

Comportement thermo-hydro-mécanique du béton de bois : Études en conditions contrôlées et in situ

Q. Nomezine¹, T. Sanchez¹, E. Ferrier¹

¹ LMC² EA 7427, Université Claude Bernard Lyon 1, Villeurbanne, France

RESUME Dans un contexte de transition écologique, cette recherche explore le potentiel d'un matériau composite biosourcé et durable : le béton de bois. Des essais en laboratoire et sur site ont été menés pour évaluer les réponses thermo-hydro-mécaniques de ce matériau. À l'échelle du mur, des variations dimensionnelles ont été mesurées dans des conditions climatiques extrêmes simulées (-30 à 50 °C, 15 à 100 % HR). Ces essais ont utilisé des outils de mesure innovants tels qu'un extensomètre mécanique et un scanner 3D. À l'échelle structurelle, un prototype de maison modulaire a été instrumenté pour analyser les réponses hygrothermiques sous conditions réelles. Les résultats démontrent des coefficients de dilatation thermique et hygroscopique variant selon les orientations des façades et les conditions environnementales. Les conclusions offrent des recommandations pour optimiser la conception et l'utilisation du béton de bois dans un cadre durable.

Mots-clefs béton de bois, hydrique, thermique, variations dimensionnelles, maison prototype

I. INTRODUCTION

Le béton de bois, un matériau composite innovant et biosourcé, suscite un intérêt croissant dans le secteur de la construction durable. En incorporant des granulats de bois dans une matrice cimentaire, ce matériau combine les propriétés isolantes du bois avec la résistance mécanique des matériaux cimentaires, tout en réduisant l'impact carbone du matériau final.

Les performances thermiques du béton de bois sont particulièrement remarquables. Sa faible conductivité thermique, influencée par la densité et la teneur en eau, assure une isolation efficace, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique des bâtiments en béton de bois (Jorge et al., 2004). Des études ont montré que l'ajout de particules de bois améliore les propriétés d'isolation thermique du béton tout en maintenant une résistance mécanique suffisante (Wang et al., 2023). En outre, la structure poreuse de ce matériau favorise une meilleure régulation hygrométrique, ce qui contribue au confort des occupants en limitant les variations d'humidité relative à l'intérieur des bâtiments (Bakkour et al., 2025).

L'impact environnemental du béton de bois est l'un de ses principaux avantages. La capacité du bois à stocker le dioxyde de carbone absorbé pendant sa croissance permet également de réduire encore l'impact écologique (Pajchrowski et al., 2014). L'utilisation de granulats de bois, matériau renouvelable et stockeur de carbone, permet de réduire considérablement l'empreinte carbone du

béton. Des analyses du cycle de vie ont montré que ce matériau présente un potentiel de réchauffement climatique nettement inférieur à celui des bétons classiques, ce qui en fait une solution attrayante pour les projets de construction durable (Olofin, 2025). De plus, son utilisation favorise une gestion durable des ressources forestières lorsqu'il est fabriqué à partir de bois certifié PEFC ou FSC (N'Doua, 2023).

Cependant, certains défis subsistent quant à la durabilité et à la stabilité dimensionnelle du béton de bois. Les phénomènes de retrait et de fluage, ainsi que les interactions entre les composants organiques et inorganiques, nécessitent des études approfondies pour assurer une performance fiable à long terme (Quiroga et al., 2016).

Cette étude vise à approfondir la compréhension des comportements thermo-hydro-mécaniques du béton de bois en combinant des expérimentations en laboratoire et des observations in situ. L'objectif est de fournir des données précises pour optimiser les formulations et les méthodes de mise en œuvre, favorisant ainsi l'adoption de ce matériau innovant dans une perspective de construction durable et écologique.

II. METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

1. Matériaux des murs et modules

Les murs et modules étudiés sont fabriqués à partir de béton de bois, un matériau composite constitué d'un mélange d'eau, de granulats de bois majoritairement certifiés PEFC, et de ciment. Trois murs ont été préfabriqués pour cette étude, désignés respectivement « Mur A », « Mur B » et « Mur C ». Chaque mur présente des dimensions identiques : $L = 150 \text{ cm}$, $H = 150 \text{ cm}$ et $e = 25 \text{ cm}$.

2. Mesure des variations dimensionnelles en laboratoire

Ils sont exposés à 4 ambiances différentes définies comme suit (selon la norme NF T 30-049) :

- Ambiance 1 : Séchage 1 / 40°C et 15% d'HR pendant 15 jours
- Ambiance 2 : Humidification / 40°C et 85% d'HR pendant 21 jours
- Ambiance 3 : Séchage 2 / 40°C et 15% d'HR pendant 21 jours
- Ambiance 4 : 150 cycles durabilité (~ 30 jours) :
 - 20°C et 90% d'HR pendant 60 minutes
 - -20°C et 100% d'HR pendant 100 minutes
 - 50°C et 95% d'HR pendant 60 minutes
 - 50°C et 20% d'HR pendant 70 minutes

Afin de caractériser au mieux la variation dimensionnelle, 5 billes dans le sens vertical (bille 1 à 5) et 5 billes dans le sens horizontal (bille 5 à 9) ont été disposées sur la face la plus grande (150x150). Chaque bille est numérotée de 1 à 9, comme le montre la figure 1.

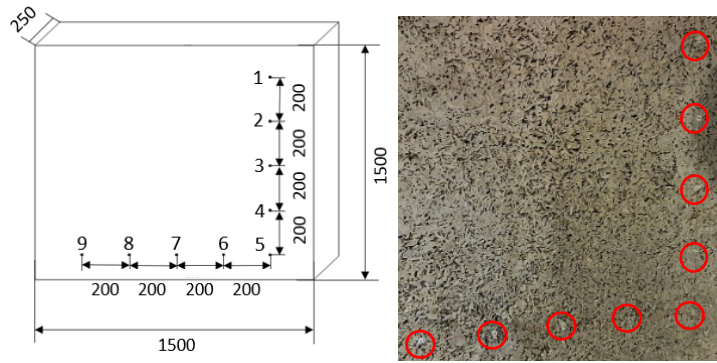


FIGURE 1. Positionnement des billes sur les murs

Avant le début de chaque série d'ambiances et à la fin de la dernière, la distance inter-billes a été mesurée à l'aide d'un déformètre à bille précis à 0,133%, permettant d'évaluer les déformations axiales. Par ailleurs, un scanner 3D de marque AMETEK CREAFORM précis à 0,075 mm a été utilisé pour vérifier les mesures des déformations axiales et obtenir une caractérisation de la déformation globale du mur.

La déformation axiale verticale δ_v engendrée par une ambiance est définie par :

$$\delta_v = \delta_{v_f} - \delta_{v_i} \text{ [mm/m]} \quad (1)$$

où la déformation verticale initiale δ_{v_i} est :

$$\delta_{v_i} = \frac{\sum_{j \geq 1}^4 (\Delta L_{i,j,j+1}) * 1000}{4 * L_{0 \text{ déformètre}} + \sum_{j \geq 1}^4 (\Delta L_{i,j,j+1})} \text{ [mm/m]} \quad (2)$$

Avec $\Delta L_{i,j,j+1}$: le déplacement du déformètre à bille entre la bille j et la bille $j + 1$ à l'état initiale [mm] et $L_{0 \text{ déformètre}}$: la distance avant déplacement, imposée par le déformètre à bille (ici 200 mm).

Il est possible de calculer la déformation verticale finale δ_{v_f} à partir des déplacements obtenus à la fin de l'ambiance i . La déformation horizontale se fait par analogie à ce calcul.

Les déformations axiales déterminées par le déformètre à billes peuvent être vérifiées par le scanner 3D.

