

Towards a method for characterising the mechanical properties of rammed-earth

Mathieu Lecaille¹, Simon Vacher², Jean-Claude Morel¹, Noémie Prime³, Florent Vieux-Champagne⁴, Eric Vincens², Jean-Patrick Plassiard³, Francesco Froio²

¹LTDS, UMR 5513, ENTPE, 2 rue Maurice Audin, 69120 Vaulx-en-Velin, France

²LTDS, UMR 5513, Ecole Centrale de Lyon, 36 avenue Guy de Collongue, 69134, Ecully Cedex, France

³LOCIE, UMR 5271, Univ. Savoie Mont-Blanc, Le Bourget du Lac 73370, France

⁴3SR, UMR 5521, Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, F-38000 Grenoble, France

RESUME (Background) The construction sector significantly contributes to ongoing global challenges, including climate and resource crises. Earthen building materials, such as rammed earth (RE), have regained interest due to their relevant assets. RE construction involves compacting moistened raw soil within formwork to produce load-bearing walls. However, the qualification of constitutive models developed for quasi-brittle materials for application to RE remains uncertain. **(Aim)** This work aims to investigate the mechanical properties of RE to identify the parameters of basic and advanced constitutive models. **(Method)** Silty-sand cylindrical specimens were manufactured using locally sourced soil, with double compaction employed to ensure homogeneity and representative physical characteristics. Mechanical testing included cyclic compression and indirect tensile tests, with Digital Image Correlation (DIC) technique were used to measure elastic properties, namely Young's modulus and Poisson's ratio. **(Results)** The mean, standard deviation and percentiles were calculated to characterise the material's mechanical behaviour. The preliminary findings exhibit strong consistency with existing literature, reinforcing their validity.

Mots-clefs Rammed-earth, Quasi-brittle, Mechanical Characterisation, Digital Image Correlation, Constitutive Model

I. INTRODUCTION

A. Contexte

Tous les scénarios SSP (*Shared Socio-economic Pathways*) envisagés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) convergent vers un système planétaire marqué par une instabilité croissante (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023a). Face aux poly-crisis systémiques annoncées, le secteur de la construction se révèle non seulement inadapté pour y faire face de manière robuste (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023b), mais participe également directement à leur intensification. En effet, le modèle économique linéaire (« take-make-use-dispose ») qui domine actuellement la construction contribue significativement à l'échelle mondiale à l'émission de gaz à effet de serre (GES) (UNEP, 2022), à

l'épuisement des ressources inertes (Torres et al., 2017), à l'artificialisation des sols (IPBES, 2019) et à la production de déchets (69% des déchets nationaux en masse en 2023 (ADEME, 2023), le tout dans un cadre social préjudiciable pour le corps social (Beiser, 2017; Jounin, 2014)).

La construction et l'entretien des nouveaux bâtiments sont responsables de 50% à 75% de leur empreinte carbone sur l'ensemble de leur cycle de vie (Habert et al., 2020). Parmi ces émissions de GES, environ la moitié provient exclusivement de la structure, c'est-à-dire en majorité du béton-armé. Ce constat s'explique principalement par deux facteurs : d'une part, la décarbonation du calcaire lors de la fabrication du clinker, et d'autre part, la dépendance aux énergies fossiles pour l'alimentation des hauts-fourneaux. Alors que des avancées notables ont été réalisées ces dernières décennies en matière d'efficacité énergétique des bâtiments à court terme, la réduction des pressions environnementales des matériaux de construction demeure largement négligée, laissant ainsi un levier d'action majeur inexploité dans la transformation du secteur (Röck et al., 2020).

