

# Caractérisation du comportement acoustique des enduits en terre crue

Mathias Ziapkoff<sup>1</sup>, Philippe Glé<sup>1</sup>, Arthur Hellouin de Menibus<sup>2</sup>, Thibaut Blinet<sup>3</sup>, Catherine Guigou-Carter<sup>3</sup>

<sup>1</sup>UMRAE, CEREMA, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, Strasbourg, France

<sup>2</sup>Matélow, Rennes, France

<sup>3</sup>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Marne la Vallée, France

**RESUME** Les systèmes en terre crue suscitent un intérêt croissant dans le domaine du génie civil en raison de leur faible impact énergétique et carbone, notamment les enduits en terre crue, encore peu étudiés comparativement à d'autres types d'enduits comme ceux à base de chaux ou de ciment. L'objectif de ce travail, s'inscrivant dans le projet CarAc'Terre, est de caractériser le comportement acoustique de ces enduits. Il s'agit d'analyser si ces matériaux se comportent de manière purement élastique ou si des phénomènes visco-thermiques doivent être pris en compte. Des expérimentations ont été réalisées à l'échelle matériau sur un certain nombre d'échantillons préparés par des artisans et de compositions variées, avec des terres différentes et en incluant pour certains des fibres biosourcées. En complément des propriétés acoustiques obtenues en incidence normale avec un tube de Kundt, trois paramètres clés ont été mesurés : la résistivité, la porosité et l'élasticité des matériaux. Ces résultats ont ensuite été comparés à des modélisations spécifiques, basées sur des approches théoriques de type solide élastique, squelette-rigide ou poro-élastique. Les analyses ont révélé que les enduits en terre crue présentent des comportements complexes nécessitant la prise en compte des mécanismes de dissipation élastiques et visco-thermiques. Cette étude permet d'approfondir la compréhension des propriétés acoustiques de ces matériaux, ouvrant ainsi de nouvelles pistes pour le dimensionnement acoustique d'une grande variété d'enduits en terre crue.

**Mots-clés** Acoustique, Enduits en terre crue, Résistivité, Porosité, Élasticité

## I. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment est actuellement confronté à deux défis majeurs : promouvoir le bien-être des occupants (Altomonte et al., 2020) tout en minimisant l'impact environnemental des matériaux et des solutions techniques utilisées, qui représentent 40% de la consommation mondiale d'énergie (Pittau et al., 2018). L'utilisation de matériaux durables, tels que les matériaux biosourcés ou géosourcés, caractérisés par des performances thermiques et acoustiques élevées, constitue une solution idéale dans ce contexte (Bhingare et al., 2019). Parmi ces matériaux, les systèmes en terre crue, notamment les bétons en terre-chanvre communément appelés « terre-allégée », suscitent un intérêt croissant. Les bétons en terre-allégée sont des matériaux granulaires biosourcés produits en mélangeant des particules de chanvre avec une terre argileuse. L'utilisation d'un liant argileux présente plusieurs avantages, notamment un impact carbone

environ cinq fois inférieur à celui de la chaux-chaux, car le durcissement de l'argile est réversible, contrairement à celui de la chaux et du ciment. La famille des bétons de chanvre est appréciée à la fois pour ses propriétés hygrothermiques (Colinart et al., 2020) mais aussi, en tant que milieux poreux, pour leurs propriétés acoustiques cruciales pour garantir un niveau élevé de sécurité et de qualité de vie aux habitants (Glé, 2013). Sur les chantiers, il est courant d'ajouter une ou plusieurs couches d'enduit sur des parois en terre-allégée. Ces mélanges de liant et d'additifs (fibres, sable, granulats) apportent une meilleure résistance mais limitent fortement l'absorption acoustique (Kinnane et al., 2016). Parmi eux, les enduits en terre crue sont de plus en plus considérés par la communauté scientifique (Miranda Santos, 2022). Très prometteurs sur le plan acoustique et environnemental, ils pourraient être une bonne alternative aux traditionnels à base de chaux ou de ciment, à condition de lever les zones d'ombre les concernant, notamment sur l'influence de leur formulation. L'objectif de cet article, s'inscrivant dans le cadre du projet CarAc'Terre, est de caractériser le comportement acoustique de différentes formulations d'enduits en terre crue appliquées sur une couche de terre-allégée dans le but d'évaluer l'influence de la formulation et d'initier une modélisation numérique pertinente. Il s'agit de déterminer si l'enduit se comporte de manière purement élastique ou si des phénomènes visco-thermiques doivent être pris en compte. Ce travail est structuré en trois parties. La première section présente les matériaux d'étude avec les différentes formulations d'enduits, ainsi que la procédure expérimentale pour déterminer leurs propriétés acoustiques et mécaniques. Par la suite, les premiers résultats expérimentaux sont analysés et des premières tendances apparaissent. Enfin, les mesures sont comparées à des propositions de modélisations numériques en considérant le comportement des deux couches comme purement élastique isotrope, comme squelette rigide ou poro-élastique.