La résolution du scanner a été paramétrée à 0,2 mm. Chaque mur a été scanné avant et après chaque mise en ambiance, permettant ainsi d'obtenir une bonne représentation 3D de la réponse hygrothermique des murs comme de potentielles apparition de fissuration, ou une variation dimensionnelle localisée ou non. Seul une bande verticale et horizontale contenant les billes, a été scannée afin de pouvoir corréler les résultats avec le déformètre à bille mais aussi d'avoir une déformation plus globale sur le mur. En effet, il est possible de tracer un triangle passant par les points allant de 1 jusqu'à 9 puis de revenir au point 1. Ce schéma de déformation est ensuite déterminé avec un logiciel « CloudCompare » à partir des scans des murs.

Une fois les 9 points repérés dans le logiciel, la déformation globale du mur δ_g est calculée par différence entre l'aire du triangle après la mise en ambiance et de l'aire du triangle avant la mise en ambiance :

$$\delta_g = \frac{A_f - A_i}{A_i} [\%] \quad (3)$$

Avec A_f : l'aire finale du triangle [mm^2] et A_i : l'aire initiale du triangle [mm^2].

3. Mesures thermo-hydrrique in situ

5 modules en béton de bois ont été soumis aux conditions extérieures. Afin de définir le comportement de ces murs, deux types de capteurs ont été employés :

- **Capteurs d'humidité relative et de température type Woodsense (bleu):** Ces capteurs sont directement fixés sur les murs au moyen de vis isolées (isolant vert, visibles sur la figure 2). Cette configuration garantit que les mesures collectées proviennent exclusivement de l'extrémité des vis, assurant une précision optimale à une profondeur de 6 cm.

Ce capteur a une précision de mesure de 2% sur l'humidité relative.



FIGURE 2. Capteur Woodsense

- **Capteurs de température type Efento NB-IoT (orange) :** Ces capteurs sont insérés dans des orifices préalablement forés à mi-épaisseur des murs (12 cm), puis scellés avec de la mousse polyuréthane expansive. Cette méthode d'isolation élimine les interférences extérieures susceptibles de fausser les résultats.

Ce capteur a une précision de mesure de 0,4°C

Voici la disposition des capteurs sur chaque façade :

- Un capteur d'humidité ainsi que les deux capteurs de température à 6 et 12 cm sur les façades Nord R+1, Sud RDC et Ouest RDC.
- Un capteur de température à mi-épaisseur sur la façade Nord RDC.
- Un capteur de température à mi-épaisseur sur la toiture terrasse.

