

# Développement de corrélations entre résultats d'essais ex-situ et autocontrôles en vue de simplifier les processus de justification des performances des produits à réemployer

Aghiless YAHMI <sup>1,2,3</sup>

*1 Icam site de Nantes, 35 Av. du Champ de Manœuvres, 44470 Carquefou, France*

*2 Nantes Université, Ecole Centrale de Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44600 Saint-Nazaire, France*

*3 Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 77420 Marne-la-Vallée, France*

**RESUME** Le recours aux essais non destructifs en remplacement des essais destructifs est une étape essentielle pour massifier et accélérer le réemploi des produits et matériaux (PM) dans le secteur du bâtiment. Actuellement, l'évaluation des performances des PM après des années de vieillissement repose majoritairement sur des essais destructifs, engendrant des coûts élevés et des délais importants qui freinent leur réemploi. Cet article propose une méthodologie innovante combinant l'analyse modale expérimentale à des approches numériques, permettant d'évaluer les propriétés ainsi que les dégradations des PM tout en préservant leur intégrité. L'approche développée présente l'avantage d'être applicable à différentes familles de produits et de répondre à plusieurs problématiques. Cette étude se concentre sur deux cas spécifiques : la détermination des propriétés, notamment le module d'élasticité et la masse volumique, et la détection de fissures dans les dalles de bardage minérales. Les résultats mettent en évidence la pertinence de cette méthodologie en fournissant des indicateurs fiables et reproductibles, ouvrant ainsi la voie à un réemploi plus systématique des PM, conformément aux principes de l'économie circulaire.

**Mots-clés** réemploi, analyse modale, fissuration, éléments finis, algorithme génétique

## I. INTRODUCTION

Le modèle socio-économique classique fonctionne principalement sur une économie linéaire (Jørgensen et al., 2018) où les entreprises produisent des biens que les consommateurs utilisent avant qu'ils ne se transforment en déchets. Cette pensée linéaire, repose sur une utilisation non viable des ressources et sur la production de grandes quantités de déchets, ce qui engendre des dommages environnementaux de grande ampleur (Wuni, 2022). Face à la raréfaction des ressources, ainsi qu'à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie, l'adoption de modèles économiques alternatifs, tels que l'économie circulaire, devient une nécessité urgente, plaçant le réemploi des matériaux au cœur des solutions durables. Bien que le réemploi ait été omniprésent tout au long de l'histoire, il ne représente aujourd'hui que 1 % dans tout le secteur du bâtiment (Rotor, 2022), en raison de plusieurs obstacles interconnectés. Le vieillissement des différents matériaux de construction entraîne une variabilité de leurs propriétés (Poncelet et al., 2021), rendant leur réemploi incertain et compliquant leur assurance en l'absence de méthodologies de requalification adaptées. Aujourd'hui, ces dernières sont similaires aux méthodologies de produits neufs notamment pour les peaux de bardage rapporté

(Yahmi et al., 2024), engendrant des coûts d'évaluation élevés (Djaber, 2023) et des délais prolongés, dissuadant les acteurs du bâtiment. Ainsi, l'absence de protocoles de requalification adaptés aux enjeux du réemploi freine son développement à grande échelle.

Aujourd'hui, il existe des diagnostics qui permettent d'estimer le potentiel de réemploi d'un produit comme les poutres en bois de structure (Yahmi et al., 2023) mais ne permettent pas d'évaluer ses performances. Les méthodes de contrôle non destructif (CND) offrent une solution prometteuse en accélérant l'évaluation des matériaux tout en réduisant les coûts économiques, énergétiques et environnementaux. Parmi ces méthodes, l'analyse modale se distingue comme une approche efficace pour surmonter les limitations actuelles. Principalement utilisée dans le domaine du contrôle non destructif et de la mécanique des structures, elle permet de caractériser le comportement dynamique d'une structure en étudiant ses fréquences propres, ses modes de vibration et ses déformées modales (Piranda, 2001).