## II. MATERIAUX ET METHODES

### 1. Description des matériaux

#### 1.1. Matières premières

Concernant la terre-allégée, notée « *ta* », les particules de chanvre ont été transformées par l'association Planète Chanvre. La terre utilisée est une argile betonite de gisement transformée par la société Lafaura. Au sujet des enduits, deux types de terre argileuse de réemploi criblée, la « Sygogne » et la « Paix », ont été fournies par l'entreprise Totem Terre et couleur. Deux variétés de sable ont aussi été incorporées: le sable 0/2 et le sable 0/4. Enfin, quatre types de fibres biosourcées ont été envisagés : de la laine de chanvre courte de la société Agrochanvre, des anas de lin provenant de la fabrique textile linière de Bosc Nouvel, de la chènevotte de type Isocanna et des fibres de paille hachée produites dans une exploitation agricole située à Saint-Maden.

#### 1.2. Fabrication des échantillons

Les échantillons ont été fabriqués par l'entreprise Matelow. Des moules de diamètre **100 mm** et de hauteurs différentes ont été préparés afin de coffrer les échantillons sous forme cylindrique tout en ménageant une réservation d'épaisseur variable pour l'enduit. Au total, 23 formulations d'enduit ont été appliquées sur une même base de terre-allégée. La terre-allégée a été mise en œuvre avec un compactage faible pour éviter le retour élastique et ainsi garantir une

épaisseur théorique à l'état humide de **30 mm**. Quatre échantillons par formulation ont été préparés en même temps avec trois enduits et un non-enduit comme illustrés dans la **FIGURE 1**.



**FIGURE 1.** Exemple de formulation avec trois échantillons enduits (index A,C,D) et un non-enduit (index B)

Chaque formulation diffère par l'épaisseur d'enduit, le type de sable employé, l'absence ou non de fibres biosourcées, le type de fibres et les finitions si appliquées lors de la fabrication. Les échantillons, d'épaisseur « *e* » et d'index « *X* », sont nommés selon une nomenclature commune,  $T\_F\_f\_e\_X$  ou  $T\_S\_f\_e\_X$ , résumée dans le **TABLEAU 1**.

**TABLEAU 1.** Nomenclature des échantillons

Symbole	Définition		Acronyme
T	Type de terre	Terre « la Sygogne »	T1
		Terre « la Paix »	T2
F	Type de fibre	Laine de chanvre courte	L
		Anas de lin	A
		Chênevotte	C
		Paille hachée	P
		Dosage en fibre plus faible	min
S	Type de sable	Sable 0/2	S02
		Sable 0/4	S04
f	Type de finition	Surface talochée	Tal
		Surface talochée et époncée	TalEp

Les dosages présentés dans le **TABLEAU 2** ont été réalisés en proportion volumique, et les constituants ont été pesés à chaque fois pour trouver le dosage massique auquel cela correspond. Il est important de préciser que lors de l'application de l'enduit une certaine quantité a pénétré dans la microstructure de la terre-allégée. Aussi, pour la suite de ce travail, il a été nécessaire d'estimer l'épaisseur réelle d'enduit  $e_{réelle}$  (mm), présentée dans le **TABLEAU 2**, à partir de la masse volumique des enduits  $\rho_{enduit}$  ( $kg/m^3$ ), la masse totale de l'échantillon  $m_{tot}$  (kg) et la masse du terre-allégée  $m_{ta}$  (kg). La masse volumique des enduits a été mesurée par les équipes du CSTB, partenaire du projet, en relevant directement la masse et le volume de barreaux d'enduit de dimensions ( $284 \times 24 \times 24$  mm<sup>3</sup>). Ainsi, en considérant un volume final toujours cylindrique, où  $R$  (mm) est le rayon du cylindre, on déduit  $e_{réelle}$  tel que :

$$e_{réelle} = \frac{m_{\text{enduit}} - m_{\text{air}}}{\pi R^2} (mm) \quad (1)$$

