

CFA/VISHNO 2016

**Modélisation et quantification des incertitudes pour la
prédiction robuste de la performance basse fréquence des
composants à structure légère**

C. Coguenanff^a, C. Desceliers^b, C. Guigou Carter^a et P. Jean^a

^aCSTB, 24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-D'Hères, France

^bUniversité Paris-Est, MSME UMR 8208 CNRS, 5 Boulevard Descartes, 77454
Marne-La-Vallée, France

corentin.coguenanff@cstb.fr



LE MANS

La problématique des incertitudes est fréquemment mise en avant concernant la prédiction de la performance acoustique des composants séparatifs à structure légère. Etant données les fortes inhomogénéités des matériaux mis en œuvre, une première investigation est construite autour des propriétés mécaniques de ces derniers. Ce travail s'attache alors dans un premier temps à identifier les éventuelles fluctuations statistiques des propriétés mécaniques d'éléments structuraux simples (plaques, poutres) au travers de mesures vibratoires sur des éléments nominale-ment identiques. Dans un second temps, des modèles probabilistes associés aux propriétés mécaniques aléatoires sont construits et leurs paramètres identifiés par résolution de problèmes stochastiques inverses. Finalement, les incertitudes sont propagées à la performance d'isolement d'un composant léger représentatif au travers de la résolution, en basse fréquence, d'un problème aux limites aléatoire.

1 Introduction

Concernant les matériaux de la construction légère, au regard de la dispersion des valeurs nominales des paramètres mécaniques observée dans la littérature [1–4] et du questionnement récurrent sur l'influence des incertitudes dans la performance acoustique du bâtiment [4–12], une démarche de quantification est proposée.

Un modèle numérique donné appartient à une classe de modèles mathématiques avec des entrées et sorties, les dernières étant utilisées pour la construction d'indicateurs de la performance acoustique du système considéré. Les fluctuations statistiques des paramètres d'entrée, où paramètres de conception, se propagent à ces indicateurs. Pour quantifier cette propagation, des modèles probabilistes associés aux paramètres mécaniques sont construits et leurs hyperparamètres identifiés à partir de données expérimentales. La démarche est alors la suivante :

- Dans un premier temps, des mesures vibratoires sont effectuées sur des lots d'éléments nominale-ment identiques afin d'identifier en inverse les réalisations expérimentales de différents paramètres mécaniques.
- Des modèles probabilistes *prior* sont alors construits en accord avec l'approche introduite dans [13]. Les densités de probabilité des variables aléatoires en jeu (à valeurs vectorielles ou matricielles) sont directement construites par l'intermédiaire du principe du maximum d'entropie [14] dans le contexte de la théorie de l'information [15].
- Les hyperparamètres associés sont alors identifiés par maximum de vraisemblance en utilisant les réalisations expérimentales précédentes.

Finalement, la quantification des incertitudes, qui consiste à propager les incertitudes des paramètres du modèle numérique aux indices de performance, est effectuée au travers de la résolution d'un problème aux limites stochastique. Des intervalles de confiance sont alors construits pour l'indice d'affaiblissement acoustique en champ diffus d'un système léger représentatif.

2 Matériaux pour la construction légère

2.1 Poutres bois brut

Le bois brut présente une orthotropie à l'échelle macroscopique qui résulte du mode de croissance de l'arbre [1]. Peuvent ainsi être distinguées les directions longitudinale (l), radiale (r) et tangentielle (t) au regard des propriétés élastiques. Le tenseur d'élasticité associé peut en conséquence être décrit au travers de neuf paramètres :

trois modules d'élasticité (respectivement notés E_l , E_r et E_t), trois modules de cisaillement (G_{lr} , G_{lt} and G_{rt}) et trois coefficients de Poisson (ν_{lr} , ν_{lt} and ν_{rt}). Pour la plupart des applications structurales, les éléments en bois brut sont sollicités en flexion ou bien par des efforts axiaux tels que le module d'Young longitudinal se retrouve être le paramètre élastique de premier ordre. En conséquence, E_l est le plus souvent l'unique paramètre élastique mesuré et accessible pour la conception, tandis que les autres paramètres sont définis relativement à ce dernier. Parmi la grande diversité d'espèces employées dans la construction, les propriétés nominales suivantes (voir Tableau 1) peuvent être extraites de la littérature [1, 16] concernant la famille des pins de construction.

