

## **Comment aborder simplement des systèmes complexes à l'aide des méthodes de matrices de transfert : Exemple des systèmes Panobloc® de chez TECHNIWOOD**

J.-B. Chéné<sup>a</sup>, G. Jacques<sup>a</sup>, T. Blinet<sup>a</sup>, C. Guigou Carter<sup>b</sup>, C. Coguenanff<sup>b</sup> et L. Bourdon<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 84 avenue Jean Jaures, 77447 Champs Sur Marne, France

<sup>b</sup>CSTB, 24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-D'Hères, France

<sup>c</sup>TECHNIWOOD, Route de Saint Félix ZAE Rumilly Sud, 74150 Rumilly, France

jean-baptiste.chene@cstb.fr

En l'état des connaissances dans le domaine acoustique, les enjeux portent aujourd'hui sur la recherche d'approches méthodologiques (caractérisation des composants et modélisation) associant des temps de calcul limités à une analyse suffisamment fine des phénomènes physiques mis en jeu. Les approches de type matrices de transfert sont très bien adaptées aux systèmes multicouches ; néanmoins, des systèmes plus complexes sont dans certains cas également modélisables par cette approche, moyennant quelques travaux préliminaires. On s'intéresse ici à un nouveau système de panneau de construction préfabriqué en usine : Panobloc® ; breveté par la société TECHNIWOOD. Il est constitué d'un treillis de lames de bois croisées et décalées et d'un remplissage isolant. Ce procédé est déclinable dans un très grand nombre de configurations : variation du type d'isolant (LR, LV, LB, PSE,...), du nombre de plis (5 à 11), de l'écartement et de la densité de bois. Les habillages intérieur et extérieur peuvent aussi varier, notamment côté intérieur, où la finition pourra soit être montée sur une ossature métallique désolidarisée du panneau, soit sur une ossature fixée directement sur le Panobloc®. En s'appuyant sur une campagne d'essais physiques significative, nous avons pu valider une approche de type matrices de transfert (logiciel AcouSYS), malgré (ou grâce) à la complexité des systèmes. Pour cela le Panobloc® a été homogénéisé, les règles pour la détermination des paramètres équivalents ont été validées, pour certaines, par des codes FEM.

## 1 Introduction

Les approches de type matrices de transfert [3] ont, depuis longtemps, démontré leur efficacité pour simuler le comportement acoustique des systèmes plans (ou cylindriques) multicouches. Des travaux plus récents ont permis d'en élargir la portée. Parmi ceux-ci, on peut citer l'approche hybride (FTMM + SEA) permettant de prendre correctement en compte les courts circuits vibratoires dans les systèmes de cloison sur simple ossature [1], ou encore l'homogénéisation des parois de briques creuses en terre cuite [2].

Le présent article a pour but de franchir une nouvelle étape en cherchant à appliquer les techniques d'homogénéisation pour simuler le comportement acoustique d'un mur à ossature bois complexe, innovant et à forte modularité.

Le principal enjeu est de réussir à aborder la diversité des systèmes qu'il est possible de réaliser avec ce nouveau concept. Pour cela un plan d'expérience portant sur l'évaluation acoustique en laboratoire d'une vingtaine de configurations a été mis en place afin de pouvoir mettre au point, puis valider la démarche de simulation.

Après une brève description du concept PANOBLOC® de TECHNIWOOD, une synthèse des résultats expérimentaux sera présentée, puis la démarche de simulation sera exposée pour deux cas différents (Isolant en PSE et en LM). Enfin les limites de la démarche ainsi que les perspectives de recherche pour affiner certains points seront discutées.

## 2 Description physique du système

Panobloc® est un nouveau système de panneau de construction préfabriqué en usine. Il est constitué d'un treillis de lames de bois croisées et décalées (voir Figure 1) et d'un remplissage isolant adapté. Les panneaux Panobloc® sont fabriqués par plis. Chaque pli est composé d'une alternance de lames de bois et de bandes d'isolants (voir Figure 2). Le nombre de lames de bois par pli est ajusté pour chaque panneau en fonction des sollicitations mécaniques que devra supporter le panneau Panobloc®.

