

Concept innovant de plancher mixte bois–terre crue : étude expérimentale

GODI Gaël¹, BONTEMPS Arthur², BOUCHAIR Abdelhamid¹

¹Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

²INSA Lyon, GEOMAS, UR7495, 69621 Villeurbanne, France
gael.godi@uca.fr

Mots clefs : Structures mixtes ; connecteurs ; bois massif ; terre crue ; performance mécanique ; développement durable

Contexte et objectifs

Les structures mixtes, qui associent des matériaux différents, rencontrent un succès croissant en raison de leur capacité à exploiter les propriétés spécifiques de chaque matériau dans son domaine d'excellence. L'exemple le plus répandu est celui des structures acier-béton, couvertes par l'Eurocode 4, où le béton est sollicité en compression et l'acier en traction. Les recherches sur ces systèmes se concentrent principalement sur les connexions entre matériaux et sur des essais en flexion de planchers, couplés à des approches de modélisation. Récemment, ces études ont été élargies aux connecteurs démontables dans une démarche visant à réduire l'empreinte carbone des constructions et leur impact environnemental global (Bassil *et al* 2025). Les planchers bois-béton, par exemple, sont développés avec des connecteurs de cisaillement, souvent sous avis technique. Plusieurs travaux ont étudié le comportement de ces planchers (Ceccotti 2000).

Parmi les pistes de recherche explorées figure également le choix des matériaux. La présente étude propose une approche innovante combinant la terre crue et le bois dans une structure mixte de plancher, avec un système de connexion démontable visant à améliorer les performances mécaniques de la structure à quantité de matériaux équivalente. Elle s'inspire des travaux existants sur les connexions dans les structures mixtes, tout en intégrant des principes de démontabilité, de préfabrication, et l'usage de connecteurs simples. L'objectif est de solliciter la terre en compression et le bois en traction dans un plancher soumis à la flexion. Le choix de ces matériaux repose sur leurs performances environnementales, ainsi que sur leurs propriétés thermiques (inertie) et acoustiques (amortissement).

Traditionnellement, les planchers anciens ou contemporains associant bois et terre utilisent le bois comme élément porteur, tandis que la terre joue un rôle de remplissage, sans contribution significative à la résistance structurelle. Cette étude propose de mobiliser les capacités mécaniques remarquables de la terre crue en compression (Miccoli *et al* 2011) pour renforcer la rigidité en flexion d'un plancher mixte. À ce jour, peu de techniques permettent à la terre crue de contribuer mécaniquement aux planchers, et aucune ne l'exploite spécifiquement en compression dans ce contexte.

Géométrie et principe de fonctionnement mécanique

Les modules de plancher construits et testés utilisent des solives en bois massif sur lesquelles sont disposées des Briques de Terre crue Compressées (BTC), Fig. 1. La portée des planchers est de 3 m, et la largeur d'un module est de 45 cm. Le système de connexion entre les solives et les BTC est composé de traverses en bois et de vis. En comparaison avec les systèmes classiques de connexion qui utilisent uniquement des vis ou des connecteurs métalliques

similaires, les traverses en bois sont ajoutées afin (i) de répartir la contrainte transférée aux BTC sur une grande surface, (ii) de supprimer les jeux entre les blocs en terre, (iii) d'introduire une précontrainte aux BTC à l'aide de coins en bois de section adaptée placés entre chaque rangée de briques (Fig. 2). Ce système de répartition des efforts de compression limite les concentrations de contraintes susceptibles d'initier la rupture dans les briques. La précontrainte appliquée lors du montage du plancher permet également de produire un effet de contre-flèche qui permet de compenser la flèche initiale induite par la masse des BTC (185 kg, soit 140 kg/m^2). Ce système innovant de plancher et de connexion répond aux contraintes de préfabrication, de montage à sec et de démontabilité.