TABLEAU 1 – Pin : propriétés nominales.

E_l	E_t	E_r	G_{lt}	G_{lr}	G_{rt}	ν_{rt}	ν_{lr}	ν_{lt}	ρ^s
[GPa]									[kg/m ³]
9	0.3	0.3	0.7	0.7	0.05	0.1	0.1	0.1	400

Des mesures vibratoires sont effectuées sur deux lots de 8 poutres. A partir de l'information expérimentale obtenue, qui tient dans un ensemble de mobilités de flexion, et d'un modèle éléments finis tridimensionnel, les réalisations expérimentales du module d'Young longitudinal sont identifiées en inverse. Dans la gamme de fréquence [0, 200] Hz considérée, la sensibilité de l'observable aux variations des autres paramètres élastiques est faible et ces derniers ne sont pas identifiés. Les modules d'Young obtenus minimisent ainsi une distance construite entre observable expérimental et sortie du modèle numérique. Ces modules, de même que les densité de masse mesurées, sont donnés dans les tableaux 2 et 3. Une dispersion statistique des modules élastiques est notable avec un facteur 2 entre valeurs min. et max.

TABLEAU 2 – Lot 1 : propriétés mécaniques identifiées.

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
E_l [GPa]	12.5	11.2	10.8	9.2	10	12.5	15	10.5
ρ^s [kg/m ³]	467	464	448	459	448	491	517	456

TABLEAU 3 – Lot 2 : propriétés mécaniques identifiées.

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
E_l [GPa]	8	8	12.5	12.5	10.5	11	11	9.5
ρ^s [kg/m ³]	394	445	469	496	517	480	448	426

2.2 Panneaux de lamelles orientées

Constitués d'un assemblage de lamelles compressées et collées, les panneaux dits OSB présentent, parmi les panneaux manufacturés issus de l'industrie du bois, des propriétés mécaniques supérieures. Ils sont ainsi employés pour des rôles porteurs de charges, le plus souvent comme panneaux de contreventement dans les murs et planchers. Leur processus de fabrication avec lamelles orientées résulte en une légère orthotropie du produit fini [2, 17], avec des propriétés mécaniques supérieures dans la direction longitudinale du panneau. Modélisé la plupart du temps comme isotrope dans la littérature acoustique [4], il peut être noté que l'effet de cette orthotropie reste limité du fait d'un l'assemblage *in fine* avec des éléments raidisseurs. La littérature disponible [1–4, 8] amène à choisir *a priori* les propriétés nominales données dans le Tableau 4.

TABLEAU 4 – OSB : propriétés nominales.

E_x	E_y	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}	ν_{xy}	ρ^s
[GPa]						[kg/m ³]
5	2	1.5	1	2	0.3	550

De même que pour les poutres, des mesures vibratoires sont effectuées sur un lot de 10 panneaux nominalement identiques. Pour l'identification, un modèle de plaque Mindlin-Reissner, homogène orthotrope, est utilisé. Par rapport au cas des poutres, la sensibilité de l'observable aux variations des paramètres d'entrée du modèle permet d'identifier des paramètres élastiques supplémentaires, dont les valeurs sont données dans le Tableau 5.

TABLEAU 5 – OSB : propriétés mécaniques identifiées.

	E_x	E_y	G_{xy}	ν_{xy}	ρ^s
	[GPa]				[kg/m ³]
B1	4.54	2.47	1.04	0.15	592
B2	3.95	2	0.97	0.15	589
B3	3.59	2.07	0.94	0.32	573
B4	3.52	1.81	0.8	0.45	581
B5	3.0	1.52	0.83	0.43	552
B6	3.76	1.93	0.96	0.4	581
B7	3.73	1.84	0.93	0.41	586
B8	3.39	1.73	0.94	0.42	570
B9	3.49	2.07	0.94	0.34	568
B10	3.4	1.93	1.0	0.39	586

2.3 Plaques de plâtre

Les plaques de plâtres typiquement utilisées dans le bâtiment sont constituées d'une couche de plâtre isotrope compris entre deux feuilles de carton orthotropes [18]. Le matériau multi-couche effectif qui en résulte affiche donc une légère orthotropie. Il doit de plus être noté qu'un certain nombre de produits mettent en œuvre des plâtres renforcés de fibres ou capables de conserver un plus haut pourcentage d'eau chimiquement liée, pour des raisons de résistance au feu notamment, ce qui résulte en des propriétés mécaniques grandement modifiées. Dans ce qui suit, le produit le plus courant (plaque simple de 13 mm d'épaisseur) est considéré.