D'après les résultats du **TABLEAU 2**, et le calcul de l'écart-relatif  $\Delta e$  (%) entre les épaisseurs d'enduit théorique et réelle, plus l'épaisseur d'enduit théorique est élevée plus l'écart-relatif est faible supposant une moins grande influence de sa pénétration dans la microstructure du terre-allégée. Les échantillons sont ensuite conservés à température ambiante (15 – 20°C) durant 23 jours puis transportés au laboratoire où ils sont pesés, leurs dimensions relevées avant d'être séchés dans une étuve pendant 12 jours à 50°C et une humidité relative maintenue à 20%. Une fois l'opération terminée, ils sont stockés pour une phase de stabilisation de 30 jours dans les mêmes conditions que dans la chambre d'expérimentation ( $\approx 20^\circ\text{C}, 50\% \text{ HR}$ ), avant les premiers essais. Une fois stabilisés, les échantillons sont à nouveau pesés et leurs dimensions relevées afin d'évaluer l'absence de retrait après le conditionnement. L'épaisseur moyenne des échantillons non-enduits étant de 28,6 mm avec un coefficient de variation de 2%, et une densité moyenne de 319 kg/m<sup>3</sup> avec un coefficient de variation de 3%, montrent que ces échantillons peuvent être considérés comme comparables.

**TABLEAU 2.** Caractéristiques générales des enduits

Formulation	Code	Dosage volumique				Dosage massique (kg)				$e_{théorique}$ (mm)	$e_{réelle}$ (mm)	$\Delta e$ (%)	Volume (m <sup>3</sup> )	Masse (kg)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
		Liant	Eau	Fibre	Sable	Liant	Eau	Fibre	Sable						
1	T1_L_1	1	1,2	1,5	1,5	1	0,8	0,2	1,6	1	3,9	288	3,0E-05	4,1E-02	1369
2	T1_L_2									2	4,8	138	3,6E-05	4,9E-02	
3	T1_L_3									3	6,6	119	5,0E-05	6,8E-02	
4	T1_L_4									4	6,6	64	5,0E-05	6,8E-02	
5	T1_L_6									6	9,1	52	7,0E-05	9,5E-02	
6	T1_L_10	1	1,1	1,5	1,5	1	0,8	0,2	1,6	10	11,6	16	8,8E-05	1,2E-01	2020
7	T1_S02_1	1	0,9	x	3	1	0,5	x	2,9	1	3,6	259	2,7E-05	5,5E-02	
8	T1_S02_2									2	3,7	86	2,9E-05	5,8E-02	
9	T1_S02_3									3	4,2	39	3,3E-05	6,6E-02	
10	T1_S02_4									4	5,1	27	3,9E-05	7,9E-02	
11	T1_S02_6									6	7,1	18	5,5E-05	1,1E-01	
12	T1_S02_10	10	10,4	4	8,0E-05	1,6E-01	1978								
13	T1_S04_10	1	0,9	x	3	1		0,5	x	2,8	10	11,5	15	8,9E-05	1,8E-01
14	T2_S04_10	1	1	1	1,5	1	0,5	x	2,9	10	10,8	8	8,4E-05	1,6E-01	1473
15	T1_A_6	1	1	1,5	1,5	1	0,6	0,1	1,5	6	7,4	23	5,7E-05	8,5E-02	
16	T1_A_10									10	11,7	17	9,1E-05	1,4E-01	
17	T1_A_min_6	1	1,1	0,5	3	1	0,7	0,0	3,1	6	7,9	31	6,1E-05	1,1E-01	1802
18	T1_A_min_10									10	11,6	16	8,9E-05	1,6E-01	
19	T2_A_10	1	1	1,5	1,5	1	0,6	0,1	1,5	10	11,9	19	9,1E-05	1,3E-01	1423
20	T1_P_10	1	0,9	1,5	1,5	1	0,5	0,0	1,4	10	11,5	15	8,8E-05	1,4E-01	1606

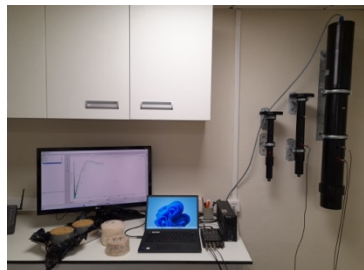
21	<i>TL_C_10</i>	1	1,1	1,5	1,5	1	0,6	0,1	1,4	10	11,0	10	8,4E-05	1,2E-01	1375
22	<i>TL_C_Tal_10</i>									10	10,6	6	8,1E-05	1,1E-01	
23	<i>TL_C_TalEp_10</i>									10	10,4	4	8,0E-05	1,1E-01	