Il est établi qu'il est possible de déterminer analytiquement les fréquences propres d'un élément en fonction de sa géométrie et de ses conditions aux limites (Leissa, 1973). Par ailleurs, la méthode des éléments finis est couramment exploitée pour estimer les propriétés dynamiques des matériaux, notamment le module d'élasticité ( $E$ ), le module de cisaillement ( $G$ ) et le coefficient de Poisson ( $\nu$ ), dans le cas des tuiles et des éléments structurels en bois (Fogue-Djombou et al., 2019; Kouroussis et al., 2017). L'introduction des algorithmes génétiques et de la photogrammétrie dans cette approche permet d'affiner encore davantage la précision (Higoun et al., 2024). Par ailleurs, (Owolabi et al., 2003) ont démontré, sur des poutres en aluminium, que les fréquences naturelles d'une structure sont significativement influencées par la présence de fissures, en établissant des ratios entre un élément intact et un élément fissuré. Leurs résultats expérimentaux ont confirmé que la position et la profondeur des fissures ont un impact mesurable sur les fréquences propres.

Ce travail applique l'analyse modale à l'évaluation des matériaux de réemploi en combinant approche expérimentale, numérique et une méthode innovante basée sur les ratios de modes pour éliminer l'influence des propriétés ( $E$ ,  $\rho$ ) sur les résultats. Cette méthodologie vise à fournir une détection fiable et rapide des défauts tout en préservant l'intégrité des éléments. Par ailleurs, l'intégration d'algorithmes génétiques permettra d'affiner l'identification des propriétés ( $E$ ,  $\rho$ ).

L'approche développée a été appliquée à six gisements de bois lamellé-collé, un gisement de bois massif et cinq gisements de dalles de bardage minérales. Ces dernières sont constituées de pierre reconstituée, un matériau composite composé d'une matrice polymère intégrant plus de 90 % de renforts minéraux. Le présent article se concentre sur l'application de la méthodologie à l'un des gisements de bardage, en présentant en détail les procédures mises en œuvre ainsi que les résultats obtenus.

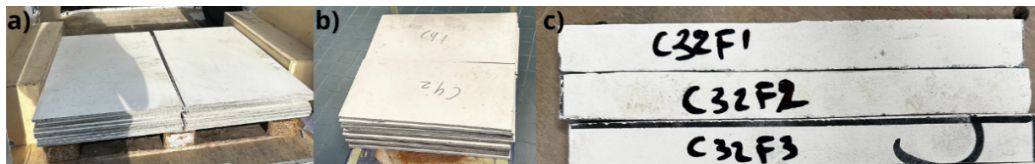
## II. MATERIAUX ET METHODES

L'évaluation des propriétés mécaniques d'un élément nécessite, en premier lieu, d'identifier les propriétés pertinentes à déterminer en fonction de l'usage prévu. Dans le cadre de cette étude, l'objectif est d'évaluer les propriétés dynamiques des éléments, notamment le module d'élasticité  $E$ , ainsi que la masse volumique  $\rho$ , tout en détectant la présence de fissures ou de toute autre dégradation significative.

### A. Matériaux

Pour ce travail, un gisement de 15 dalles de bardage minérales a été récupéré en 2024 d'un chantier de démolition à Vannes en Bretagne. Ces dalles mesurent  $600 \times 900$  mm avec une épaisseur de  $12,36 \pm 0,28$  mm (Figure 1.a). Elles sont composées à 88 % de charges minérales et à 11 % de résine polyester. Chaque élément est identifié par un nom Cx où x est le numéro de la dalle. Deux types d'éprouvettes ont été découpées à l'aide d'une scie diamantée :

- 30 éprouvettes de grande taille ( $600 \times 300 \times h$  mm), illustrées en Figure 1.b, ont été découpées en respectant le sens de la portée principale, correspondant à la direction de sollicitation du bardage. Ce sens a bien été aligné avec la longueur des éprouvettes. Notées Cxy où y = 1 à 3. La masse des éprouvettes a été déterminée à l'aide d'une balance de précision (0,01 g).
- 8 éprouvettes normées de dimensions ( $80 \times 20 \times h$  mm), comme montrées dans la Figure 1.c, découpées suivant la norme ISO 178 (AFNOR, 2019), destinées à un essai de flexion standard. Elles sont notées CxyFz où z est de 1 à 3.



**FIGURE 1.** Illustrations des différentes éprouvettes de peau de bardage (a) Dalles en taille complète, (b) Éprouvettes de grande taille, (c) Éprouvettes de petite taille pour essai normé.

### B. Essai de flexion 3 points

#### 1. Petites éprouvettes

Les essais ont été réalisés sur les éprouvettes normées avec une vitesse de chargement fixée selon la norme ISO 178 (AFNOR, 2019). Les tests ont été faits sur une machine Instron 5566A, équipée d'une cellule de charge de 1 kN (précision de 5%). Le module de Young a été déterminé par corrélation d'image numérique avec GOM Snap 2020 et le logiciel ARAMIS Professional 2020, permettant un suivi sans contact des champs de déformation en surface.