Le Tableau 6 donne alors des valeurs nominales en accord avec la littérature disponible [3, 4, 8].

TABLEAU 6 – Plaques de plâtre 13 mm : propriétés nominales.

E_x	E_y	G_{xy}	G_{yz}	G_{xz}	ν_{xy}	ρ^s
[GPa]						[kg/m ³]
2.5	2	1	1	1	0.3	700

De même que pour l'OSB, les valeurs identifiées des propriétés mécaniques sont données dans le Tableau 7.

TABLEAU 7 – Plaque plâtre 13 mm : propriétés mécaniques identifiées.

	E_x	E_y	G_{xy}	ν_{xy}	ρ^s
	[GPa]				[kg/m ³]
B1	2.95	2.32	1.07	0.19	712
B2	2.88	2.34	1.1	0.22	706
B3	2.88	2.28	1.12	0.2	706
B4	2.9	2.32	1.12	0.22	712
B5	2.85	2.27	1.12	0.2	704
B6	2.87	2.35	1.09	0.15	704
B7	2.84	2.28	1.13	0.2	706
B8	2.88	2.32	1.05	0.3	712
B9	2.55	2.08	0.96	0.22	704
B10	1.97	2.39	0.88	0.28	688

3 Approche probabiliste des incertitudes sur les propriétés mécaniques

3.1 Modèle probabiliste *prior* pour des variables aléatoires à valeur dans \mathbb{R}^+

Suivant [13], le vecteur des paramètres mécaniques \mathbf{p} est modélisé par une variable aléatoire $\mathbf{P} = (P_1, \dots, P_{n_p})$ à valeurs dans $C_{par} \subset \mathbb{R}^{n_p}$, et dont le modèle probabiliste *prior* est défini par la fonction de densité de probabilité associée $\mathbf{p} \mapsto p_{\mathbf{p}}(\mathbf{p}; \delta_{\mathbf{p}})$ de C_{par} dans \mathbb{R}^+ . Le modèle probabiliste dépend alors du vecteur des hyperparamètres $\delta_{\mathbf{p}}$ qui appartient à un ensemble admissible $C_{\mathbf{p}}$. Dans le contexte de ce travail, peu d'information expérimentale est disponible et, en conséquence, la dépendance statistique des éléments de \mathbf{P} ne peut pas être évaluée. Le principe du maximum d'entropie amène alors à la construction de modèles probabilistes statistiquement indépendants pour ces variables.

Soit P_i une variable aléatoire, élément du vecteur aléatoire \mathbf{P} , modélisant les fluctuations statistiques d'un paramètre mécanique strictement positif tel qu'un module d'Young ou une densité de masse. Le modèle probabiliste *prior* associé à cette variable aléatoire à valeur dans $]0, +\infty[$ est construit en utilisant le principe du maximum d'entropie [14] sous les contraintes de l'information disponible suivante : $\underline{p}_i = E\{P_i\}$ est la valeur moyenne de P_i ; P_i^{-1} est un processus stochastique du second ordre.

Soit σ_{P_i} l'écart type associé à P_i et $\delta_{P_i} = \sigma_{P_i}/\underline{p}_i$ un paramètre de dispersion. Par suite au principe du maximum d'entropie, la variable aléatoire P_i suit une loi

Gamma [13, 19] dont la densité de probabilité associée s'écrit pour $0 \leq \delta_{p_i} < 1/\sqrt{2}$ telle que

$$p_{P_i}(x) = \mathbb{1}_{]0,+\infty[}(x) \frac{x^{(a-1)} e^{-\frac{x}{b}}}{b^a \Gamma(a)}, \quad (1)$$

avec

$$a = \delta_{p_i}^{-2} \quad \text{et} \quad b = \underline{p}_i \delta_{p_i}^2. \quad (2)$$