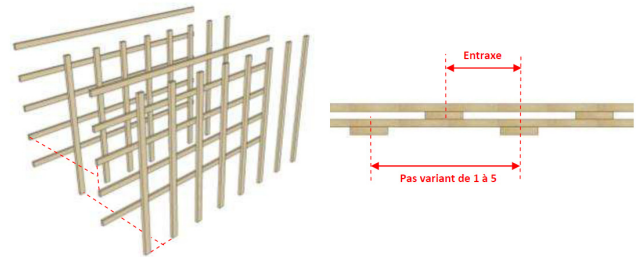


Figure 1 : Description de l'ossature bois

Les bandes d'isolant peuvent être différentes d'un pli à l'autre afin d'optimiser les performances thermiques, feu et acoustiques au sein d'un même panneau Panobloc®.

Les différents plis constituant un panneau Panobloc® sont ensuite collés et pressés ensemble sur une ligne de fabrication totalement automatisée.

Des milliers de compositions sont donc possibles et chaque panneau Panobloc® fabriqué par Techniwood est dessiné sur mesure.

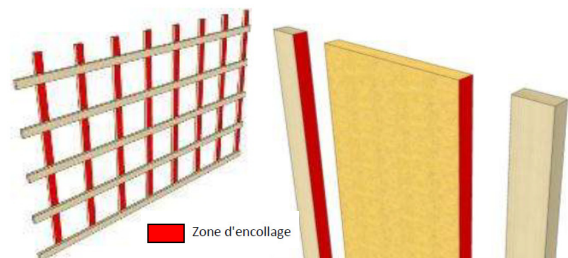


Figure 2 : Description de l'assemblage d'un pli

Enfin les finitions intérieures et extérieures seront, elles aussi très variables. Coté intérieur nous pourrions soit retrouver une contre cloison totalement désolidarisée, soit une finition fixée sur le panneau par l'intermédiaire de tasseaux ou de profilés métalliques de type Stil Mob. Coté extérieur une grande diversité de finitions est là aussi possible (bardage ventilé, enduits,...), avec la présence ou non d'un panneau (OSB ou autre) directement fixé sur le panneau.

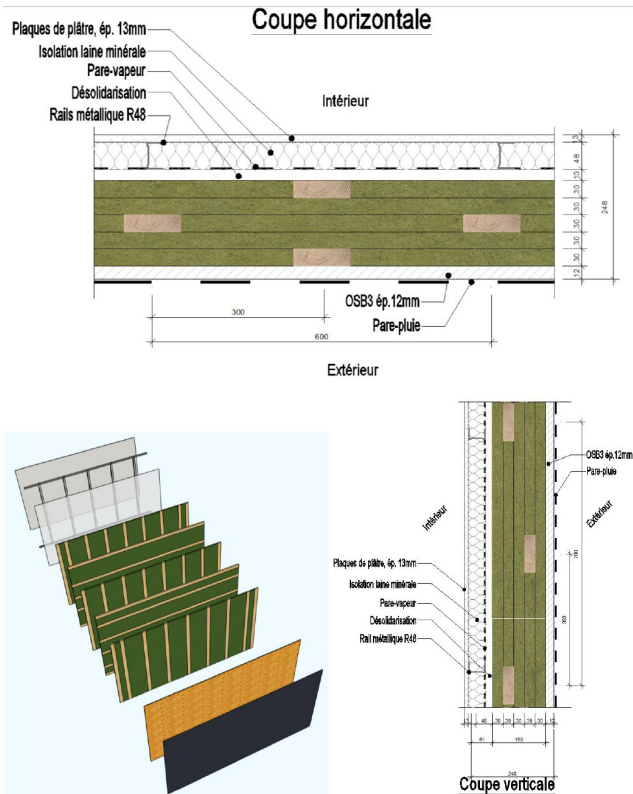


Figure 3 : Description d'un exemple de complexe de façade constitué d'un PANOBLOC® 5 plis.

### 3 Synthèse des mesures en laboratoire

#### 3.1 Présentation du plan d'expérience

L'objectif de ce plan d'expérience était de pouvoir évaluer en laboratoire l'influence, sur le comportement acoustique des complexes, des différents paramètres de celui-ci. Outre le type d'isolant (Laine de Roche, Laine de Verre et PSE), nous avons investigué l'influence du nombre de plis (5 et 9 plis), du type de finition extérieure (panneaux OSB ou clin sur tasseaux avec lame d'air ventilée), du type de finition intérieure (contre cloison indépendante ou pose sur tasseau) et du caractère porteur ou non du panneau. Une vingtaine de configurations ont ainsi été testées (voir *Tableau 1*), l'isolant pris en référence a été la laine de roche pour lequel nous avons fait varier tous les paramètres. Pour ce qui est des deux autres isolants, seules des investigations partielles ont été réalisées.