#### 2. Grandes éprouvettes

Le protocole suivi est conforme à la NF EN 14617-2 (AFNOR, 2016), sur la même machine que pour les petites éprouvettes avec une cellule de charge de 10 kN (précision de 5%). Avec des supports de flexion optimisés à un diamètre de 20 mm selon les formules théoriques établis par (Baratta, 1984). La vitesse d'essai a été fixée à 0,25 MPa/s (AFNOR, 2016). Le module de Young et la résistance à la flexion ont été évalués selon la même méthodologie que pour les petites éprouvettes.

### C. Essai de fatigue

Générer une fissure contrôlée dans ce type de matériau fragile sans provoquer une rupture complète représente un défi technique vu sa faible résistance à la propagation des fissures. Pour surmonter cette difficulté, un essai de fatigue est mis en place. L'essai s'est fait dans les mêmes conditions que l'essai de flexion, sur 5 grandes éprouvettes, avec pour seule différence l'application d'une charge cyclique de 700 N (valeur proche du seuil de rupture, déterminée expérimentalement). Cette charge a été appliquée de manière cyclique jusqu'à l'apparition des

premiers signes de fissuration, identifiés par l'émission d'un bruit associé au début de rupture. Le test est alors immédiatement arrêté afin de préserver l'intégrité de la peau de bardage.

#### D. Analyse modale expérimentale

L'analyse modale expérimentale est réalisée pour caractériser les fréquences propres et les modes de vibration des éléments. Les grandes éprouvettes sont posées sur des mousses souples, dont la faible rigidité garantit des conditions aux limites libres, minimisant les interactions avec l'environnement (Bui, 2020). Le protocole consiste à exciter les matériaux à l'aide d'un marteau d'impact instrumenté et à mesurer les réponses vibratoires via des accéléromètres PCB Piezotronics 303A03 grâce à un système Bruel & Kjaer. La fonction de réponse en fréquence (FRF) est ensuite utilisée pour établir la relation entre l'excitation et la réponse vibratoire, permettant d'extraire précisément les fréquences naturelles et d'identifier les modes de vibration (Figure 2). Ces données sont ensuite exploitées pour calibrer les modèles numériques et affiner l'estimation des propriétés mécaniques des matériaux. La reproductibilité des résultats est assurée par l'utilisation de la moyenne obtenue à partir de cinq impacts successifs réalisés.

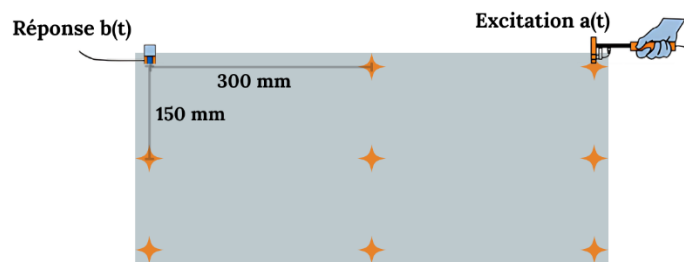


FIGURE 2. Schéma du principe de l'analyse modale expérimentale.

#### A. Méthodologie générale

##### 1. Diagnostic

Le diagnostic préliminaire, basé sur un arbre décisionnel, une analyse visuelle et des outils simples, évalue le potentiel de réemploi des éléments étudiés. Ces derniers ne sont toutefois pas détaillés dans cet article. Les dégradations superficielles, l'altération de l'intégrité du matériau et l'état du système de fixation (trous de vis, rainures) sont pris en compte afin de prévenir tout risque de détachement.

##### 2. Evaluation des propriétés ( $E$ , $\rho$ )

Plusieurs paramètres sont mesurés sur l'ensemble des grandes éprouvettes : masse, dimensions et fréquences propres. Ces données permettent d'estimer une masse volumique apparente  $\rho$  et d'établir un modèle analytique qui utilise la première fréquence modale ( $f_1$ ) pour calculer une valeur initiale du module d'élasticité  $E$  selon l'équation 1, issue de la théorie classique des poutres minces, cette approche est applicable à tout élément dont le ratio épaisseur sur longueur est inférieur à  $1/20$  (Bui, 2020).

$$f_n = \frac{a_n}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{A\rho}} \quad (1)$$

Avec :  $a_1 = \left(\frac{3\pi}{2}\right)^2$  où  $I$  le moment d'inertie secondaire, tandis que  $A$  et  $L$  correspondent respectivement à la section transversale et à la longueur de l'échantillon.