La fonction $\mathbb{1}_{]0,+\infty[}(x)$ vaut 1 pour x dans $]0,+\infty[$ et 0 autrement. La fonction Gamma est de plus définie telle que

$$\Gamma(z) = \int_0^{+\infty} t^{z-1} e^{-t} dt. \quad (3)$$

3.2 Modèle probabiliste *prior* pour des matrices d'élasticité anisotropes aléatoires

Le modèle de plaque Mindlin-Reissner, homogène orthotrope, constitue le modèle moyen. Dans ce qui suit, il est proposé de prendre en compte les fluctuations anisotropes autour d'un comportement élastique qui serait en moyenne orthotrope. En utilisant la notation de Voigt pour une représentation matricielle de la loi de Hooke généralisée, la matrice d'élasticité $[C^{ela}(\mathbf{p})]$ de dimension $(m \times m)$ est introduite (dans le cas de la théorie des plaques, $m = 5$). Cette dernière est symétrique définie positive et, en conséquence, les fluctuations statistiques associées peuvent être modélisées au travers d'une variable aléatoire à valeurs matricielles $[C^{ela}]$, dont le modèle probabiliste *prior* peut être construit en utilisant l'approche probabiliste non paramétrique des incertitudes [19, 20]. La dépendance statistique des différents paramètres élastiques est alors prise en compte et la signature de la matrice d'élasticité est préservée. Une approche comparable a par exemple été mise en oeuvre dans [21, 22].

Soit $[C^{ela}]$ la matrice d'élasticité moyenne, symétrique définie positive. Il existe en conséquence une factorisation de Cholesky telle que

$$[C^{ela}] = [B^{ela}]^T [B^{ela}]. \quad (4)$$

Par suite, le modèle probabiliste de la matrice d'élasticité aléatoire $[C^{ela}]$ qui modélise les fluctuations statistiques dans $[C^{ela}(\mathbf{p})]$ est construit tel que

$$[C^{ela}] = [B^{ela}]^T [G_{ela}] [B^{ela}], \quad (5)$$

où $[G_{ela}]$ est une matrice aléatoire symétrique définie positive de dimensions $(m \times m)$. La fonction de densité de probabilité associée à $[G_{ela}]$ est construite par maximum d'entropie sous la contrainte de l'information disponible et, suivant [19, 20], telle que

$$p_{[G_{ela}]}([G]) = \mathbb{1}_{\mathbb{M}_m^+(\mathbb{R})}([G]) C_G \det\{[G]\}^a e^{-b \text{tr}\{[G]\}}, \quad (6)$$

où

$$a = (m+1) \frac{(1 - \delta_{ela}^2)}{2\delta_{ela}^2} \quad \text{and} \quad b = \frac{m+1}{2\delta_{ela}^2}. \quad (7)$$

La fonction $\mathbb{1}_{\mathbb{M}_m^+(\mathbb{R})}([G]) = 1$ si $[G]$ appartient à $\mathbb{M}_m^+(\mathbb{R})$ et $\mathbb{1}_{\mathbb{M}_m^+(\mathbb{R})}([G]) = 0$ autrement. De plus, C_G est une constante positive telle que

$$C_G = \frac{(2\pi)^{-m(m-1)/4} b^{mb}}{\prod_{i=1}^m \Gamma(b + \frac{1-i}{2})}. \quad (8)$$

Le modèle probabilite *prior* de $[C^{ela}]$ dépend alors de la matrice moyenne $[C^{ela}]$ et d'un paramètre δ_{ela} qui contrôle le niveau de fluctuation statistique.

3.3 Identification des hyperparamètres à partir de données expérimentales

Supposons que l'on dispose de N_{mes} réalisations statistiquement indépendantes d'un système réel aléatoire et, en conséquence, d'un certain nombre de réalisations statistiquement indépendantes d'un observable expérimental aléatoire défini sur un espace probabilisé $(\Theta_{mes}, \mathcal{T}_{mes}, \mathcal{P}_{mes})$. Dans la Section 2, une famille de réalisations indépendantes de paramètres mécanique $\{\mathbf{p}^{exp}(\theta_1), \dots, \mathbf{p}^{exp}(\theta_{N_{mes}})\}$ a été identifiée à partir de N_{mes} problèmes inverses déterministes. L'objectif est alors d'identifier les hyperparamètres des modèles probabilistes introduits dans les Sections 3.1 et 3.2 par principe de maximisation de vraisemblance.