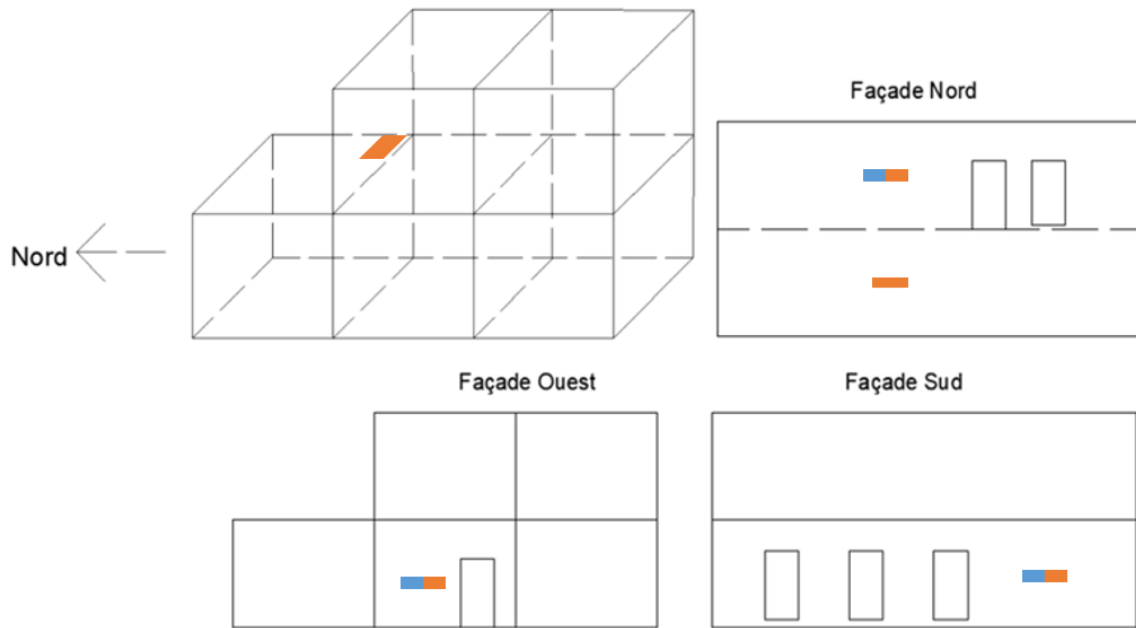


FIGURE 3. Positionnement des capteurs sur chaque façade

III. RESULTATS ET ANALYSE

1. Mesure des variations dimensionnelles en laboratoire

Les déformations axiales sont comprises entre 0,02 mm/m (mur C – verticale : ambiance 4) et 1,31 mm/m (mur C – horizontale : ambiance 4). Les valeurs en bleues montrent les valeurs négatives (retrait) et les valeurs en rouge les valeurs positives (gonflement)

TABLEAU 1. Déformation axiale induite par les ambiances en mm/m

	Déformation [mm/m]					
	Mur A		Mur B		Mur C	
	Verticale	Horizontale	Verticale	Horizontale	Verticale	Horizontale
Ambiance 1 : Séchage 1	-0,481 ± 0,006	-0,472 ± 0,010	-0,856 ± 0,006	-0,456 ± 0,007	-1,300 ± 0,004	0,402 ± 0,011
Ambiance 2 : Humidification	0,150 ± 0,006	0,063 ± 0,010	-0,262 ± 0,004	-0,186 ± 0,011	-0,071 ± 0,003	0,263 ± 0,010
Ambiance 3 : Séchage 2	-0,298 ± 0,006	-0,627 ± 0,009	-0,586 ± 0,006	-0,780 ± 0,007	-0,490 ± 0,004	-1,048 ± 0,010
Ambiance 4 : Cyclage durabilité	0,218 ± 0,006	0,402 ± 0,009	0,284 ± 0,006	0,770 ± 0,007	0,020 ± 0,004	1,313 ± 0,010

Les déformations verticale et horizontale sont distinctes, voire opposées (par exemple, lors de l'ambiance 2 sur le mur C). Cela pourrait être attribué à l'anisotropie du matériau, étant donné que les fibres de bois ne sont pas toutes orientées de manière uniforme dans le mur mais de manière aléatoire. Il est également possible que ces différences soient induites par le dispositif expérimental. Les murs étant posés directement sur le sol, la partie inférieure du mur est contrainte en déplacement selon l'axe vertical, contrairement à la partie supérieure qui reste libre. Sur l'axe horizontal, les deux cotés sont totalement libres. Cette configuration pourrait entraîner une réduction des déformations verticales. Par conséquent, il est possible que le mur soit comprimé par son propre poids, entraînant un tassement et donc un allongement des dimensions horizontales.

Il est possible de déterminer la variation surfacique des murs causée par une ambiance en faisant un calcul d'écart entre la valeur du début et la valeur de la fin de cette ambiance par rapport à la valeur de départ (Eq.3). Les résultats sont présentés dans le tableau 2.