Ces valeurs ( $E$ ,  $\rho$ ) servent ensuite de données d'entrée pour le modèle numérique, qui est la deuxième phase de la méthodologie. Le modèle numérique est construit à partir de la géométrie mesurée en conditions libres et est enrichi par les fissures identifiées. Un script en *Ansys Parametric Design Language* (APDL) pour automatiser la génération du modèle sous Ansys et un algorithme génétique (sous Matlab) sont utilisés pour automatiser l'ajustement des paramètres  $E$  et  $\rho$ , minimisant l'écart de fréquence suivant la formule 2.

$$Erreur_i (\%) = \frac{(f_{exp_i} - f_{num_i})}{f_{exp_i}} \times 100 \quad (2)$$

Cet algorithme repose sur des opérateurs de sélection, de croisement et de mutation afin d'identifier les combinaisons optimales de ces paramètres (Higoun et al., 2024). La taille du maillage, de type quadratique, est optimisée de manière à assurer la convergence des fréquences propres sans alourdir les temps de calcul. Une fois cette convergence atteinte, les valeurs finales de  $E$  et  $\rho$  sont attribuées à l'élément.

### 3. Identification de présence de fissures

Cette troisième partie, consiste à calculer les ratios de fréquences obtenus à partir de l'analyse modale, à l'aide de la formule 3, et à la comparer aux valeurs contenues dans une base de données créée par avance.

$$Ratio_i = f_1 / f_i \quad (3)$$

Cette base de données regroupe des ratios obtenus numériquement à l'aide d'un script combinant Matlab et APDL, appliqué à des modèles présentant des fissures de tailles variables mais conservant la même géométrie que l'élément testé expérimentalement. Cette comparaison permet de détecter, en cas d'écart important entre le numérique et l'expérimental, la présence de dégradations importantes, telles que des fissures ou des altérations internes, non identifiées par le diagnostic initial. Il est important de noter que ce ratio, rarement cité en littérature, constitue une approche innovante qui n'est pas influencée par les propriétés ( $E$ ,  $\rho$ ) de l'élément.

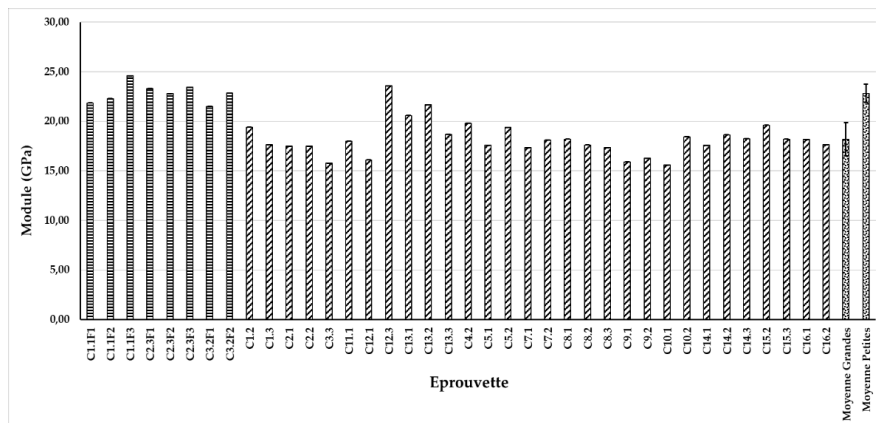
## III. RESULTATS ET DISCUSSION

### A. Diagnostic des dalles

Le diagnostic a été réalisé sur l'ensemble de dalles et des éprouvettes, révélant l'absence de toute dégradation. En effet, ce gisement est visuellement neuf d'après son état, même en l'absence d'informations sur la date d'installation ou son historique d'usage.

