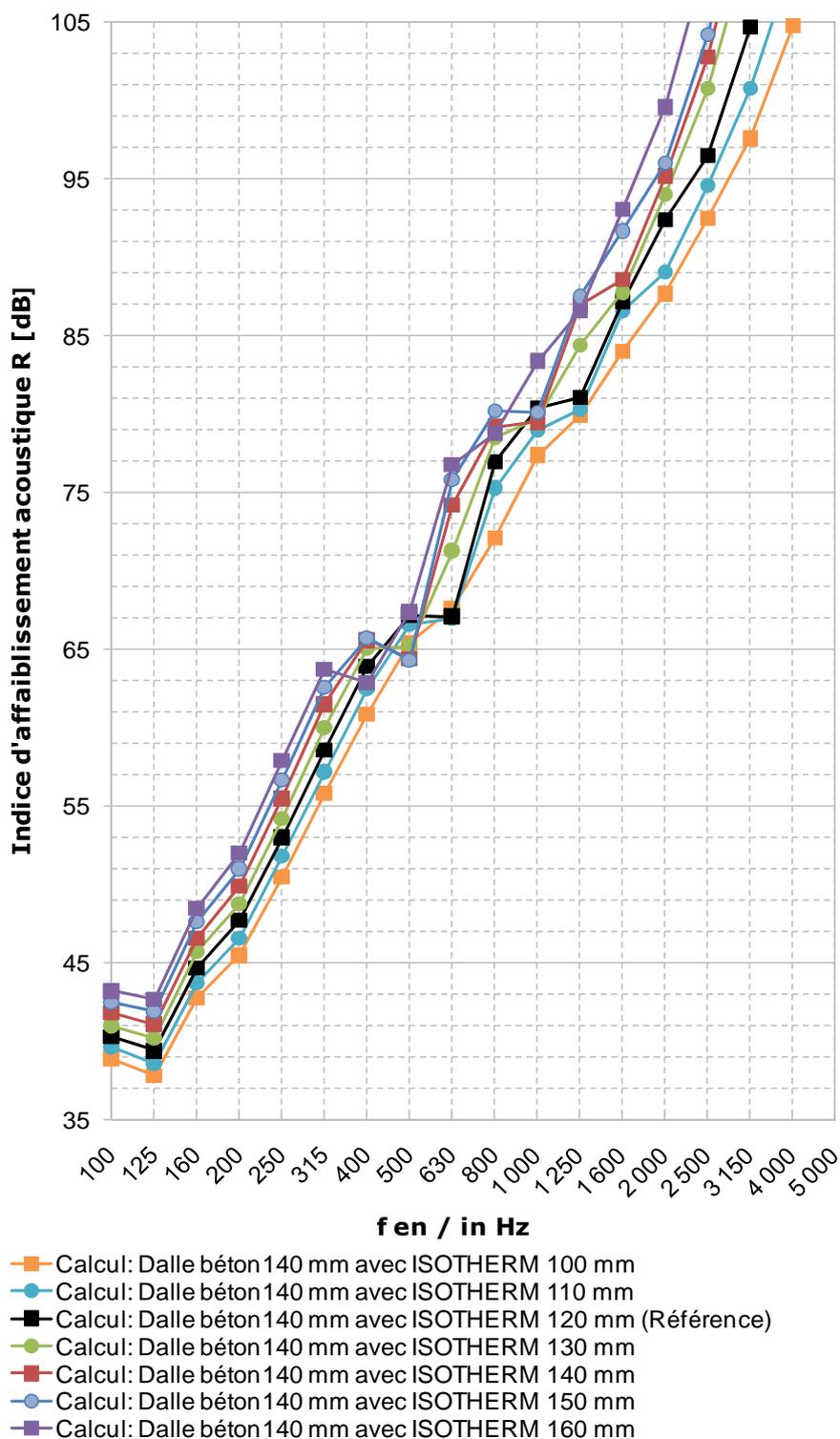


Figure 4.2 Evolution de l'indice d'affaiblissement R simulé en fonction de l'augmentation d'épaisseur de la laine projetée sous une dalle

5 - CONCLUSION

À partir des mesures de raideur dynamique et de résistance à l'écoulement de l'air réalisées en laboratoire sur un système de laine projetée ISOTHERM, les performances acoustiques (indice d'affaiblissement acoustique) de cette dernière ont été simulées à partir de l'outil de calcul AcouSYS développé par le CSTB. Ces calculs permettent de quantifier l'impact de la projection de laine projetée sur un treillis fixé au plancher béton.

L'impact de la variation d'épaisseur de la laine projetée a été quantifié pour un système idéalisé qui serait totalement désolidarisé de la dalle de béton (ce qui ne représente pas strictement le cas réel car il persiste un contact partiel du fait de la présence du treillis). On observe une augmentation globalement linéaire des performances acoustiques du système (de 0 à 5 dB) pour des épaisseurs de laine comprises entre 100 et 160 mm.

Quant à l'augmentation d'épaisseur du plancher (pour une épaisseur de laine projetée constante), les performances acoustiques peuvent être améliorées de 1 à 2 dB dans le cas le plus favorable, c'est-à-dire en passant d'un plancher béton de 140 à 220 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

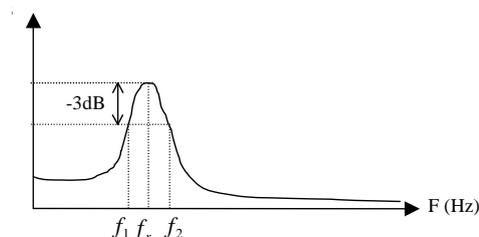
d_t est l'épaisseur de l'éprouvette sous la charge statique appliquée en mm

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/m² ou Pa

$R_w(C;C_{tr})$: Indice d'affaiblissement pondéré avec ses termes d'adaptation, C pour un bruit rose et C_{tr} pour un bruit de trafic routier à l'émission, exprimé en dB

R_w+C : Indice d'affaiblissement acoustique calculé pour un bruit rose à l'émission, exprimé en dB

ANNEXE 3 - RÉSULTATS DE MESURES AC12-26038558

Fréquence [Hz]	R plancher béton seul [dB]	R plancher + treillis métallique + laine projetée 120 mm [dB]
100	34,9	29,5
125	34,1	41,3
160	38,9	44,6
200	39,2	47,1
250	44,0	54,2
315	47,2	58,9
400	49,6	62,7
500	51,9	66,5
630	56,9	65,4
800	59,2	68,6
1000	61,0	74,7
1250	62,7	77,2
1600	65,0	80,3
2000	67,3	83,5
2500	69,2	85,1
3150	72,6	87,7
4000	74,8	90,4
5000	75,2	92,3
$R_w(C;C_{tr})$	55	62
R_w+C	53	57
R_w+C_{tr}	48	49

FIN DE RAPPORT