## 2. Méthodes expérimentales

### 2.1. Tube à ondes stationnaires

Deux propriétés principales caractérisent le comportement acoustique à l'échelle matériau de nos échantillons : l'isolation acoustique, représentée par l'indice d'affaiblissement acoustique

noté **TL (dB)**, et la correction acoustique caractérisée par le coefficient d'absorption acoustique  $\alpha$  (-). Dans ce travail, nous considérons uniquement le mode de transmission aérien, dans lequel le matériau est mis en vibration par l'onde acoustique se propageant dans l'air, ne tenant ainsi pas en compte les bruits dits solidiens. Les méthodes de caractérisation utilisées dans ce travail reposent sur l'utilisation d'un tube à onde stationnaire (ou tube de Kundt présenté en **FIGURE 2**). Il s'agit donc de caractérisations qui se font en incidence normale. Grâce à ce même dispositif, à la fois le coefficient d'absorption acoustique, l'indice d'affaiblissement acoustique et les propriétés intrinsèques du matériau peuvent être déterminés. Pour obtenir le coefficient d'absorption, la méthode des 3 positions sans cavité est employée. L'indice d'affaiblissement et les propriétés intrinsèques sont eux mesurés en induisant un plenum de 18 mm pour libérer la face arrière des échantillons. Ces deux méthodes sont présentées dans les travaux de thèse de Philippe Glé (Glé, 2013).



**FIGURE 2.** Tubes de Kundt de diamètres différents reliés au dispositif d'acquisition de mesure

Comme évoqué en introduction, en s'inspirant des travaux de (Glé et al., 2021), nous pouvons considérer les deux couches (terre-allégée et enduit) comme ayant un comportement purement élastique, de squelette rigide ou poro-élastique. Dans le cas d'un matériau purement élastique, considéré ici comme isotrope, seules les contributions mécaniques interviennent. Elles

sont décrites à partir de la densité  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ), du module d'Young  $E$  ( $\text{MPa}$ ), du coefficient de

Poisson  $\nu$  (-) et du facteur d'amortissement  $\eta$  (%), et son identifiables avec des essais spécifiques. L'hypothèse d'un squelette rigide, ne considérant que la phase poreuse du matériau, repose sur des dissipations acoustiques uniquement issues des effets visco-inertiels et thermiques. Les

modèles acoustiques avancés, comme le modèle JCAL (Johnson et al., 1987; Lafarge et al., 1997), caractérisent le comportement poreux d'un matériau à partir de six paramètres principaux : la porosité  $\Phi$  (%), la résistivité  $\sigma$  (Pa.s/m<sup>2</sup>), la tortuosité  $\alpha_{\infty}$  (-), les longueurs caractéristiques visqueuse  $\Lambda$  (m) et thermique  $\Lambda'$  (m) ainsi que la perméabilité thermique statique  $\theta_0$  (m<sup>2</sup>). A partir de ces paramètres, il est possible de remonter à l'indice d'affaiblissement et au coefficient d'absorption. Il est généralement courant de déterminer directement les trois premiers ( $\Phi$ ,  $\sigma$  et  $\alpha_{\infty}$ ) avec des dispositifs expérimentaux et d'estimer indirectement les trois derniers car plus difficilement mesurables. Quand l'estimation indirecte est impossible également, il est d'usage de simplifier les modèles acoustiques comme nous le verrons dans la dernière partie. Enfin, un comportement poro-élastique cumule les trois effets dissipatifs sur la base des travaux de (Biot, 1956a, 1956b). La détermination directe ou indirecte des paramètres acoustiques et mécaniques sont présentées dans les paragraphes suivants.

## 2.2. Porosité et résistivité

La porosité  $\Phi$ , couramment considérée comme ouverte en acoustique, est déterminée grâce à la méthode par comparaison de volumes d'air mentionnée par (Leclaire et al., 2003). Les mesures classiques de porosité permettent de caractériser la porosité accessible à l'air. Cependant, dans le cas de la chènevotte ou de la terre-allégée, le comportement multi-échelle repose aussi sur la porosité intraparticulaire (Olny and Boutin, 2003). Dans ce cas, une évaluation indirecte de la porosité s'impose. La porosité peut être estimée, soit à partir d'une méthode asymptotique du module d'incompressibilité dynamique ou de l'impédance de surface, soit par une méthode inverse, en se basant sur un modèle comme Zwikker-Kosten (Zwikker and Kosten, 1949).