### 3.2 Synthèse des résultats expérimentaux

L'ensemble des résultats expérimentaux est exposé dans le *Tableau 1* sous la forme d'indices globaux. Comme il s'avérait difficile de présenter l'intégralité de ceux-ci sous leur forme fréquentielle, nous avons choisi d'illustrer dans cette section, l'influence de deux des paramètres uniquement.

Tableau 1 : Détail du plan d'expérience

Epaisseur	Remplissage	Finition intérieure					Type		Performance				
		5 plis	9 plis	LR	LV	PSE	OSB	Clin ventilés		Contre cloison	Plaque de plâtre sur tasseaux	Porteur	Non porteur
													35(-1;-6) dB
													53(-3;-9) dB
													44(-2;-8) dB
													35(-2;-6) dB
													54(-2;-8) dB
													43(-2;-7) dB
													53(-3;-9) dB
													44(-3;-9) dB
													38(-2;-8) dB
													54(-4;-12) dB
													47(-4;-11) dB
													32(0;-3) dB
													51(-4;-12) dB
													40(-2;-7) dB
													36(-2;-7) dB
													52(-4;-10) dB
													44(-3;-9) dB
													38(-2;-6) dB
													55(-3;-9) dB
													44(-2;-8) dB

La Figure 4, illustre l'impact du choix du type de finition intérieure sur la performance globale du système.

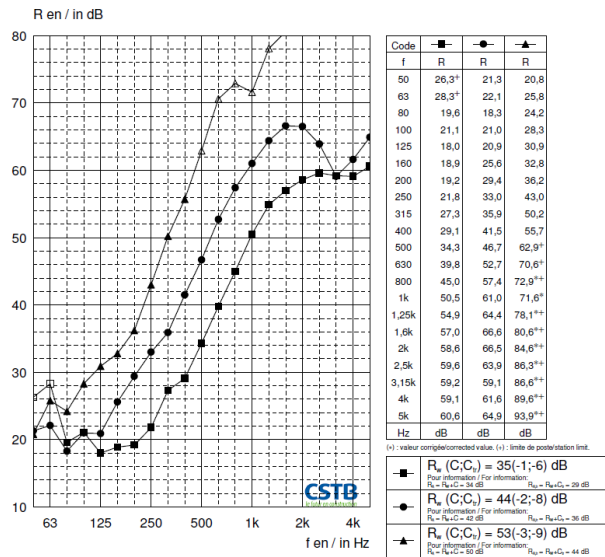


Figure 4 : Impact de la finition intérieure sur la performance du complexe (■ : sans finition, ▲ : avec une plaque de plâtre fixée sur tasseaux, ● : avec une contre cloison indépendante)

Enfin l'impact du type d'isolant est illustré Figure 5 pour un complexe de type OSB / PANOBLOC 5 plis / Plaque de plâtre sur tasseaux.

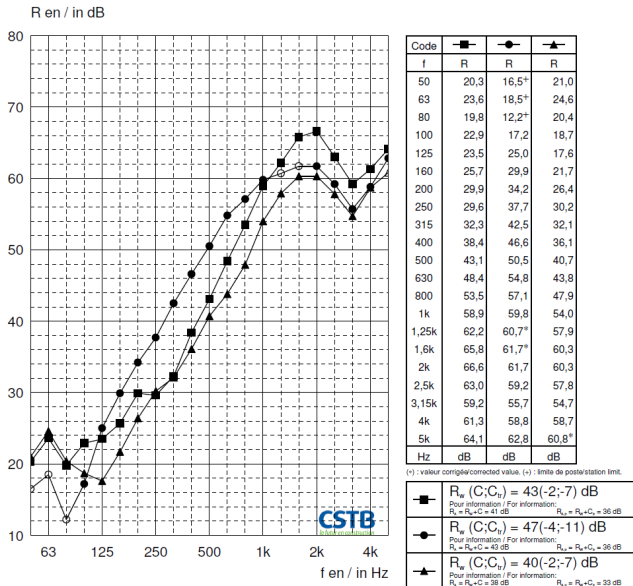


Figure 5 : Impact du type d'isolant sur la performance du complexe (■ : Laine de Roche, ▲ : Laine de Verre, ● : PSE)

### 3.3 Conclusions sur la partie expérimentale

Cette campagne relativement importante a permis de mettre en évidence un certain nombre de tendances et permet une assise de comparaison forte pour la démarche de simulation. Nous pouvons à ce stade déjà, observer qu'une large gamme de performances peut être atteinte avec ce concept en façade. L'impact du type de finition intérieure est le paramètre le plus significatif notamment entre la contre cloison désolidarisée et la plaque de plâtre sur tasseau (6 à 10 dB d'écart selon les configurations).