TABLEAU 2. Déformation globale induite par les ambiances en %

	Mur A	Mur B	Mur C
Ambiance 1 : Séchage 1	-0,256%	0,003%	-0,091%
Ambiance 2 : Humidification	0,144%	-0,050%	0,300%
Ambiance 3 : Séchage 2	-0,181%	-0,340%	-0,473%
Ambiance 4 : Cyclage durabilité	0,192%	0,230%	0,070%

Comme le montre le tableau 2, lors des deux phases de séchages (ambiance 1 et 3), les 3 murs étudiés diminuent en surface, indiquant une rétraction due à l'évaporation de l'eau contenue dans les matériaux. La base cimentaire et le bois diminue de volume lors du séchage entraînant par conséquent le mur aussi. Lors de l'humidification, les murs absorbent l'humidité contenue dans l'air, ce qui provoque un gonflement dans le mur, donc une augmentation de la surface. C'est le cas pour le mur A et mur C mais pas pour le troisième. Le mur B continue de présenter une légère rétraction malgré l'humidification de l'air ambiant.

En examinant la valeur précédente du mur B, le mur semble réagir plus lentement et de manière plus stable. En effet, sous l'influence de l'ambiance 1, la surface du mur ne varie que très peu (10 mm^2) et il semble commencer à réagir à la première ambiance seulement à partir de l'ambiance 2. L'inertie thermo-hydrrique du mur est peut-être plus importante.

Les résultats des déformations axiales et globales révèlent des comportements très variés entre les différents murs, influencés par les conditions imposées par les ambiances. Chaque mur réagit différemment aux mêmes conditions, avec des déformations globales oscillant entre gonflement et retrait.

Le mur A présente une stabilité notable, avec des déformations globales comprises entre 0,14 % et 0,26%. Les analyses réalisées à l'aide du scan 3D révèlent que durant les deux phases de séchage, le mur se rétracte dans les deux directions principales (verticale et horizontale). En revanche, lors de l'humidification, le mur gonfle dans les deux directions. Au cours de la phase de durabilité, le mur regonfle légèrement sur l'axe vertical tout en se rétractant légèrement sur l'axe horizontal. Ce comportement est conforme aux mécanismes attendus de retrait/gonflement en fonction de l'humidité. Par ailleurs, la cohérence observée entre les déformations globales et axiales indique une homogénéité structurelle sur l'ensemble de la surface du mur.

Le mur B se distingue par une sensibilité accrue au retrait par rapport au gonflement. Les résultats montrent un comportement atypique dans l'ambiance 2 : alors que l'humidification de l'environnement devrait théoriquement induire un gonflement par absorption d'humidité, le mur se rétracte sur lui-même, comme le confirment les mesures des déformations globales et axiales. Bien que le comportement global et axial soit similaire dans toutes les ambiances, l'amplitude des déformations entre ces deux types n'est pas corrélée. Par exemple, dans l'ambiance 3, la déformation axiale est comparable à celle observée dans l'ambiance 1, tandis que les déformations globales sont beaucoup plus importantes en ambiance 3 et quasi nulles en ambiance 1. Ces observations suggèrent une modification géométrique interne du mur : si les côtés d'un triangle restent similaires mais que son aire diminue, alors l'angle interne augmente, dépassant potentiellement 90°. Ce phénomène pourrait expliquer les variations observées.

Le mur C présente des déformations globales fortement dépendantes des conditions environnementales, avec des variations allant de 0,07 % à 0,47 %. Malgré cette variabilité, son comportement reste conforme aux attentes : le mur gonfle lorsque l'humidité augmente et se rétracte lorsque l'humidité diminue. Les résultats du scan 3D indiquent qu'au cours du premier séchage, le mur subit un tassement qui réduit sa verticalité tout en augmentant son horizontalité. Lors de l'humidification, ce tassement persiste mais avec une intensité nettement moindre. Cependant, après cette phase d'humidification suivie d'un deuxième séchage, le mur se rétracte sur lui-même. Enfin, durant la phase de durabilité, il regonfle légèrement dans la direction horizontale mais de manière plus marquée dans la direction verticale. Globalement, le comportement du mur C reste similaire à celui du mur A et peut être qualifié de « ordinaire », correspondant aux mécanismes classiques de retrait/gonflement liés aux variations hygrométriques.