La résistivité  $\sigma$ , peut se mesurer directement, grâce à un résistivimètre. Elle peut également être caractérisée indirectement en tube de Kundt, dans les mêmes conditions que le coefficient d'absorption et l'indice d'affaiblissement, en incidence normale comme décrit par (Jaouen et al., 2020). Nous renvoyons le lecteur vers la thèse de Philippe Glé (Glé, 2013) au sujet des méthodes d'estimation directe ou indirecte des autres paramètres acoustiques. Dans la suite de cette étude, nous privilégierons les données obtenues directement mais, dans le cas où elles seraient impossibles à avoir, nous utiliserons leurs estimations indirectes.

## 2.3. Propriétés mécaniques

Dans cette étude, le module d'Young  $E$  et le facteur d'amortissement  $\eta$  des enduits, ont été déterminés directement par les collaborateurs du CSTB selon la norme *NF EN 14146* (NF EN 14146, 2004). La densité de la terre-allégée a été moyennée au Cerema sur l'ensemble des mesures 23 échantillons non-enduits. Les autres paramètres sont issus des travaux de (Glé et al., 2021) ou du projet *LOB+HIE* (Blinet et al., 2024), dans l'attente de futurs essais à l'analyseur mécanique quasistatique (QMA) du laboratoire.

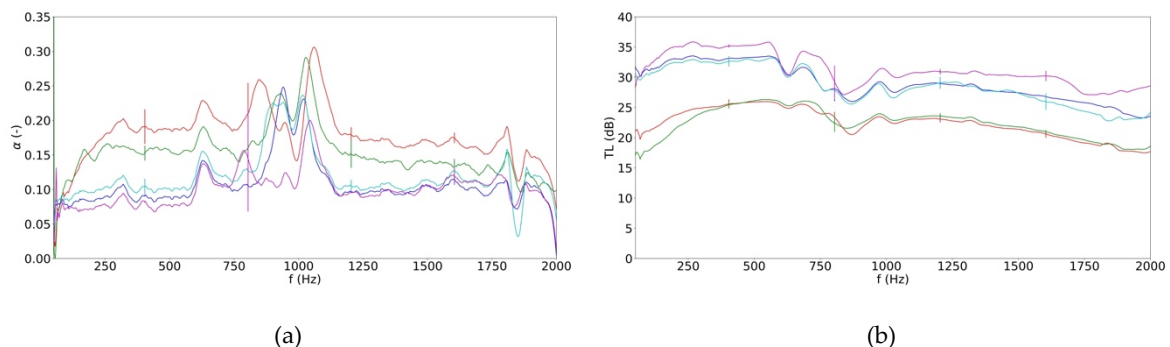
### III. RESULTATS

#### 1. Résultats expérimentaux : influence de l'épaisseur

Au cours de cette campagne d'essais, 23 formulations d'enduits en terre crue ont été testées afin d'observer l'influence de multiples facteurs précédemment évoqués. Dans cet article, nous nous concentrons sur l'influence de l'épaisseur de l'enduit. Nous proposons de présenter

l'étude sur des mélanges *T1\_L* avec les formulations similaires n°1 à 5 (i.e.  $e_{\text{enduit}} = 1, 2, 3, 4$  et

**6 mm**). Les données moyennes des trois échantillons enduits, pour chaque formulation, sont tracées avec leur écart-type dans les **FIGURE 3.a** et **FIGURE 3.b**. A la lecture de la **FIGURE 3.a**, nous remarquons que plus l'épaisseur augmente, plus le coefficient d'absorption diminue. Cette observation peut être expliquée par une pénétration plus aisée de l'onde acoustique dans la couche en terre-allégée lorsque l'épaisseur de l'enduit est faible. Or, du fait de sa microstructure, la couche en terre-allégée permet plus de dissipation acoustique du matériau ce qui augmente l'absorption acoustique. Toutefois, selon la **FIGURE 3.b**, et contrairement au coefficient d'absorption, plus l'épaisseur d'enduit augmente, plus l'isolation acoustique de l'échantillon augmente aussi. Ce constat, partagé par (Glé et al., 2021), suggère que l'atténuation sonore n'est pas uniquement due à une contribution mécanique, mais implique d'autres effets (dissipations visqueuses et thermiques). Enfin, nous constatons de manière générale une stabilisation des performances à partir d'une épaisseur de 4 mm.



**FIGURE 3.** Évolution du coefficient d'absorption  $\alpha$  (a) et de l'indice d'affaiblissement  $TL$  (dB) (b) en fonction de la fréquence  $f$  (Hz) pour un échantillon *T1\_L* d'épaisseur d'enduit 1 mm (—), 2 mm (—), 3 mm (—), 4 mm (—) ou 6 mm (—). Les écart-types sont affichés en barres d'incertitude.