### B. Etude de la fiabilité du test de flexion développé

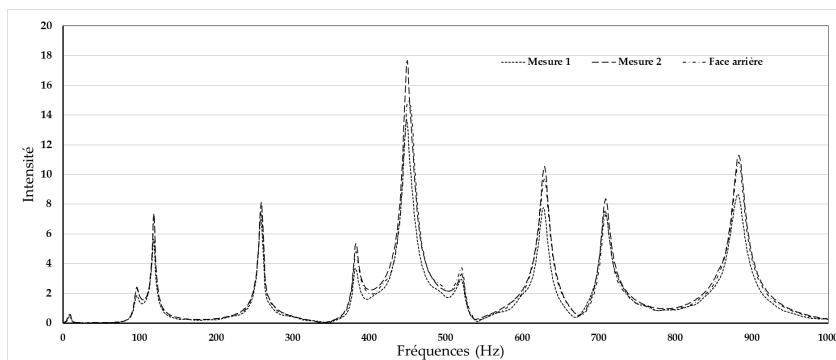
Des tests de flexion ont été effectués sur les petites et grandes éprouvettes afin de comparer les modules obtenus par essais destructifs dans les deux configurations et de vérifier leur concordance. Cette analyse permet d'évaluer la représentativité des essais normés par rapport aux échantillons de plus grande taille, plus proches des conditions réelles d'utilisation. La [Figure 3](#) synthétise les résultats obtenus. Ces derniers montrent que le module moyen des petites éprouvettes  $22,83 \pm 0,92$  GPa est légèrement supérieur à celui des grandes éprouvettes  $18,21 \pm 1,68$  GPa. Ces résultats montrent que les valeurs obtenues sur les grandes éprouvettes sont proches de celles des petites, confirmant ainsi la faisabilité des tests sur des éprouvettes de grande taille pour une évaluation plus représentative des propriétés mécaniques des dalles destinées au réemploi.



**FIGURE 3.** Comparaison des modules obtenus entre les essais de flexion sur petites et grandes éprouvettes.

### C. Détermination des propriétés $E$ et $\rho$

La première étape de l'étude consiste à réaliser des essais d'analyse modale expérimentale sur l'ensemble des grandes éprouvettes. Ces essais sont effectués sur les deux faces de chaque élément afin d'évaluer la répétabilité des mesures. La Figure 4 montre un exemple qui illustre cela. Les intensités varient mais les pics restent similaires démontrant ainsi la répétabilité des mesures et les similarités entre les deux faces.



**FIGURE 4.** Répétabilité des mesures sur les deux faces de l'éprouvette C7.3.

Ensuite, tous les premiers modes de vibration en flexion sont extraits des données traitées à l'aide de deux algorithmes sur Python et Matlab. Le Tableau 1 présente les résultats obtenus par l'algorithme génétique après les simulations numériques.

**TABLEAU 1.** Récapitulatif de quelques résultats analytiques et numériques

Epreuve	$E_{\text{expérimental}}$ (GPa)	$E_{\text{numérique}}$ (GPa)	Ecart (GPa)	Ecart (%)
C5.1	17,58	17,40	0,18	1,02
C5.2	19,40	19,90	-0,50	-2,58
C7.1	17,35	17,00	0,35	2,02
C7.2	18,11	16,38	1,73	9,55
C8.1	18,19	18,50	-0,31	-1,70
C8.2	17,62	18,10	-0,48	-2,72
C8.3	17,35	18,80	-1,45	-8,37

<b>C9.1</b>	15,90	16,10	-0,20	-1,26
<b>C9.2</b>	16,28	15,60	0,68	4,18
<b>C10.1</b>	15,60	16,90	-1,30	-8,33
<b>C14.1</b>	17,58	17,70	-0,12	-0,68
<b>C14.2</b>	18,64	17,60	1,04	5,58
<b>C14.3</b>	18,24	18,90	-0,66	-3,64
<b>C15.2</b>	19,60	18,10	1,50	7,65
<b>C15.3</b>	18,20	17,10	1,10	6,04
<b>C16.1</b>	18,18	18,00	0,18	0,99
<b>C16.2</b>	17,65	16,00	1,65	9,35
<b>Moyenne</b>	17,73	17,53		
<b>Ecart-type</b>	1,04	1,12		

La comparaison entre les modules de Young expérimentaux et numériques, respectivement en moyenne  $17,73 \pm 1,04$  GPa et  $17,53 \pm 1,12$  GPa montre une différence moyenne de 0,20 GPa. Cette faible différence (moins de 10 %) indique que les résultats numériques sont globalement cohérents avec les valeurs expérimentales et confirme que le modèle numérique est globalement fiable pour représenter les propriétés mécaniques observées expérimentalement.