## 4 Simulation

### 4.1 Démarche

Etant donné la complexité du système, les approches classiques n'étaient pas envisageables, nous avons donc utilisé cette complexité au travers d'une démarche d'homogénéisation associée à des méthodes de matrices de transfert. Le champ des isolants investigués couvrant à la fois des produits à cellules ouvertes (Laine de roche, de verre ou de bois) et fermés (PSE), nous avons développé deux approches différentes. Dans les deux cas la densité des panneaux équivalents a été prise comme étant celle homogénéisée (Masse totale du panneau/volume total).

Dans le cas du PSE, nous avons homogénéisé le Panobloc® à un solide équivalent dont les propriétés ont été déterminées par des essais virtuels de traction compression statique sur un modèle éléments finis du panneau. Cette démarche déjà utilisée notamment par G. Jacques dans [2] pour les parois en briques creuses a donné des résultats très encourageants exposés dans le paragraphe 4.2.

Dans le cas des matériaux poreux de type : laine de roche, de verre ou de bois, la démarche a été, faute de temps, plus empirique.

Enfin, la prise en compte du court-circuit structural apporté par la pose d'une finition intérieure sur tasseaux ou profilé

stil mob sera aussi discutée dans les deux cas de Panobloc® (à cellules fermées ou ouvertes).

### 4.2 Simulation des Panobloc® avec isolant à cellules fermées (PSE)

L'homogénéisation du panneau 5 plis fournit les 9 constantes élastiques homogénéisées données dans le Tableau 2. Il est à noter que ces valeurs sont essentiellement pilotées par le treillis bois et que le module d'élasticité de l'isolant (1,8 MPa) reste faible devant celles-ci.

Tableau 2 : Paramètres effectifs du panneau 5 plis (non porteur) avec remplissage PSE

Système étudié	E <sub>x</sub> (MPa)	E <sub>y</sub> (MPa)	E <sub>z</sub> (MPa)	G <sub>xY</sub> (GPa)	G <sub>xZ</sub> (GPa)	G <sub>yZ</sub> (GPa)	v <sub>xy</sub>	v <sub>yz</sub>	v <sub>zx</sub>	<ρ> (kg/m <sup>3</sup> )	Pertes
PANOBLOC 5 plis	900	1300	46	270	1600	80	0.02	0.9	0.003	110	14%

Le logiciel AcouSYS V2 ne disposant pas, à ce jour, des matrices orthotropes 3D (les plaques épaisses seront dans la V3) il a fallu expérimenter plusieurs hypothèses sur le module d'élasticité notamment. Nous avons réalisé ces investigations sur le système OSB en finition extérieure, vissée directement sur le Panobloc® 5 plis en PSE avec une contre cloison désolidarisée en finition intérieure. Nous présentons Figure 6 trois calculs réalisés avec un panneau supposé isotrope avec pour le premier, un module de 1 GPa proche de la moyenne de E<sub>x</sub> et E<sub>y</sub> (dans le plan du panneau), pour le second, un module de 46 MPa égal à E<sub>z</sub> (dans l'épaisseur) et le dernier, avec le module de l'isolant seul soit 1,8 MPa. Nous pouvons observer que l'approche d'homogénéisation, dont les paramètres équivalents sont donnés Tableau 2, semble adaptée et que la possibilité d'utiliser directement une matrice orthotrope 3D améliorera encore la situation présentée à la Figure 6.