## 2. Comparaison avec des modèles numériques

Dans cette dernière partie, nous proposons de modéliser le comportement acoustique d'un enduit en terre crue avec le logiciel *AlphaCell*®. Nous choisissons l'échantillon *T1\_L\_10\_D*

qui présente l'avantage d'avoir une couche d'enduit théorique de **10 mm** d'épaisseur, supposant donc une moins grande influence de sa pénétration dans la couche de terre-allégée. C'est également une formulation pour laquelle la porosité et la résistivité ont pu être déterminées directement.

Nous considérons le comportement des deux couches comme purement élastique isotrope, squelette-rigide ou poro-élastique. Comme expliqué précédemment, leurs propriétés mécaniques sont issues des mesures expérimentales ou de la littérature. La modélisation du caractère poreux de la couche en terre-allégée s'appuie sur la thèse de (Glé, 2013) qui suggère de considérer les bétons de chanvre avec les modèle JZK couplant ceux de (Johnson et al., 1987; Lafarge et al., 1997) et de Zwikker-Kosten (Zwikker and Kosten, 1949), et nécessitant globalement

quatre paramètres : la porosité  $\Phi$ , la résistivité  $\sigma$ , la tortuosité  $\alpha_{\infty}$  et la longueur caractéristique

visqueuse  $\lambda$ . La résistivité a pu être déterminée directement alors qu'en raison du phénomène de double-porosité présent dans le matériau, la porosité acoustique a été dû estimée indirectement tout comme la tortuosité et la longueur caractéristique visqueuse. Concernant le caractère poreux de l'enduit, deux approches sont envisagées s'appuyant sur ici des modèles réduits en raison des résistivités relativement élevées de ces matériaux, les autres paramètres ayant un impact plus limité dans ce cas. La première approche considère l'enduit avec un modèle JCAL réduit à deux

paramètres,  $\sigma$  et  $\Phi$ , en considérant la tortuosité égale à 1 et en simplifiant les relations des longueurs caractéristiques visqueuses et thermiques ainsi que la perméabilité statique thermique. Le **TABLEAU 3**, résumant les paramètres mécaniques et acoustiques des deux couches

modélisées, présente ces relations où  $r_1$  (mm) est le rayon des pores considérés comme

cylindriques en considérant  $\mu$  comme étant la viscosité de cisaillement de l'air égale à

**$1,8 \cdot 10^{-5}$  Pa.s**. La seconde considère l'enduit avec le modèle granulaire de Boutin-Geindreau

(Boutin and Geindreau, 2010), ne nécessitant que deux paramètres,  $\Phi$  et  $r_2$  (mm) le rayon des granulats considérés comme sphériques, à partir desquels sont déduits tous les autres paramètres acoustiques comme décrits au **TABLEAU 3**. Remarquons la proximité des valeurs expérimentales

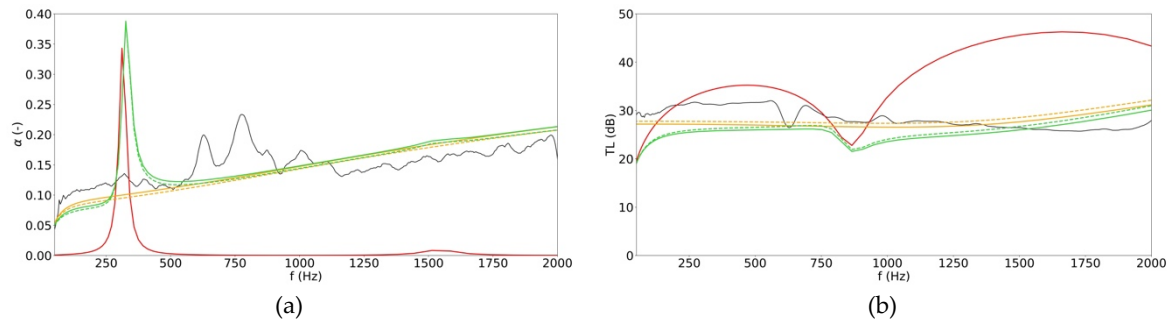
avec celles de (Blinet et al., 2024) où, par exemple, la densité de la terre-allégée est comprise entre **172 et 277 kg/m<sup>3</sup>** et le taux de porosité acoustique entre **69 et 75 %**.

**TABLEAU 3.** Paramètres **mécaniques** et **acoustiques** des couches modélisées. Les données issues de (Blinet et al., 2024) et (Glé et al., 2021) sont représentées par <sup>[a]</sup> et <sup>[b]</sup>.