Grâce à ses nombreux atouts, la construction en terre crue connaît, depuis plusieurs décennies, un regain d'intérêt au sein des acteurs du bâtiment (Villain, 2020). Cette dynamique se manifeste par la multiplication de projets de construction intégrant ce matériau sur l'ensemble du territoire national, le développement de formations spécialisées et l'augmentation du nombre de publications scientifiques consacrées au sujet (Morel et al., 2021). L'entrée en vigueur, le 1^{er} janvier 2022, de la nouvelle réglementation environnementale française sur la construction neuve (RE2020) renforce cet essor en introduisant un nouvel indicateur, l'Impact Carbone Construction (IC Construction). Le recours à la construction en terre crue permettrait de valoriser les terres excavées issue de l'expansion urbaine (444 Mt en Europe en 2020, (Joint Research Centre (European Commission) et al., 2023)), sans produire de nouveaux déchets grâce à la réversibilité des matériaux, avec une faible empreinte carbone du fait de faibles transports (si on reste sur de la terre locale) et de processus de transformation énergivore, tout en produisant des emplois qualifiés, non délocalisables, sur un territoire et des bâtiments durables, sains, confortables hygro-thermiquement pour l'utilisateur final. Ainsi, la construction en terre crue s'impose comme un des matériaux d'avenir.

La présente étude porte spécifiquement sur la technique du pisé, qui consiste à compacter par couches successives de 8 à 10 cm, à l'état humide, la terre prélevée localement, au sein d'un coffrage à l'aide d'un fouloir. Une fois compacté, le matériau est immédiatement décoffré à l'état frais et acquiert progressivement sa résistance mécanique au cours du séchage à l'air, sous l'effet des forces de succion générées en présence de l'eau introduite. Toutefois, malgré ses nombreux atouts, le déploiement à grande échelle du pisé se heurte à de nombreuses barrières dont l'absence d'outils de dimensionnement adaptés. A ce jour, les bureaux d'étude ne disposent pas de modèles numériques suffisamment fiables pour concevoir des ouvrages en pisé conformes aux exigences réglementaires en vigueur. En l'absence de normes dédiées, l'annexe D de l'Eurocode 0 NF-EN-1990 relative au « Dimensionnement assisté par l'expérimentation » constitue le principal cadre méthodologique mobilisé par les bureaux d'étude pour justifier leur paramètres matériaux. Cependant, cette approche engendre des contraintes de coûts et de délais dans la réalisation des projets (Pelé-Peltier, 2023). C'est pourquoi, la modélisation numérique du comportement

mécanique des matériaux quasi-fragiles représente un enjeu stratégique pour le développement et la structuration de la filière terre crue.

B. Modélisations de la loi de comportement du pisé

Dans son état sec, le pisé a un comportement quasi-fragile, tout comme le béton. Cependant, il se distingue de ce dernier par une résistance d'un ordre de grandeur plus bas et d'une rigidité plus faible. La fonction liante provient dans le pisé du couple argile-eau (forces de succion à l'échelle des particules argileuses), alors que pour le béton la cohésion est assurée par une matrice cimentaire (prise de la pâte de ciment, formation d'hydrates).

Le comportement du pisé se rapproche donc plus de celui des sols cohésifs et peut être interprété au travers de résultats expérimentaux, [FIGURE 1](#):

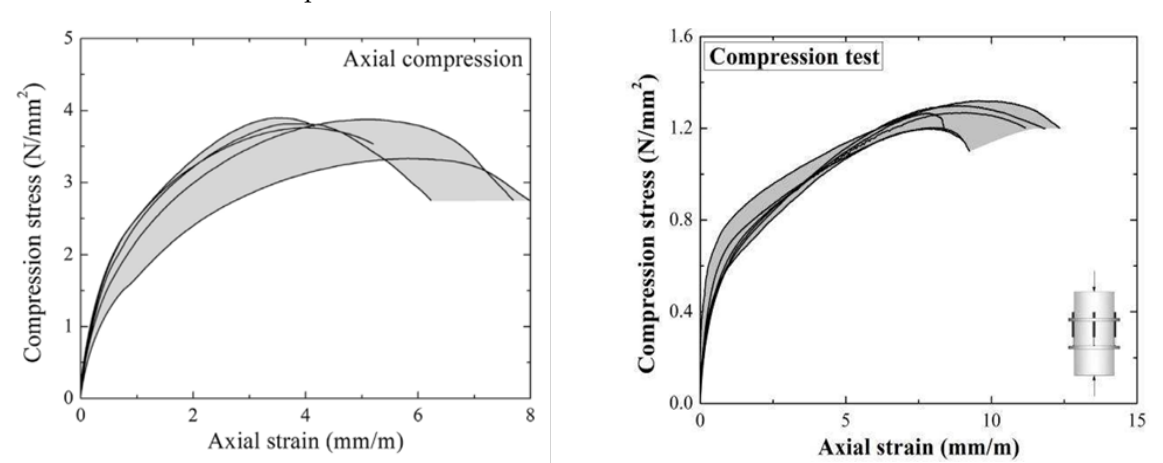


FIGURE 1. Exemples de résultats expérimentaux issus d'essais de compressions axiales sur du pisé. Ces essais ont été effectués sur deux matériaux distincts, dans le cadre de travaux de recherche différents, respectivement (Miccoli et al., 2015 ; Silva et al., 2014).