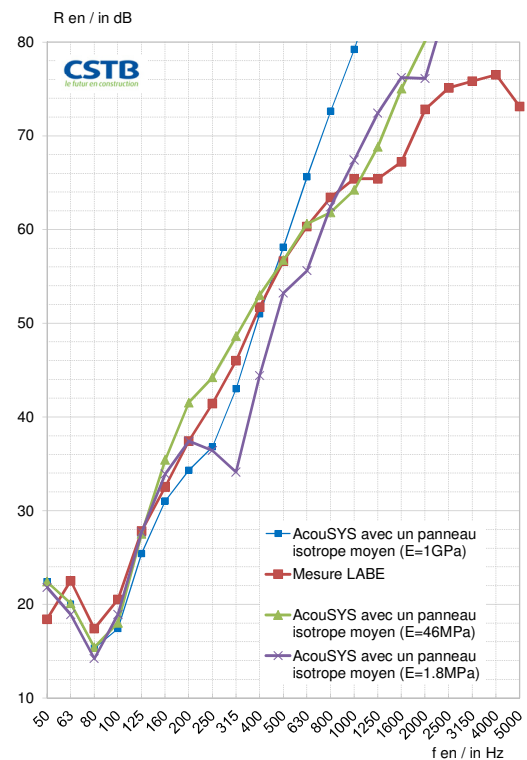


Figure 6 : Comparaison calcul / mesure d'un mur à ossature bois (5 plis) non porteur rempli de PSE, configuration OSB côté extérieur et contre-cloison côté intérieur

Tableau 3 : Indices uniques des configurations de la Figure 6

Configuration	$R_w(C;C_{tr})$ [dB]
Calcul AcouSYS avec panneau équivalent isotrope E=1GPa	48(-4;-12)
Calcul AcouSYS avec panneau équivalent isotrope E=46MPa	52(-6;-15)
Calcul AcouSYS avec panneau équivalent isotrope E=1.8MPa	47(-3;-10)
Mesure LABE	51(-4;-12)

Dans le cas d'une finition intérieure en plaque de plâtre sur tasseau, il y a un court-circuit vibratoire entre la peau intérieure et extérieure. La prise en compte de ce phénomène ne peut pas se faire directement au travers des seules matrices de transfert. Nous avons donc utilisé une approche hybride décrite par C. Guigou et M. Villot dans [1], couplant la SEA (pour les courts-circuits) et la TMM pour le multicouche. La Figure 7 montre l'importance de la prise en compte de ce court-circuit, ainsi que la bonne adéquation calcul/mesure issue de l'approche hybride (TMM+SEA). La modélisation du système dans le plug-in « cloison » d'AcouSYS V2 s'est faite en considérant l'ossature comme étant les tasseaux avec d'un côté une plaque de plâtre seul et de l'autre un parement homogénéisé constitué du Panobloc® PSE et d'un OSB.

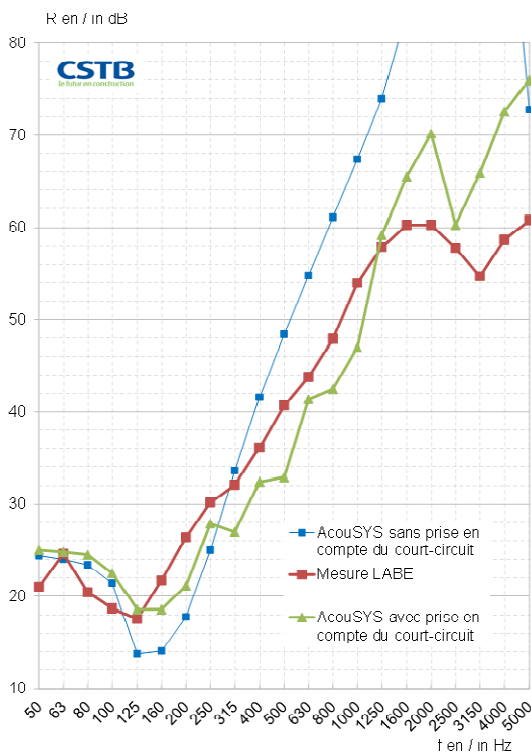


Figure 7 : Comparaison calcul / mesure d'un mur à ossature bois (5 plis) non porteur rempli de PSE, configuration OSB côté extérieur et plaques de plâtre sur tasseau côté intérieur

Tableau 4 : Indices uniques des configurations de la Figure 7

Configuration	$R_w(C;C_{tr})$ [dB]
Calcul AcouSYS sans court-circuit ( $E_{\text{panneau}}=1\text{GPa}$ )	37 (-4;-9)
Calcul AcouSYS avec court-circuit ( $E_{\text{panneau}}=1\text{GPa}$ )	37(-2;-6)
Mesure LABE	40 (-2;-7)

### 4.3 Simulation des Panobloc® avec isolant à cellules ouvertes

La présence d'un isolant poreux complexifie la démarche, en effet les méthodes présentées au paragraphe précédent ou au [2], s'applique à des solides. Si le principe doit pouvoir être utilisé aussi dans ce type de situation, le principe de détermination des paramètres équivalents par des méthodes éléments finis, nécessiterait des investigations plus importantes que ce que nous a permis le projet.