#### D. Détection de présence de fissures

Afin d'identifier la présence de fissures dans les peaux de bardage minérales, la première étape a consisté à isoler l'effet de la variation des propriétés mécaniques sur les fréquences propres. Le [Tableau 2](#) présente des exemples purement numériques d'éléments sains dont les dimensions et propriétés mécaniques sont spécifiées. Les résultats obtenus montrent que les variations de ces dernières n'affectent pas les ratios de fréquences, confirmant ainsi que cette approche permet de s'affranchir des incertitudes liées aux propriétés du matériau. La constance des ratios constitue un indicateur fiable pour détecter et caractériser les fissures, indépendamment des variations des propriétés mécaniques, permettant ainsi une évaluation simplifiée, robuste et généralisable des peaux de bardage minérales en comparant directement les fréquences expérimentales et numériques.

**TABLEAU 2.** Exemples de résultats numériques : influence de différentes combinaisons de (8–12 GPa) et de  $\rho_{\text{numérique}}$  (450–700 kg/m<sup>3</sup>) sur les ratios modaux, avec un coefficient de Poisson  $\nu$  fixé.

L (m)	b (m)	h (m)	Ratio_2	Ratio_3	Ratio_4
0,50	0,0875	0,0100	0,3624	0,3002	0,1848
0,50	0,1625	0,0575	0,6181	0,4393	0,3885
0,86	0,1625	0,0575	0,3891	0,3722	0,3713
1,21	0,0500	0,0100	0,3628	0,2012	0,1851
1,57	0,1625	0,0575	0,3656	0,3654	0,2051
1,93	0,0500	0,0100	0,3628	0,2005	0,1851
2,29	0,1625	0,0575	0,3641	0,3594	0,1868
2,64	0,0500	0,0100	0,3628	0,2003	0,1851
2,64	0,1250	0,0575	0,4629	0,3639	0,1864
3,00	0,0500	0,0100	0,3628	0,2002	0,1851

Pour illustrer et valider ces résultats théoriques, des éprouvettes notées C5.1, C7.1, C14.1, C14.2 et C15.2 ont été soumises à des essais de fatigue pour générer des fissures. Les modes de vibrations

en flexion ( $f_1, f_2, f_3, f_5$  et  $f_6$ ) ont été extraits avant et après fissuration. La fréquence  $f_4$  est absente car elle correspond à un mode de torsion (Bui, 2020) qui n'a pas été détecté lors du test de contrôle non destructif. Conformément aux principes de flexion en trois points, la fissure est générée vers le centre de la partie inférieure de l'échantillon. Elle s'étend sur toute la largeur avec une ouverture très fine. Des modèles numériques ont été réalisés suivant la méthodologie développée et l'ensemble des résultats est présenté dans le [Tableau 3](#).

**TABLEAU 3. Récapitulatif des résultats expérimentaux et numériques de la peau de bardage saine et fissurée.**

Eprouvette	Modèle	Etat	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$f_3$ (Hz)	$f_5$ (Hz)	$f_6$ (Hz)	$E_{\text{numérique}}^*$ (GPa)	$\rho_{\text{numérique}}^*$ (kg/m <sup>3</sup> )
C5.1	Expérimental	Sain	94	115	251	366	434	16,7	2188
		Fissuré	80	113	244	363	436		
	Numérique	Sain	95	114	252	392	439		
		Fissuré	80	117	251	379	442		
C7.1	Expérimental	Sain	94	114	252	363	435	15,88	2167
		Fissuré	82	113	244	361	430		
	Numérique	Sain	95	114	252	392	439		
		Fissuré	83	113	245	383	436		
C14.1	Expérimental	Sain	97	118	261	380	450	16,2	2117
		Fissuré	77	117	250	376	442		
	Numérique	Sain	98	118	261	407	454		
		Fissuré	78	117	250	392	450		
C14.2	Expérimental	Sain	103	130	283	431	482	17,68	2136
		Fissuré	82	129	273	423	479		
	Numérique	Sain	104	128	281	449	488		
		Fissuré	82	126	270	429	484		
C15.1	Expérimental	Sain	99	125	277	425	474	17,28	2206
		Fissuré	80	123	266	418	470		
	Numérique	Sain	100	124	272	437	470		
		Fissuré	84	122	263	422	467		