Paramètres	Terre-allégée Modèle JZK	Enduit T1_L_10_D	
		Modèle JCAL réduit	Modèle granulaire Boutin-Geindreau
e (mm)	28	12	
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	319	1369	
E (MPa)	2 <sup>[a]</sup>	1711	
$\nu$ (-)	0,1 <sup>[a]</sup>	0,2 <sup>[a][b]</sup>	
$\eta$ (%)	10 <sup>[b]</sup>	3	
$\phi$ (%)	65	50	
$\sigma$ (Pa.s/m <sup>2</sup> )	1,6E+3	1,5E+6	
$\alpha_0$ (-)	2,7	1	$\frac{3-\phi}{2}$
$r_1$ (m)	x	$r_1 = \sqrt{\frac{8\mu}{\phi\sigma}}$	x
$r_2$ (m)	x	x	$r_2 = \sqrt{\frac{3\beta^2\mu}{\sigma(-1+\frac{2+3\beta^2}{\beta(2+3\beta^2)})}}$ , $\beta = (1-\phi)^{\frac{1}{3}}$
A (m)	2,6E-4	$r_1$	$\frac{4\phi\alpha_0}{9(1-\phi)^{\frac{1}{2}}}$
A' (m)	x	$r_1$	$\frac{2\phi}{3(1-\phi)^{\frac{1}{2}}}$
$\theta_0$ (m <sup>2</sup> )	x	$\frac{4\phi^2}{9}$	$\frac{(5-9\beta+5\beta^3-\beta^5)r_2^2}{15(1-\beta^2)\beta^3}$

Au total, cinq modélisations sont comparées au coefficient d'absorption (**FIGURE 4.a**) et à l'indice d'affaiblissement (**FIGURE 4.b**) expérimentaux. L'analyse de la **FIGURE 4.a** révèle que l'hypothèse d'un comportement purement élastique des deux couches de l'échantillon est insuffisante pour simuler son comportement en absorption. En revanche, les quatre autres simulations, tenant en compte du caractère poreux, semblent plutôt proches expérimentalement ce qui suggère que la résistivité mesurée de l'enduit est assez représentative. Les deux catégories de simulations présentent l'avantage d'être relativement simples avec peu de paramètres tout en ayant une prédiction assez pertinente. C'est notamment le cas avec un comportement poro-élastique assumé, qui reproduit la résonance observée expérimentalement bien que dans des fréquences plus basses. Cette résonance correspond à celle de la couche en terre-allégée par la compression de sa phase solide suite à la sollicitation acoustique. Une seconde simulation a révélé qu'une augmentation du module d'Young à **10 MPa** permettait d'améliorer encore plus la position de cette fréquence de résonance. Enfin, nous pouvons observer l'absence de différence majeure entre les deux approches sur la géométrie des pores de l'enduit. La prédiction globale numérique de l'indice d'affaiblissement par les cinq approches est un peu moins bonne que pour le coefficient d'absorption, comme le démontre la **FIGURE 4.b**. L'hypothèse d'un comportement

purement élastique de l'échantillon est une nouvelle fois à écarter tandis que les autres semblent sous-estimer légèrement l'indice en basses fréquences et le surestimer en hautes fréquences. Dans l'ensemble, l'approche simplifiée poro-élastique semble être la plus intéressante puisque reproduisant à nouveau la résonance de la terre-allégée tout en ayant une prédiction prometteuse peu importe l'hypothèse sur la forme des pores.



**FIGURE 4.** Comparaison de l'évolution du coefficient d'absorption  $\alpha$  (a) et de l'indice d'affaiblissement  $TL$  (dB) (b) en fonction de la fréquence  $f$  (Hz) pour l'échantillon enduit  $T1\_L\_10\_D$  entre la mesure expérimentale (—), la simulation d'un comportement bicouche élastique (—), celle d'un squelette rigide selon le modèle JCAL réduit (—) ou de Boutin-Geindreau (- -) et la simulation d'un comportement bicouche poro-élastique selon le modèle JCAL réduit (—) ou de Boutin-Geindreau (- -).