Nous nous sommes donc contentés ici d'une approche empirique afin d'estimer les paramètres du panneau équivalent, modélisé comme un matériau poreux. Le départ de cette approche empirique a été de faire une homogénéisation sur la densité, comme pour le Panobloc® PSE, mais par contre de conserver, en première approche, les autres paramètres de l'isolant poreux, pour le panneau équivalent. La transmission solidienne au travers du treillis bois est donc négligée dans cette approche.

Tout d'abord, nous allons présenter le cas de complexes ne présentant pas de court-circuit entre la peau intérieure et extérieure de celui-ci (contre-cloison désolidarisée en finition intérieure).

Une première série d'investigation est présentée sur les panneaux à base de laine de roche (module d'élasticité de l'isolant seul : 0,55MPa).

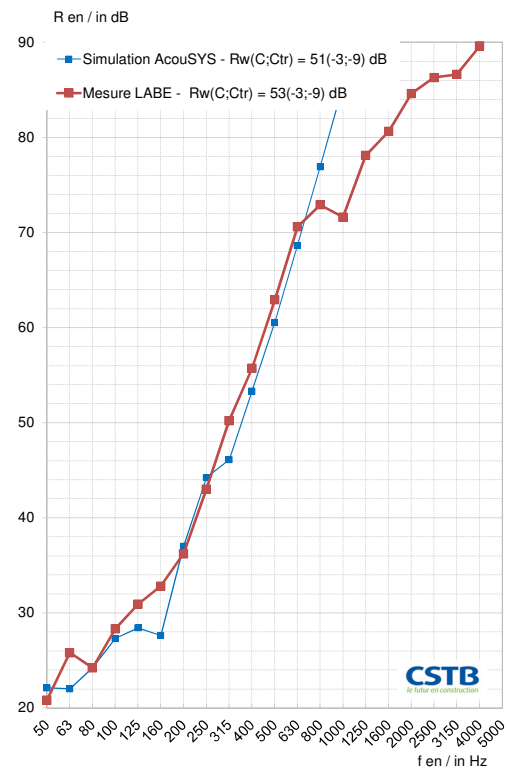


Figure 8 Comparaison calcul / mesure d'un mur à ossature bois (5 plis) non porteur rempli de laine de roche, configuration OSB côté extérieur et contre-cloison côté intérieur

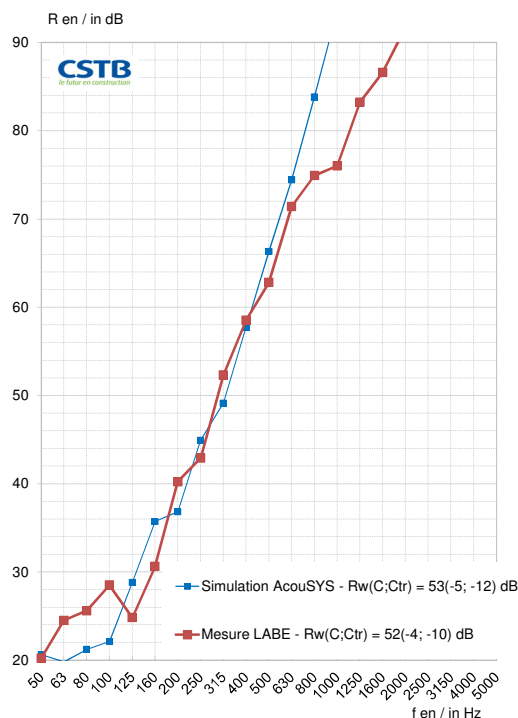


Figure 9 : Comparaison calcul / mesure d'un mur à ossature bois (9 plis) non porteur rempli de laine de roche, configuration OSB côté extérieur et contre-cloison côté intérieur