Au travers de ces courbes, on peut mettre en évidence un comportement linéaire jusqu'à ce que la contrainte axiale ait atteint environ le quart de la contrainte de pic. Après quoi, le pisé entre en régime non linéaire jusqu'à atteindre son pic de résistance correspondant à une déformation de l'ordre de 1%. Enfin, le matériau radoucit jusqu'à la rupture physique de l'échantillon. Par ailleurs, la résistance du pisé à la traction est de l'ordre de 5 à 10% de la résistance mesurée à la compression, comme cela a pu être montré par (Araldi, 2017), bien que l'on manque de données à ce niveau et que les procédures d'essais de traction soient questionnables.

Pour simuler numériquement ces phénomènes, on peut employer un modèle élasto-plastique avec éventuellement de l'endommagement. Voici une liste (non exhaustive) de modèles susceptibles d'être utilisés pour des simulations de pisé : modèle de Mohr-Coulomb parfaitement plastique associé à un critère de Rankine, modèle utilisant un critère de Mohr-Coulomb avec durcissement et radoucissement des paramètres de cohésion et d'angle de frottement interne, modèle de béton élasto-plastique avec endommagement (alias CDP pour Concrete Damaged Plasticity), modèle CJS-RE (Adi Riyono, 2017), modèle de béton de Drucker-Prager (Loccarini et al., 2020), modèle à

endommagement orthotrope avec re-fermeture de fissure localisées (Sellier et al., 2013). Ces différents modèles sont implémentés chacun sur au moins l'un des codes commerciaux ou académiques : ABAQUS, FLAC3D, ANSYS, ADINA, CAST3M, FLUENDO3D.

Dans la majorité des modèles, deux critères de plasticité sont mis en jeu indépendamment : un critère de traction, et un critère de cisaillement. Les différents critères de cisaillement sont souvent exprimés en fonction des invariants du tenseur de contrainte, à savoir la pression hydrostatique, la contrainte déviatorique et l'angle de Lode. A l'inverse, le critère de Rankine, utilisé pour la traction, compare la contrainte principale mineure avec une valeur de résistance (unique dans un cas isotrope et dépendant de l'orientation dans un cas non isotrope), pour définir la valeur de la résistance, il faut réaliser un essai de traction directe ou indirecte, pour déterminer la valeur de la résistance initiale du matériau. Pour déterminer le critère de cisaillement, il faut disposer de deux essais de compression ayant des pressions de confinement différentes, par exemple, un essai de compression simple et un essai de compression confiné à la cellule triaxiale. Avec cela il est possible de déterminer une forme linéaire de critère de cisaillement, valide pour un chemin de contrainte de compression (c'est à dire à angle de Lode nul). Pour déterminer la dissymétrie du critère de cisaillement, c'est à dire le rapport des résistances en compression et en extension, il est nécessaire d'effectuer un essai d'extension triaxiale. Pour rappel, il n'est pas possible d'atteindre le critère de cisaillement par un essai de traction sans confinement, car le critère de Rankine est rencontré en premier lieu. Les éléments précédents permettent de déterminer l'enveloppe de rupture du pisé associée aux conditions de service courantes, il faut aussi déterminer les paramètres définissant le durcissement du critère de cisaillement et le radoucissement. Pour cela, il faut disposer de la courbe entière des essais de compression et de traction. Enfin, lorsqu'on veut définir l'endommagement, il faut réaliser des essais cycliques.