#### IV. CONCLUSION

Ce travail, s'inscrivant au sein du projet CarAc'Terre, s'est intéressé à la caractérisation du comportement acoustique de différentes formulations d'enduits en terre crue, encore peu étudiés, appliquées sur de la terre-allégée dans une démarche de réduction de l'empreinte carbone des bâtiments. Les premiers résultats expérimentaux révèlent entre autres qu'une augmentation de l'épaisseur de l'enduit réduit l'absorption acoustique du bicouche contrairement à son isolation acoustique qui se voit augmenter. Les mesures ont été comparées à une proposition de modélisations numériques en considérant le comportement des couches comme purement élastique, comme squelette rigide ou poro-élastique. L'approche poro-élastique est apparue comme la plus pertinente grâce à la simulation des dissipations mécaniques et visco-thermiques. Cette étude soulève de nombreuses perspectives de travail, parmi lesquelles l'amélioration de l'approche numérique en développant des modèles acoustiques plus précis reproduisant, par exemple, une anisotropie potentielle des couches.

#### V. REMERCIEMENTS

Nous remercions Julia Cahour, Morgane Geffroy, Alice Lamy et Andra Varouchas pour leur contribution à la réalisation des échantillons d'enduits. Ce projet a été financé par l'État dans le cadre de France Relance, désormais intégré à France 2030, et opéré par l'ADEME.

#### VI. REFERENCES

- Altomonte, S., Allen, J., Bluysen, P.M., Brager, G., Hescong, L., Loder, A., Schiavon, S., Veitch, J.A., Wang, L., Wargocki, P., 2020. Ten questions concerning well-being in the built environment. *Building and Environment* 180, 106949. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106949>
- Bhingare, N.H., Prakash, S., Jatti, V.S., 2019. A review on natural and waste material composite as acoustic material. *Polymer Testing* 80, 106142. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106142>
- Biot, M.A., 1956a. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range. *The Journal of the Acoustical Society of America* 28, 168–178. <https://doi.org/10.1121/1.1908239>
- Biot, M.A., 1956b. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range. *The Journal of the Acoustical Society of America* 28, 179–191. <https://doi.org/10.1121/1.1908241>
- Blinet, T., Glé, P., Arthur, H.D.M., 2024. Projet LOB+HIE - Low Beton / High Earth : Performances acoustiques de parois en terre-chaux (No. DSC/2024-069).
- Boutin, C., Geindreau, C., 2010. Periodic homogenization and consistent estimates of transport parameters through sphere and polyhedron packings in the whole porosity range. *Phys. Rev. E* 82, 036313. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.82.036313>
- Colinart, T., Vincelas, T., Lenormand, H., Menibus, A.H.D., Hamard, E., Lecompte, T., 2020. Hygrothermal properties of light-earth building materials. *Journal of Building Engineering* 29, 101134. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101134>
- Glé, P., 2013. Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales - Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation (phdthesis). INSA de Lyon.
- Glé, P., Massossa-Telo, G., Hellouin de Menibus, A., Degrave-Lemeurs, M., Gourdon, E., 2021. Characterization and modelling of the sound reduction of hemp-clay walls in buildings. *Journal of Building Engineering* 40, 102315. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102315>
- Jaouen, L., Gourdon, E., Glé, P., 2020. Estimation of all six parameters of Johnson-Champoux-Allard-Lafarge model for acoustical porous materials from impedance tube measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America* 148, 1998–2005. <https://doi.org/10.1121/10.0002162>
- Johnson, D.L., Koplik, J., Dashen, R., 1987. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics* 176, 379–402. <https://doi.org/10.1017/S0022112087000727>
- Kinnane, O., Reilly, A., Grimes, J., Pavia, S., Walker, R., 2016. Acoustic absorption of hemp-lime construction. *Construction and Building Materials* 122, 674–682. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106>
- Lafarge, D., Lemarinié, P., Allard, J.F., Tarnow, V., 1997. Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America* 102, 1995–2006. <https://doi.org/10.1121/1.419690>
- Leclaire, P., Umnova, O., Horoshenkov, K.V., Maillet, L., 2003. Porosity measurement by comparison of air volumes. *Rev. Sci. Instrum.* 74, 1366–1370. <https://doi.org/10.1063/1.1542666>
- Miranda Santos, M., 2022. La terre crue à l'épreuve des ambiances sonores : un dialogue entre la mesure physique et les expériences sensibles. (Doctoral thesis). Universitat Politècnica de Catalunya.
- NF EN 14146, 2004. Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination du module d'élasticité dynamique (par la mesure de la fréquence de résonance fondamentale).
- Olny, X., Boutin, C., 2003. Acoustic wave propagation in double porosity media. *The Journal of the Acoustical Society of America* 114, 73–89. <https://doi.org/10.1121/1.1534607>
- Pittau, F., Krause, F., Lumia, G., Habert, G., 2018. Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. *Building and Environment* 129, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.006>
- Zwikker, C., Kosten, C.-W., 1949. *Sound Absorbing Materials*. Elsevier, New-York.