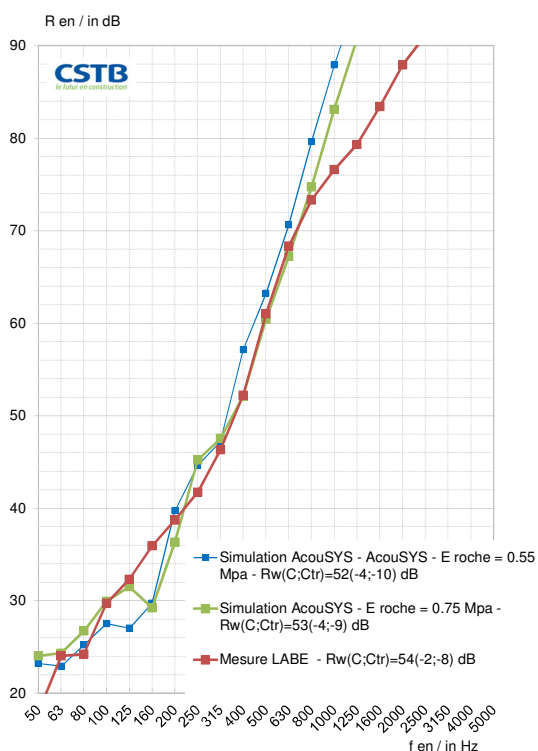


Figure 10 : Comparaison calcul / mesure d'un mur à ossature bois (5 plis) porteur rempli de laine de roche, configuration OSB côté extérieur et contre-cloison côté intérieur

Les trois systèmes dont les comparaisons calculs mesures sont proposées aux Figure 8, Figure 9 et Figure 10, permettent d'appréhender l'impact de l'augmentation du nombre de plis ainsi que du caractère porteur ou non du panneau. Ce dernier point, qui correspond à une densification du nombre de latte de bois dans les plis

verticaux dans la configuration porteur, nécessite un léger recalage (augmentation de 0,55MPa à 0,77MPa) du module d'élasticité si l'on souhaite améliorer la corrélation (cf. Figure 10).

Nous observons globalement une bonne adéquation entre calcul et mesure et les indices globaux calculés s'avèrent toujours légèrement conservatifs par rapports aux essais.

Pour ce qui est des panneaux à base de laine de verre, la même démarche a été menée. Cependant l'isolant étant très peu dense ( $30\text{kg/m}^3$ ), il a semblé intéressant de comparer une homogénéisation en prenant le module de la laine de verre seul (0,043 MPa), puis un module « recalé » (0,22 MPA) empiriquement par rapport aux essais.

Les résultats présentés Figure 11 montre là aussi une bonne adéquation, même si le recalage du module semble un affinage intéressant quand on regarde la comparaison des courbes. Les indices uniques des simulations sont, dans ce cas encore, légèrement conservatif par rapport aux essais.

Il serait intéressant dans un travail futur, de pouvoir déterminer de façon plus objective les règles de déterminations des paramètres homogénéisé de panneaux complexes à base de matériaux poreux, notamment pour les matériaux poreux à faible module d'élasticité. Le travail initié dans sa thèse par C. Coguenanff [4] pourra probablement apporter des éléments à cette discussion.

Nous avons ensuite étudié une finition intérieure posant plus de problèmes sur le plan de la modélisation. Il s'agit de l'utilisation d'une finition intérieure (ici plaque de plâtre) vissée sur tasseaux eux-mêmes fixés directement sur les Panobloc®. Ce cas de figure crée un court-circuit structurel entre la peau intérieure et extérieure du système. En première approximation nous avons fait l'hypothèse d'absence de ces courts circuits. La Figure 12 illustre les calculs ainsi réalisés sur un panneau à base de laine de roche. Nous pouvons y voir que, même si les basses fréquences sont assez bien appréhendées, il n'en est pas de même pour la pente de la courbe. En effet la présence des courts circuits structuraux diminue la pente de la courbe de 3 à 5 dB/octave. Ceci est d'autant plus problématique que l'approche numérique n'est plus, ici conservative. Un premier moyen d'affiner cette démarche, serait d'utiliser une méthode hybride SEA + TMM, mais les paramètres équivalents de l'ossature (ici le treillis du panneau + les tasseaux) ne sont pas aisés à déterminer et cela reste un axe de recherche pour le futur.