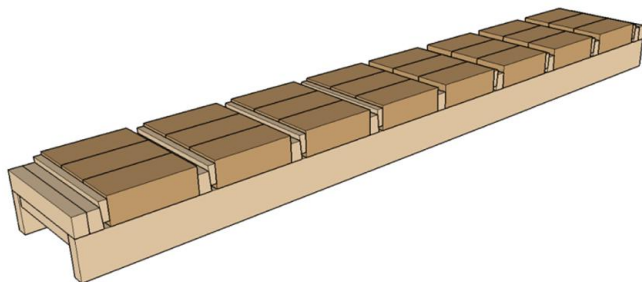


Fig.1 : Schéma de principe des planchers bois-terre testés



Fig. 2 : Système de connexion

Caractérisation des matériaux et des connecteurs

Les matériaux utilisés dans le plancher ont été caractérisés expérimentalement en compression (solives, traverses et briques) et en flexion (solives). Le système de connexion solive-vis-traverses a également été caractérisé dans une configuration « push-out » (Fig. 4) afin d'obtenir sa raideur de cisaillement. Dans cette configuration, l'élément métallique du connecteur (vis bois ou vis mécanique) est sollicité en cisaillement et en flexion, et le bois est sollicité en enfoncement par la pression diamétrale de l'élément métallique. Ces tests ont permis de faire une estimation analytique de la rigidité et de la résistance du plancher et vont alimenter un modèle numérique en cours de développement.

Dans le fonctionnement de ce type de planchers, un paramètre clé est le module en compression du matériau de la partie supérieure du plancher (dans notre cas, il s'agit de l'ensemble juxtaposé de briques et de traverses). Des essais de compression de cet ensemble ont été réalisés (Fig. 3) pour deux essences de traverses : douglas et chêne. Pour chaque essence, les pièces en bois ont été débitées dans le même lot. Concernant les BTC, une référence du fournisseur Brique Technic Concept a été utilisée en raison de sa très bonne résistance en compression (9 MPa selon la norme DIN18945, pour des briques stabilisées à la chaux, format $30 \times 15 \times 10 \text{ cm}^3$). Le déplacement a été mesuré entre les plateaux de la presse et la pente de rigidité exploitée est celle tangente à la partie linéaire de la courbe force / déplacement. Les résultats de mesure réalisés sur 5 éprouvettes de chaque ensemble brique-traverse ont montré une rigidité apparente moyenne largement supérieure lorsque les traverses sont en chêne (930 MPa), par rapport à l'association avec des traverses en douglas (550 MPa). Ce résultat démontre l'importance du choix de l'essence des traverses, et le fort impact du module en compression transversale de l'essence utilisée (de l'ordre de 600-900MPa pour les bois feuillus contre 300-500MPa pour les résineux).

Des essais de push-out, Fig. 4, ont été réalisés pour plusieurs configurations. Deux essences de bois ont été utilisées : douglas et chêne, ainsi que deux types de vis, Fig. 5 : vis à charpente bois 8 mm têtes larges, et vis mécaniques M10. Les configurations sont présentées dans le Tab. 1, avec les résultats de raideurs obtenus (valeurs moyennes pour 3 essais de chaque configuration).

La comparaison des résultats obtenus a permis de confirmer que les vis mécaniques augmentent la rigidité grâce notamment à leur surface de contact plus importante, et que les traverses en chêne sont également favorables grâce à leur meilleure résistance à la pression diamétrale. L'association la plus adaptée de l'ensemble de connexion est donc composée des traverses en chêne assemblées aux solives par des vis mécaniques.

Tab. 1 : Configurations des essais push-out et raideurs de cisaillement mesurées

Configuration	Raideur (kN/mm)
Solives douglas, vis bois, traverse douglas	6,0
Solives douglas, vis mécaniques, traverse douglas	8,6
Solives douglas, vis mécaniques, traverse chêne	13,0

Le module d'élasticité en flexion des solives en douglas a été caractérisé par des essais en flexion 4 points, avec une valeur moyenne mesurée de 11 GPa, en accord avec les valeurs usuellement observées pour les bois résineux.



Fig. 3 : Essais en compression de l'ensemble brique-traverse



Fig. 4 : Essai push-out solive-vis-traverse



Fig. 5 : Vis bois 8 mm et vis mécaniques M10

Essais de flexion sur planchers

Trois planchers ont été fabriqués et caractérisés en flexion 4 points. Ils sont composés de deux solives en douglas et de BTC (Fig. 1). Deux variables de construction ont été choisies : l'essence des traverses (douglas ou chêne) et le type des éléments métalliques (vis bois, vis mécaniques). La raideur de chaque plancher a été évaluée expérimentalement grâce à l'exploitation des courbes force / flèche, avec et sans la participation mécanique des BTC. Le gain apporté par l'effet collaborant des briques a été déduit de ces essais. Les configurations testées et les gains obtenus sont présentés dans le Tab. 2.