En particulier, les hyperparamètres associés à l'espérance des variables aléatoires précédemment introduites, tel que \underline{p}_i ou $[C^{ela}]$ sont estimés à partir des valeurs données dans la Section 2 tel que

$$\underline{p}_i = \frac{1}{N_{mes}} \sum_{j=1}^{N_{mes}} p_i^{exp}(\theta_j), \quad (9)$$

$$[C^{ela}] = \frac{1}{N_{mes}} \sum_{i=1}^{N_{mes}} [C^{ela}(\mathbf{p}^{exp}(\theta_i))], \quad (10)$$

où $[C^{ela}]$ est en conséquence la matrice moyenne d'élasticité orthotrope. Alors, les hyperparamètres associés aux dispersions statistiques sont identifiés par maximisation des estimateurs de log-vraisemblance suivants

$$\mathcal{L}_{\mathbf{p}}(\delta_{\mathbf{p}}) = \sum_{i=1}^{N_{mes}} \ln(p_{\mathbf{p}}(\mathbf{p}^{exp}(\theta_i); \delta_{\mathbf{p}})), \quad (11)$$

$$\mathcal{L}_{[C^{ela}]}(\delta_{ela}) = \sum_{i=1}^{N_{mes}} \ln(p_{[C^{ela}]}([C^{ela}(\mathbf{p}^{exp}(\theta_i))]; \delta_{ela})). \quad (12)$$

Concernant l'estimateur construit dans l'Eq. (12), il doit être noté que c'est la fonction de densité de probabilité $p_{[C^{ela}]}$ qui est évaluée. La transformation depuis $p_{[G_{ela}]}$ est explicitée dans [21]. Finalement, le Tableau 8 donne les valeurs numériques des hyperparamètres de dispersion identifiés par maximum de vraisemblance relatifs aux propriétés élastiques et de densité de masse des différents matériaux légers considérés. En particulier, il est peut être observé que les hyperparamètres de dispersion prennent des valeurs inversement proportionnelles aux niveaux d'inhomogénéité macroscopique des matériaux considérés.

TABLEAU 8 – Hyperparamètres de dispersion identifiés.

Pin		OSB		Plâtre 13mm	
δ_{E_i}	δ_{ρ}	δ_{ela}	δ_{ρ}	δ_{ela}	δ_{ρ}
0.16	0.065	0.14	0.020	0.07	0.009

4 Propagation des incertitudes à un indice d'affaiblissement en champ diffus

4.1 Modèle nominal

La performance d'isolement au bruit aérien en champ diffus d'un double séparatif léger est investiguée. Les

dimensions de ce dernier sont $L_x=3.800$ m et $L_y=2.250$ m. Le système (voir Figure 1) est symétriquement conçu de part et d'autre d'une lame d'air de 2 cm. L'ossature primaire est constituée de 22 montants (11 pour chaque mur simple, espacés de 400 mm et dont les dimensions sont de 140 mm \times 45 mm). Un matériau isolant fibreux, dont les propriétés sont données dans le Tableau 9 est placé entre les montants. Des panneaux de contreventement OSB sont fixés sur l'ossature primaire, côté face extérieure du double mur. Une ossature secondaire de 22 tasseaux verticaux (11 pour chaque mur simple, espacés de 400 mm et dont les dimensions sont de 45 mm \times 27 mm) est fixée sur le contreventement et supporte une double épaisseur de plaques de plâtre 13 mm. Une lame d'air de 27 mm est alors présente entre le contreventement et le parement. Sur la Figure 2, les zones grisées montrent la position de l'ossature primaire.