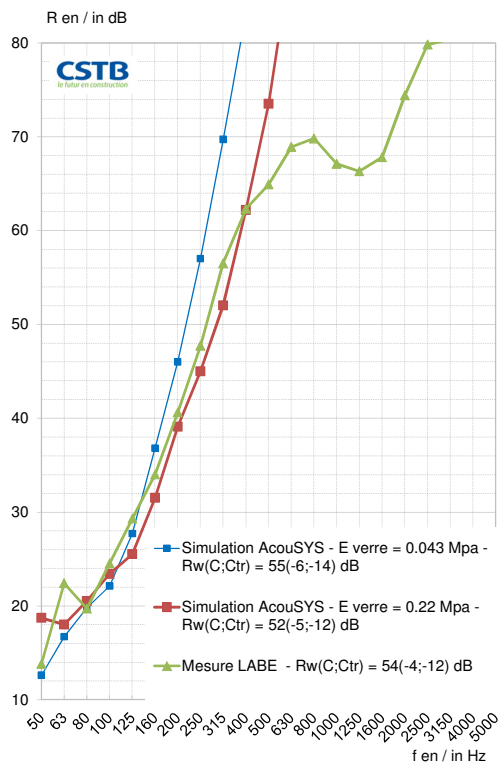


Figure 11 : Comparaison calcul / mesure d'un mur à ossature bois (5 plis) non porteur rempli de laine de verre, configuration OSB côté extérieur et contre-cloison côté intérieur

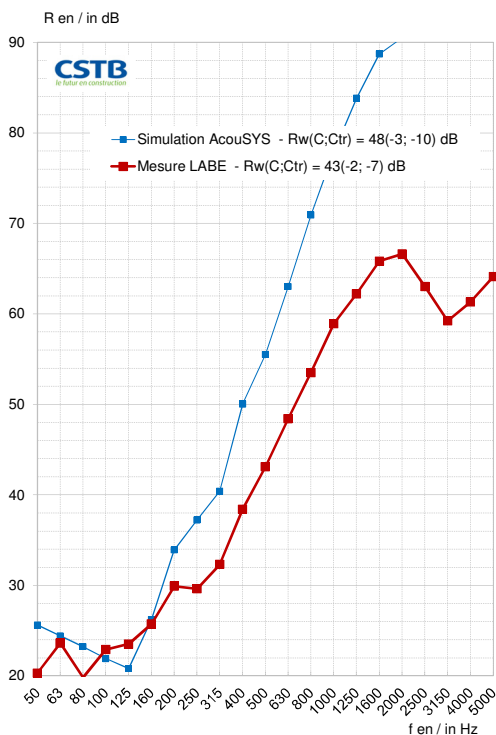


Figure 12 : Comparaison calcul / mesure d'un mur à ossature bois (5 plis) porteur rempli de laine de roche, configuration OSB côté extérieur et plaques de plâtre type BA13 sur tasseaux côté intérieur

## 5 Conclusion

Cette étude a permis d'investiguer une approche pragmatique de systèmes à ossature bois complexe. Celle-ci permet de façon simple de modéliser ces systèmes en approchant correctement leur comportement physique. Les valeurs uniques simulées étant par ailleurs légèrement conservatives, la démarche prédictive reste sécuritaire.

Certaines configurations restent cependant plus difficiles à appréhender et nécessiteraient des investigations plus approfondies. La démarche en cours de développement par C. Coguenanff dans sa thèse [4] constitue une piste intéressante qu'il sera intéressant d'explorer pour répondre à cette problématique.

Dans l'ensemble, la combinaison d'une campagne d'essais significative (plus de 20 configurations) couplée avec une démarche de simulation basée sur les matrices de transfert permet de disposer d'une approche robuste pour l'évaluation d'un très grand nombre de systèmes complexes composés en leur cœur du concept innovant de Panobloc® produit par la société Techniwood.

## Remerciements

Les auteurs remercient la société TECHNIWOOD pour le financement de ce travail.

## Références

- [1] Guigou-Carter, C., & Villot, M. (n.d.). «Analytical and experimental study of single frame double wall. » *Euronoise*. Tampere. (2006)
- [2] G. Jacques, S. Berger, V. Gibiat, P. Jean, M. Villot & S. Ciukaj, « A homogenized vibratory model for predicting the acoustic properties of hollow brick walls », *Journal of Sound and Vibration* 330 3400-3409 (2011).
- [3] M.L. Munjal, «Response of a multi-layered infinite plate to an oblique plane wave by means of transfer matrices», *Journal of Sound and Vibration* 162, 333-343, (1993).
- [4] C. Coguenanff, « Optimisation sous Incertitudes, en Grandes Dimensions, des Performances Acoustiques d'une Paroi Séparative à Structure Légère en Basses Fréquences : Problématiques Dynamiques », *CFA 2014 Poitiers*