\* Pour le modèle sain

Pour le modèle numérique de C5.1, par exemple, l'algorithme génétique a déterminé les propriétés  $E = 16,7$  GPa et  $\rho = 2188$  kg/m<sup>3</sup>, qui ont ensuite été retenues. Les modes répertoriés sont globalement similaires entre les cas sain et fissuré, sauf certains modes comme  $f_1$ ,  $f_3$  et  $f_5$  qui montrent une diminution notable. Cette baisse résulte de la fissure, qui modifie la rigidité de l'élément et affecte ainsi les modes (Agarwalla and Parhi, 2013). Globalement, le modèle numérique reproduit avec précision les résultats expérimentaux, avec des écarts inférieurs à 2 % pour  $f_1$ . Ces écarts sont un peu plus importants pour les autres modes, allant jusqu'à 9 % pour  $f_5$ . L'analyse des ratios, présentée dans le [Tableau 4](#), permet de visualiser les valeurs obtenues pour les éléments sains et fissurés, en simulation numérique comme en expérimentation. Les écarts entre les résultats numériques et expérimentaux, respectivement pour les cas sains et fissurés, restent faibles et ne dépassent pas 5 % pour  $f_1$ , et allant jusqu'à 7 % pour  $f_5$ , montrant l'efficacité du modèle numérique et suggérant qu'une optimisation des paramètres, notamment par une mesure plus précise des dimensions et un affinement des calculs via l'algorithme génétique, pourrait encore réduire ces différences et améliorer la précision du modèle. Plus encore, la comparaison entre ratios des

éléments sains et fissurés (en numérique et en expérimental) montre des variations entre 9 % et 19 % selon le mode étudié. Ces résultats indiquent que la simple comparaison des ratios permet de détecter efficacement la présence de dégradations et de rejeter un élément.

**TABLEAU 4. Récapitulatif des ratios calculés ainsi que les écarts en %.**

	Eprouvette	Modèle	Etat	Ratio 2	Ratio 3	Ratio 5	Ratio 6
<b>Ratios</b>	C5.1	Expérimental	Sain	0,817	0,375	0,257	0,217
			Fissuré	0,708	0,328	0,220	0,183
		Numérique	Sain	0,833	0,378	0,243	0,217
			Fissuré	0,682	0,318	0,210	0,180
	C7.1	Expérimental	Sain	0,825	0,373	0,259	0,216
			Fissuré	0,726	0,336	0,227	0,191
		Numérique	Sain	0,834	0,378	0,243	0,217
			Fissuré	0,733	0,338	0,216	0,190
<b>Écarts (%)</b>	C5.1	Comparaisons entre modèles	Entre sain (exp) et fissuré (exp)	13,39	12,45	14,19	15,28
			Entre sain (num) et fissuré (num)	18,19	15,88	13,31	16,90
			Entre sain (exp) et sain (num)	-1,97	-0,84	5,48	-0,10
			Entre fissuré (exp) et fissuré (num)	3,69	3,11	4,52	1,80
	C7.1		Entre sain (exp) et fissuré (exp)	11,99	9,91	12,28	11,75
			Entre sain (num) et fissuré (num)	12,06	10,61	11,09	12,51
			Entre sain (exp) et sain (num)	-1,11	-1,28	6,25	-0,38
			Entre fissuré (exp) et fissuré (num)	-1,03	-0,49	4,97	0,48

## IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### A. Conclusions

- Les simulations numériques concordent bien avec les essais expérimentaux, avec des écarts faibles, confirmant la fiabilité de l'approche sur les dalles (à petite et grande échelle). Une optimisation des paramètres (mesures plus précises, ajustement par algorithme génétique) pourrait améliorer davantage la précision des résultats.
- L'approche développée permet d'évaluer les propriétés mécaniques, et de détecter les fissures. Elle constitue une méthodologie fiable pour la classification des matériaux dans une logique de réemploi. Rapide, simple à mettre en œuvre et sans difficulté technique majeure, l'analyse modale expérimentale offre un fort potentiel d'industrialisation pour le tri et le contrôle qualité, en comblant l'absence actuelle de protocoles de requalification.

### B. Perspectives

- Développer une base de données des ratios de fréquences pour renforcer la détection des dégradations et l'optimisation de l'échantillonnage.
- Comparer avec des dalles neuves pour établir des valeurs de référence et mieux situer les performances des éléments issus du réemploi.
- Définir les limites de la méthode et établir des seuils de rejet en fonction des valeurs de ratios est essentiel pour garantir une évaluation fiable des éléments réemployés.