Un modèle numérique est construit à partir d'un code éléments finis interne, avec des maillages compatibles entre les domaines structuraux, acoustiques et poreux et adaptés à la bande de fréquence $\mathbb{B} = [10, 280]$ Hz. Le matériau fibreux, dont la phase solide est très souple et non fixée à la partie structure du système, est modélisé comme un fluide équivalent "limp frame" [23]. Le critère de maillage est sélectionné en rapport à la plus petite longueur d'onde présente dans la bande considérée, en l'occurrence une onde de Biot, pour donner une densité de 25 éléments par mètre. L'assemblage des différents composants est supposé parfaitement rigide et le système parfaitement encastré sur son bord. Finalement, un coefficient d'amortissement structural $\eta_s = 0.02$ est fixé pour l'ensemble de la structure.

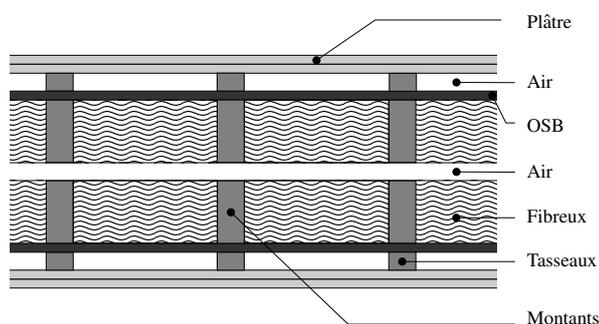


FIGURE 1 – Double séparatif : vue du dessus.

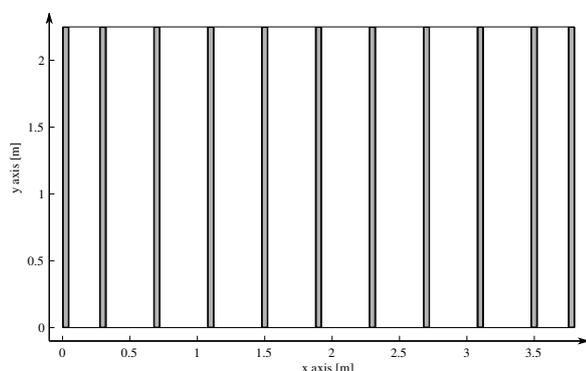


FIGURE 2 – Double séparatif : vue de face avec montants apparents.

L'évaluation de la performance d'isolement au bruit aérien en champ diffus est effectuée par construction d'un indice d'affaiblissement tel que dans [24] et l'excitation du système consiste en des ondes planes de différentes

incidences. Les ondes rasantes sont écartées en fixant une incidence maximale de 78 degrés.

TABLEAU 9 – Propriétés de l'isolant fibreux.

Densité de masse $(1 - \phi)\rho^s$	70	kg/m ³
Porosité ϕ	0.9	
Résistivité σ	50000	N.s/m ⁴
Tortuosité α_∞	1.7	
Long. car. visqueuse Λ	60	μ m
Long. car. thermique Λ'	150	μ m
Pression standard P_0	1.015×10^5	Pa
Densité de l'air ρ^f	1.21	kg/m ³
Coefficient adiabatique γ	1.4	
Vitesse du son c_0	340	m/s
Nombre de Prandtl Pr	0.72	
Viscosité dynamique η_f	1.81×10^{-5}	N.s/m ²

4.2 Propagation et quantification des incertitudes

Le système considéré est un assemblage d'éléments de bois brut (montants, tasseaux), d'OSB (contreventement) et de plâtre (parement). Les fluctuations statistiques des propriétés élastiques et de densité de masse sont modélisées par l'intermédiaire des variables aléatoires introduites dans les Sections 3.1 et 3.2. Les valeurs moyennes et hyperparamètres de dispersion identifiés dans la Section 3.3 sont utilisés. Les incertitudes associées aux paramètres mécaniques des différents composants structuraux peuvent alors être propagées à un observable aléatoire (ici un indice de performance acoustique) au travers de la résolution d'un problème aux limites stochastique.