En pratique, dans le contexte économique actuel, il n'est pas possible de devoir réaliser tous les essais de caractérisation des paramètres de la loi de comportement. Il faudra donc choisir d'utiliser un modèle à peu de paramètres et faire un certain nombre d'hypothèses, dont la robustesse devra être évaluée. La courbe de comportement lors d'un essai de traction est très difficile à obtenir, mais il est possible de considérer que le radoucissement est très brutal. En l'absence d'essai de traction, il est possible d'estimer la résistance en traction à 8% de la résistance en compression en première approche, ou du moins dans un intervalle de 6 à 10% de la résistance à la compression (6.3% trouvée en moyenne dans (Araldi, 2017) et 10% souvent utilisé par défaut dans de nombreuses autres études, dont (Miccoli et al., 2015)).

C. Objectif

Cette étude vise à déterminer les procédures expérimentales permettant de caractériser les paramètres des lois de comportement, qu'il s'agisse de modèles de base ou avancés. S'appuyant sur un matériau de terre locale, elle constitue une étape préliminaire vers une identification complète des paramètres mécaniques. Dans ce but, des essais de compression simple cyclique ainsi que des essais de traction indirecte ont été menés. Au cours des essais de compression, les déformations axiales et radiales ont été mesurées par stéréo corrélation d'images, permettant ainsi d'évaluer avec

précision et sans interférence les paramètres élastiques, la résistance à la compression simple et les variations volumiques du matériau.

L'article s'articule en deux parties principales. La première partie est consacrée à la description du matériau employé, à la préparation des éprouvettes et aux protocoles expérimentaux adoptés. La seconde partie présente et analyse les résultats obtenus.

II. MATERIAU ET METHODES

A. Matériau

Le matériau étudié, désigné sous l'acronyme CLM, provient de la région de l'Ain, au nord de Lyon, où il a historiquement servi à l'édification d'un patrimoine vernaculaire important en pisé (FIGURE 2), attestant de la convenance de ce matériau pour la construction de bâtiments en pisé durables. Le matériau CLM provient d'un terrain local, prélevé en juillet 2024 à l'occasion d'un chantier d'extension d'une cantine scolaire sur la même commune, en juillet 2024.



FIGURE 2. Grange en pisé à Saint-Trivier-sur-Moignans (01990).

L'analyse granulométrique, réalisée conformément à la norme ISO 11277:2020 et à l'aide d'un sédimentomètre automatique (PARIO Meter, Allemagne) sur le passant à 80 μm , est présentée en FIGURE 3a. Elle révèle une teneur massique en argile (fraction particulaire de diamètre inférieur à 2 μm) de l'ordre de 24 %. Par ailleurs, une recommandation non-prescriptive suggérée par (Guillaud et al., 2006), définit un critère d'identification de sol convenable à la construction en pisé, basé sur une enveloppe granulométrique de référence. Cependant, bien que CLM ait été historiquement employé dans la construction en pisé, sa courbe granulométrique ne figure pas dans l'intervalle recommandé. Ainsi, l'analyse granulométrique seule n'est donc pas un critère suffisant pour identifier la convenance d'un sol à la construction en pisé. Cette conclusion a été plus amplement détaillée dans (Rojat et al., 2020).

De plus, la valeur au bleu a été déterminée sur la fraction 0-5mm du sol. La mesure du VBS des particules fines (argiles + limon) a été établie en suivant la procédure donnée dans NF EN 17542-3 et vaut 1.1g/100g.

Les courbes d'isothermes de sorptions mesurées à 24°C à l'aide d'un DVS (Dynamic Vapour Sorption) Intrinsic PLUS (Surface Measurement Systems, Londres, Angleterre) sont présentés **FIGURE 3b** en sorption et désorption. Les isothermes de sorptions caractérisent l'évolution de la teneur en eau (%) en fonction de l'humidité relative ambiante (%) à température constante.

Enfin, la courbe Proctor Normal du matériau CLM réalisé selon la norme NF P94-093 est présentée **FIGURE 3c**. Elle indique un optimum pour une teneur en eau de 12.8%.