Tab. 2 : Configurations et gains en raideur pour les 3 planchers testés en flexion 4 points

Désignation	Configuration	Gain en raideur
CBTC1	Traverses douglas + vis bois	1,41
CBTC2	Traverses douglas + vis mécaniques	1,49
CBTC3	Traverses chêne + vis mécaniques	1,75

Le plancher CBTC3 associe les éléments connecteurs les plus performants au regard des essais de compression brique-traverse et des essais push-out solive-vis-traverse, à savoir les traverses en chêne et les vis mécaniques. En essai de flexion (configuration mixte), ce plancher montre comme attendu le gain de rigidité le plus élevé. Les courbes d'essais pour cette configuration sont présentées en Fig. 6, pour les deux phases d'essai (sans et avec la mobilisation de l'effet mécanique collaborant des briques).

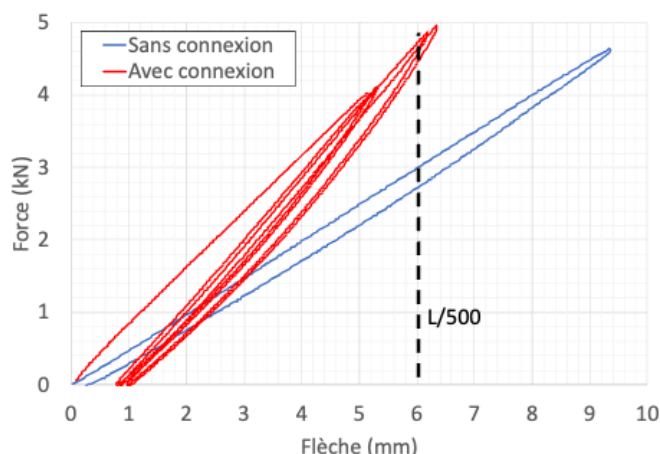


Fig. 6 : Résultats de l'essai en flexion 4 points de CBTC3 (traverses chêne et vis mécaniques)

Conclusion et perspectives

L'étude expérimentale exploratoire menée sur une solution constructive de plancher mixte bois-terre démontre un fort potentiel du point de vue de la performance mécanique de rigidité en flexion. Les résultats obtenus confirment que l'effet de la mixité est mobilisé dans la structure proposée. En effet, le plancher composé de solives en bois et de BTC connectés mécaniquement permet une augmentation significative de la rigidité par rapport à un plancher avec la même composition sans connecteurs (gain de 75%). Cette amélioration est particulièrement pertinente dans le cadre de la vérification à l'état limite de service (ELS), souvent déterminante dans le dimensionnement des planchers.

Afin de consolider ces premiers résultats, des investigations complémentaires sont prévues, notamment sur l'évolution du comportement dans le temps de tels planchers, en tenant compte des phénomènes de fluage et de variations hygrométriques. Par ailleurs, l'application de cette solution en zones sismiques pourrait être envisagée à condition de mener une réflexion sur l'ajout de composants mobilisant l'effet diaphragme.

Un modèle numérique est en cours de développement. Il intégrera les interactions de contact entre les éléments et reposera sur une approche progressive dans le choix des lois de comportement des matériaux. Ce modèle permettra de conduire une étude paramétrique visant à optimiser la répartition des efforts entre le bois et la terre, ainsi que la géométrie et la conception des connecteurs. Ces travaux s'inscrivent dans une démarche de construction durable, valorisant des matériaux biosourcés et des techniques de mise en œuvre réversibles et peu énergivores.

Références

- Bassil L, Durif S, Bouchaïr A, El-Tawil K (2025) Demountable Shear Connectors in Steel-Concrete Beams as Solution for Rehabilitation, in Protection of Historical Constructions, vol. 595, F. M. Mazzolani, R. Landolfo, and B. Faggiano, Eds., in Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 595., pp. 220–227.
- Ceccotti A (2000) Composite concrete-timber structures. Prog Struct Eng Mater 2002; 4, pp. 264–275.
- Miccoli L, Perrone C, Müller U, Gardei A, Ziegert C (2011) Structural performances of earthen building materials. A comparison between different typologies. Building Materials and Building Technology to Preserve the Built Heritage, Vol. 2 Part I, pp. 87-95.