Ce comportement inattendu peut être dû par :

Des tensions résiduelles liées au processus de moulage : Lors du moulage, le matériau peut subir des **contraintes internes** dues à des variations de température ou d'humidité pendant le durcissement. Ces tensions résiduelles pourraient influencer la manière dont le mur réagit aux cycles d'humidification et de séchage, en favorisant une rétraction plutôt qu'un gonflement sous l'effet de l'humidité.

Une hétérogénéité microscopique du matériau : Bien que le matériau semble homogène à l'œil nu, des **différences locales de densité** ou de composition pourraient exister à l'échelle microscopique. Ces variations pourraient entraîner une absorption d'humidité non uniforme, provoquant des contraintes différentielles internes et expliquant la rétraction observée en ambiance 2.

2. Mesures thermo-hydrrique in situ

Les variations de température et d'humidité relative, mesurées sur chaque élément, sont analysées afin d'identifier les comportements spécifiques des modules en béton de bois. La température et l'humidité minimale et maximale de chaque façade a 2 profondeurs différentes ont été mesurées

TABLEAU 3. Extrémums de température des façades

Façades	Ouest RDC		Sud RDC		Nord RDC	Nord R+1	
Profondeur du capteur	6 cm	12 cm	6 cm	12 cm	12 cm	6 cm	12 cm
Température maximale [°C]	49,8	48,1	56	42,6	36,5	45,9	36,6
Température minimale [°C]	2,8	5	4,3	6,1	5,6	3	4,5

TABLEAU 4. Extrémums d'humidité relative des façades

Façades	Ouest RDC	Sud RDC	Nord R+1
Profondeur du capteur	6 cm	6 cm	6 cm
Humidité maximale [%]	99	98	89
Humidité minimale [%]	12	12	26

Façade Sud RDC : Montre les températures maximales les plus élevées, témoignant d'une forte exposition au soleil, et une humidité maximale importante (98 %), possiblement due à des précipitations ou à une condensation intense sur cette façade.

Façade Ouest RDC : Enregistre une température maximale élevée (49,8 °C) et des variations d'humidité marquées (99 % à 12 %), suggérant une exposition aux éléments climatiques comme les pluies accompagnées d'une rapide évaporation.

Façade Nord : Les températures maximales et minimales ainsi que les variations d'humidité sont plus modérées, confirmant son exposition réduite au rayonnement solaire direct.

L'écart entre l'humidité intérieur et extérieur est plus importante sur la façade Nord pouvant créer un écart maximum de 50% contre 25% pour la façade Ouest et la façade Sud. Etant donné que la façade Nord est moins exposée au soleil, l'évaporation de l'eau dans le mur se fait plus faiblement et donc l'humidité est plus importante

IV. CONCLUSION

Les résultats des essais de variations dimensionnelles et des mesures in situ offrent une vision complémentaire des interactions complexes entre les murs en bois et leur environnement thermo-hydrrique. L'objectif de cette étude était de caractériser les comportements de déformation des murs sous des conditions contrôlées et réelles, afin de mieux comprendre les mécanismes d'adaptation des matériaux bois face aux variations climatiques.

Les essais en chambre climatique montrent une diversité de comportements selon le type de mur testé. Le mur A présente un comportement stable et homogène, suivant la logique attendue de gonflement et de retrait en fonction des variations d'humidité. Cette stabilité est caractérisée par des amplitudes de déformations modérées et cohérentes entre les axes horizontal et vertical, avec

des phases de gonflement et de rétraction bien distinctes lors des cycles d'humidification et de séchage.