Soit $W \in \mathbb{R}$ un observable aléatoire et la fonction de densité de probabilité associée $x \mapsto p_W(x)$ de \mathbb{R} dans \mathbb{R}^+ . Etant donné une probabilité P_c telle que $0 < P_c < 1$, la fonction $P_c \mapsto \zeta(P_c)$ de]0, 1[dans \mathbb{R} est définie telle que

$$\zeta(P_c) = \arg \min_{w \in \mathbb{R}} \left| \int_{-\infty}^w p_W(x) dx - P_c \right|. \quad (13)$$

L'enveloppe de l'intervalle de confiance associé à une probabilité P_c pour l'observable aléatoire W est alors définie par

$$w_{min} = \zeta \left(\frac{1 - P_c}{2} \right) \quad \text{et} \quad w_{max} = \zeta \left(\frac{1 + P_c}{2} \right), \quad (14)$$

et estimée par la méthode de Monte Carlo. La Figure 3 affiche alors l'intervalle de confiance associé à une probabilité $P_c = 0.9$ pour l'indice d'affaiblissement acoustique en champ diffus associé au double séparatif considéré.

Les fluctuations statistiques de l'indice d'affaiblissement en champ diffus résultant des incertitudes portant sur les propriétés mécaniques des composants structuraux sont alors, dans le cas présent, limitées à quelques décibels. Un tel résultat est cohérent avec des observations expérimentales découlant de tests de répétabilité [8] (mêmes conditions expérimentales, plusieurs systèmes nominalemt identiques). Une telle répétabilité suggère en effet que la sensibilité de l'observable (indice d'affaiblissement) aux fluctuations paramétriques reste faible.

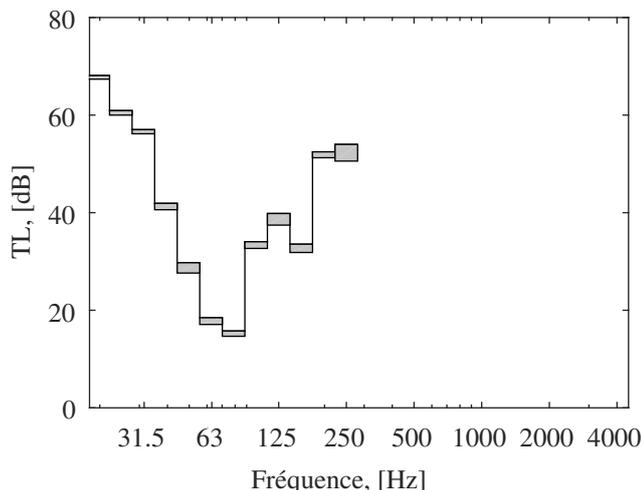


FIGURE 3 – Intervalle de confiance associé à une probabilité $P_c = 0.9$ pour l'indice d'affaiblissement en champ diffus.

5 Conclusion

Dans cet article, la problématique de la prédiction robuste de la performance acoustique des systèmes séparatifs légers du bâtiment est abordé au travers d'un aspect incertitudes des propriétés mécaniques des composants. Une démarche de quantification est proposée avec pour point de départ l'identification des réalisations de ces propriétés pour des lots d'éléments nominalelement identiques. Dans un second temps, des modèles probabilistes sont construits au regard de l'information disponible. Les hyperparamètres de ces derniers sont alors identifiés à partir de l'information expérimentale obtenue. Enfin, les incertitudes associées aux propriétés mécaniques des composants d'un système séparatif représentatif sont propagées à la performance d'isolement aérien en champ diffus de ce dernier.

Remerciements

Les auteurs remercient le département Recherche et Développement du CSTB pour le financement de ce travail.