- Développer des zones de fissuration contrôlées et concevoir un modèle d'interprétation des résultats notamment en se basant sur la base de données des ratios.
- Analyser l'influence de la présence de fissures sur la résistance mécanique, l'évolution des modes de vibration, les variations des ratios de fréquences ainsi que sur l'amortissement.

## REFERENCES

- AFNOR, 2019. NF EN ISO 178 : Plastiques - Détermination des propriétés en flexion.
- AFNOR, 2016. NF EN 14617-2 : Pierre agglomérée - Méthodes d'essai - Partie 2 : détermination de la résistance à la flexion (traction).
- Agarwalla, D.K., Parhi, D.R., 2013. Effect of Crack on Modal Parameters of a Cantilever Beam Subjected to Vibration. *Procedia Engineering, Chemical, Civil and Mechanical Engineering Tracks of 3rd Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE2012)* 51, 665–669. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.094>
- Baratta, F.I., 1984. Requirements for Flexure Testing of Brittle Materials, in: *Methods for Assessing the Structural Reliability of Brittle Materials*. Presented at the *Methods for Assessing the Structural Reliability of Brittle Materials*, ASTM International, pp. 194–222. <https://doi.org/10.1520/STP35245S>
- Bui, T.A., 2020. Experimental and numerical uncertain vibration analysis of multilayered timber structures assembled using compressed wood dowels (These de doctorat). Université de Lorraine.
- Djaber, M., 2023. Equation économique du réemploi dans le bâtiment. IFPEB. URL <https://www.ifpeb.fr/webinaire-equation-economique-du-reemploi-dans-le-batiment/> (accessed 9.16.24).
- Fogue-Djombou, Y.I., Corn, S., Clerc, L., Salze, D., Garcia-Diaz, E., 2019. Freeze-thaw resistance of limestone roofing tiles assessed through impulse vibration monitoring and finite element modeling in relation to their microstructure. *Construction and Building Materials* 205, 656–667. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.211>
- Higoun, A., Amamra, M.A., Bourahla, N., 2024. Structural and Material Identification of Historic Monuments through AI-based Photogrammetry and Ambient Vibration Testing. *Academic Journal of Civil Engineering* 42, 107–116. <https://doi.org/10.26168/ajce.42.1.10>
- Jørgensen, S., Pedersen, L.J.T., 2018. The Circular Rather than the Linear Economy, in: Jørgensen, S., Pedersen, L.J.T. (Eds.), *RESTART Sustainable Business Model Innovation*. Springer International Publishing, Cham, pp. 103–120. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91971-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91971-3_8)
- Kouroussis, G., Ben Fekih, L., Descamps, T., 2017. Assessment of timber element mechanical properties using experimental modal analysis. *Construction and Building Materials* 134, 254–261. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.081>
- Leissa, A.W., 1973. The free vibration of rectangular plates. *Journal of Sound and Vibration* 31, 257–293. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(73\)80371-2](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(73)80371-2)
- Owolabi, G.M., Swamidas, A.S.J., Seshadri, R., 2003. Crack detection in beams using changes in frequencies and amplitudes of frequency response functions. *Journal of Sound and Vibration* 265, 1–22. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(02\)01264-6](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(02)01264-6)
- Piranda, J., 2001. Analyse modale expérimentale. <https://doi.org/10.51257/a-v1-r6180>
- Poncelet, F., Vrijders, J., 2021. J. Technical framework for re-used materials: How can the technical performance of re-used materials be justified? (In French). CSTC, Brussels, Belgium.
- Rotor, 2022. Réemploi des matériaux de construction – Recensement des filières et mise en œuvre des pratiques de réemploi en France.
- Wuni, I.Y., 2022. Mapping the barriers to circular economy adoption in the construction industry: A systematic review, Pareto analysis, and mitigation strategy map. *Building and Environment* 223, 109453. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109453>
- Yahmi, A., Nouri, M., Tahlaiti, M., Khelidj, A., Raffin, C., Place, N., 2023. Mind-Mapping Assessment of Reuse Potential of Glulam: An Experimental Study. *Buildings* 13, 2929. <https://doi.org/10.3390/buildings13122929>
- Yahmi, A., Rolle, A., 2024. Méthodologie de diagnostic et d'évaluation des performances pour le réemploi de bardages rapportés Projet SPIROU.