En revanche, le mur B présente un comportement plus atypique, marqué par une sensibilité accrue au retrait, et une réponse contre-intuitive en ambiance humide (rétraction au lieu de gonflement). Cette anomalie pourrait résulter d'un phénomène localisé de contraintes internes, de variations dans la composition du matériau, ou d'un comportement différentiel entre les couches internes et externes du mur.

Dans les essais in situ, bien que le type exact de mur utilisé ne soit pas précisé, les variations de température et d'humidité mesurées sur les différentes façades permettent d'observer des comportements potentiellement similaires à ceux identifiés en chambre climatique. La façade Sud, fortement exposée au rayonnement solaire, montre des températures maximales élevées et des humidités importantes en cas de précipitations ou de condensation. De même, la façade Ouest, exposée aux intempéries, subit des variations d'humidité importantes, suggérant un phénomène d'absorption rapide suivi d'une évaporation accélérée. À l'opposé, la façade Nord, moins exposée au soleil, présente des variations plus modérées, avec une humidité résiduelle importante, probablement due à une évaporation ralentie.

Les similitudes entre les résultats obtenus en chambre climatique et les mesures in situ renforcent la pertinence des essais contrôlés pour simuler les conditions réelles. Les comportements observés dans les différentes ambiances climatiques artificielles (cycles de gonflement et retrait, stabilité ou instabilité selon les types de murs) trouvent un écho direct dans les observations sur site. Par exemple, la réponse du mur A, qui montre un comportement stable en chambre climatique, pourrait correspondre à celui des façades plus exposées au soleil (Sud et Ouest), où les cycles d'humidification et de séchage sont fréquents mais maîtrisés. À l'inverse, le comportement plus imprévisible du mur B pourrait être mis en parallèle avec les phénomènes de rétraction observés sur la façade Nord, où l'absence de rayonnement solaire direct limite l'évaporation et favorise une accumulation d'humidité.

L'absence d'informations précises sur le type de mur utilisé pour les mesures in situ empêche une corrélation directe, mais les écarts observés entre les façades suggèrent que la nature des matériaux et leur homogénéité jouent un rôle crucial dans la réponse aux variations climatiques. La comparaison des résultats in situ avec ceux obtenus en laboratoire souligne également l'importance des cycles de séchage et d'humidification dans le comportement à long terme des structures en bois, notamment en ce qui concerne leur durabilité et leur stabilité dimensionnelle.

V. REMERCIEMENTS

Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet collaboratif de R&D Booster, Vivaldi. Les auteurs tiennent à exprimer leur profonde gratitude à la Région Auvergne-Rhône-Alpes ainsi qu'à Bpifrance pour leur soutien précieux.

VI. REFERENCES

- Bakkour, A., Ouldboukhitine, S.-E., Biwole, P., Amziane, S., 2025. Hygrothermal performance of wood-cement walls across various climate conditions. *Mater Struct* 58, 41.
- Jorge, F.C., Pereira, C., Ferreira, J.M.F., 2004. Wood-cement composites: a review. *Holz Roh Werkst* 62, 370–377. <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>
- N'Doua, B.D., 2023. The impact of forest management certification on exports in the wood sector: Evidence from French firm-level data. *Journal of Cleaner Production* 418, 138032.
- Olofin, I., 2025. Nano-Cement Engineered Wood-boards (NCEW)- A review on wood-cement composite, materials, new technologies and future perspectives. *Journal of Building Engineering* 99, 111571.
- Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A., Strykowski, W., 2014. Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. *Construction and Building Materials* 52, 428–436.
- Quiroga, A., Marzocchi, V., Rintoul, I., 2016. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood–cement composites and of *Populus Euroamericana* wood fibers. *Composites Part B: Engineering* 84, 25–32.
- Wang, P., Xu, C., Li, Q., Guo, Y., Wang, L., 2023. Evaluation on the mechanical, thermal insulation and durability properties of wood recycled ecological concrete. *Materialia* 32, 101965.