Références

- [1] Laboratory Forest Products, *Wood handbook - Wood as an engineering material*. United States Department of Agriculture, Forest Service, 2010.
- [2] *NF EN 12369-1 : Wood-based panels - Characteristic values for structural design - Part 1 : OSB, particleboards and fiberboards*. 2001.
- [3] M. Villot, J.-l. Kouyoumji, E. Gerretsen, D. Bard, B. Zhang, B. Rasmussen, B. Ingelaere, C. Hopkins, U. Schanda, F. Schopfer, C. Guigou-Carter, A. Homb, N. Labonnote, S. Lentzen, A. Koopman, A. Jorissen, and A. Harte, "WG4 : Acoustic Design of Lightweight Timber Frame Constructions," tech. rep., COST Action FP0702 - Forests, their Products and Services, 2012.
- [4] A. Bolmsvik, A. Linderholt, A. Brandt, and T. Ekevid, "FE modelling of light weight wooden assemblies – Parameter study and comparison between analyses and experiments," *Engineering Structures*, vol. 73, pp. 125–142, 2014.
- [5] R. J. M. Craik and J. A. Steel, "The effect of workmanship on sound transmission through buildings : Part 1—Airborne sound," *Applied Acoustics*, vol. 27, no. 1, pp. 57–63, 1989.
- [6] R. J. M. Craik and J. a. Steel, "The effect of workmanship on sound transmission through buildings : Part 2—Structure-borne sound," *Applied Acoustics*, vol. 27, no. 1, pp. 137–145, 1989.
- [7] C. Johansson, "Field Measurements of 170 Nominally Identical Timber Floors - A Statistical Analysis," in *Proceedings Internoise*, 2000.
- [8] A. Warnock and J. Birta, "Detailed Report for Consortium on Fire Resistance and Sound Insulation of Floors : Sound Transmission and Impact Insulation Data in 1/3 Octave Bands," tech. rep., NRC-CNRC, 2000.
- [9] J. Forssén, W. Kropp, J. Brunskog, S. Ljunggren, D. Bard, G. Sandberg, F. Ljunggren, A. Agren, O. Hallström, H. Dybro, K. Tillberg, K. Larsson, K. Jarnerö, L.-G. Sjökvist, B. Östman, K. Hagberg, Å. Bolmsvik, A. Olsson, C.-G. Ekstrand, and M. Johansson, "Acoustics in wooden buildings State of the art 2008," tech. rep., SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2008.
- [10] R. Öqvist, F. Ljunggren, and A. Agren, "Variations in Sound Insulation in Nominally Identical Prefabricated Lightweight Timber Constructions," *Building Acoustics*, vol. 17, no. 2, pp. 91–103, 2010.
- [11] R. Öqvist, F. Ljunggren, A. Gren, A. Agren, and A. Gren, "On the uncertainty of building acoustic measurements - Case study of a cross-laminated timber construction," *Applied Acoustics*, vol. 73, no. 9, pp. 904–912, 2012.
- [12] K. A. Dickow, P. H. Kirkegaard, and L. V. Andersen, "An evaluation of test and physical uncertainty of measuring vibration in wooden junctions," *Proceedings of the International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics*, 2012.
- [13] C. Soize, "Generalized probabilistic approach of uncertainties in computational dynamics using random matrices and polynomial chaos decompositions," *International Journal For Numerical Methods In Engineering*, vol. 81, no. 8, pp. 939–970, 2010.
- [14] E. T. Jaynes, "Information theory and statistical mechanics," *Physical Review*, vol. 106, no. 4, pp. 620–630, 1957.
- [15] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *The Bell System Technical Journal*, vol. 27, no. July 1928, pp. 379–423, 1948.
- [16] *NF EN 338 : Structural timber - Strength classes*. 2009.
- [17] J. N. Lee and Q. Wu, "Continuum Modeling of Engineering Constants of Oriented Strandboard," *Wood and Fiber Science*, vol. 35, no. 1, 2003.

- [18] S. Sakji, C. Soize, and J.-V. Heck, “Probabilistic Uncertainty Modeling for Thermomechanical Analysis of Plasterboard Submitted to Fire Load,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 134, no. 10, pp. 1611–1618, 2008.
- [19] C. Soize, “Random matrix theory for modeling uncertainties in computational mechanics,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 194, no. 12-16, pp. 1333–1366, 2005.
- [20] C. Soize, “A nonparametric model of random uncertainties for reduced matrix models in structural dynamics,” *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 15, no. 3, pp. 277–294, 2000.
- [21] C. Desceliers, C. Soize, S. Naili, and G. Haiat, “Probabilistic model of the human cortical bone with mechanical alterations in ultrasonic range,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 32, pp. 170–177, 2012.
- [22] J. Guilleminot and C. Soize, “On the statistical dependence for the components of random elasticity tensors exhibiting material symmetry properties,” *Journal of Elasticity*, vol. 111, no. 2, pp. 109–130, 2013.
- [23] R. Panneton, “Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 122, no. 6, 2007.
- [24] F. Sgard, H. Nelisse, and N. Atalla, “On the modeling of the diffuse field sound transmission loss of finite thickness apertures,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 122, no. 1, pp. 302–313, 2007.