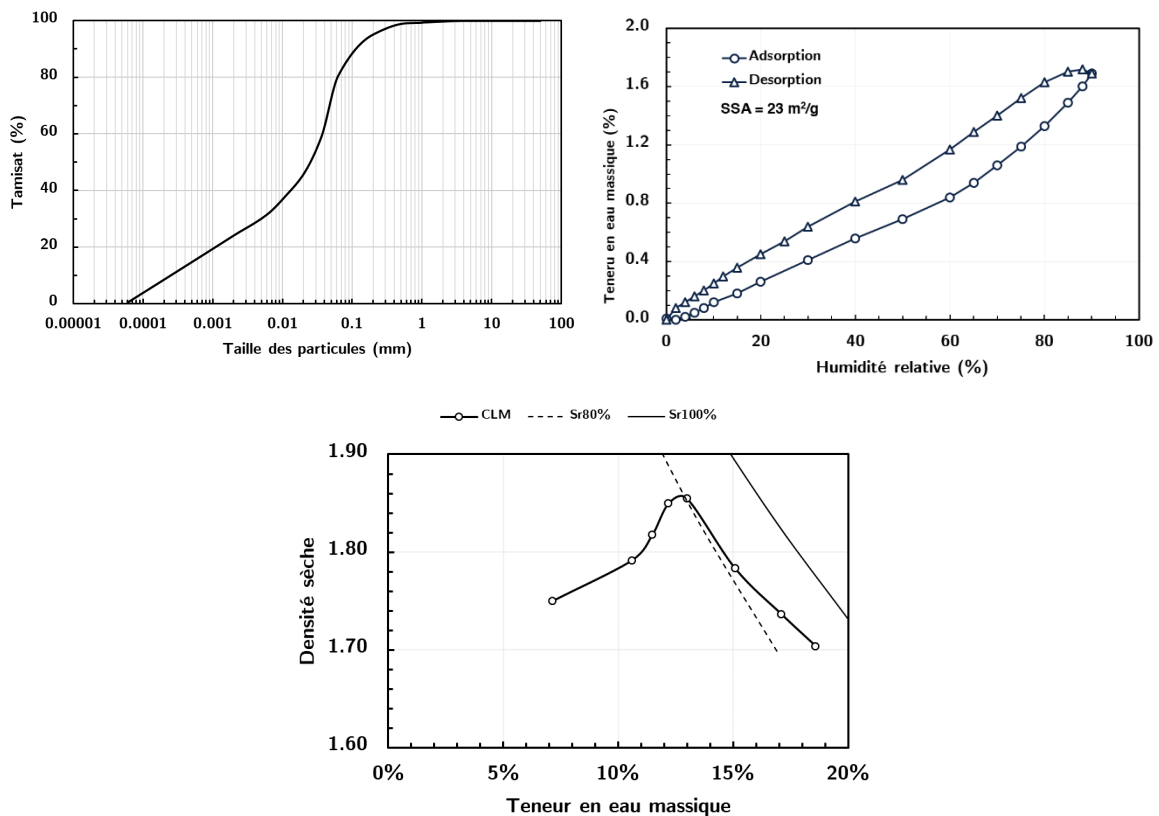


FIGURE 3. (a) Courbe granulométrique (b) Courbes de sorption (c) Courbe Proctor Normal

B. Préparation des éprouvettes

Dans un souci de représentativité des paramètres mécaniques à identifier, les éprouvettes étudiées ont été fabriquées selon des paramètres physiques (teneur en eau de fabrication et densité sèche) les plus semblables possible de ceux d'un muret réalisé en pisé par un maçon professionnel avec le matériau CLM.

La teneur en eau de fabrication était de 7.1% (n=2) mesurée selon la norme NF P 94-050 à partir de deux échantillons prélevés directement sur le talus de terre utilisée pour la fabrication du muret.

La densité sèche du muret a été mesurée par pesée hydrostatique selon la norme NF P 94-064 à partir de 12 prélèvements prismatiques de volume moyen égale à $456 \pm 140 \text{ cm}^3$ permettant une cartographie discrète de la densité sèche moyenne du muret présentée FIGURE 4. Les mesures de densité sèche ont mis en évidence les hétérogénéités de densité sèche caractéristiques du pisé, à savoir un gradient de densité à l'intérieur des couches dans le sens du compactage, et un gradient de densité dans le sens orthogonale au coffrage. La 7^e couche, située en bas du muret, bénéficie d'une densité sèche en moyenne plus élevée du fait de la présence du coffrage en dessous de celle-ci. La densité sèche de fabrication retenue est prise égale à 1.78 ± 0.01 , ce qui correspond à la moyenne des mesures en excluant celles de la 7^e couche qui est singulière.

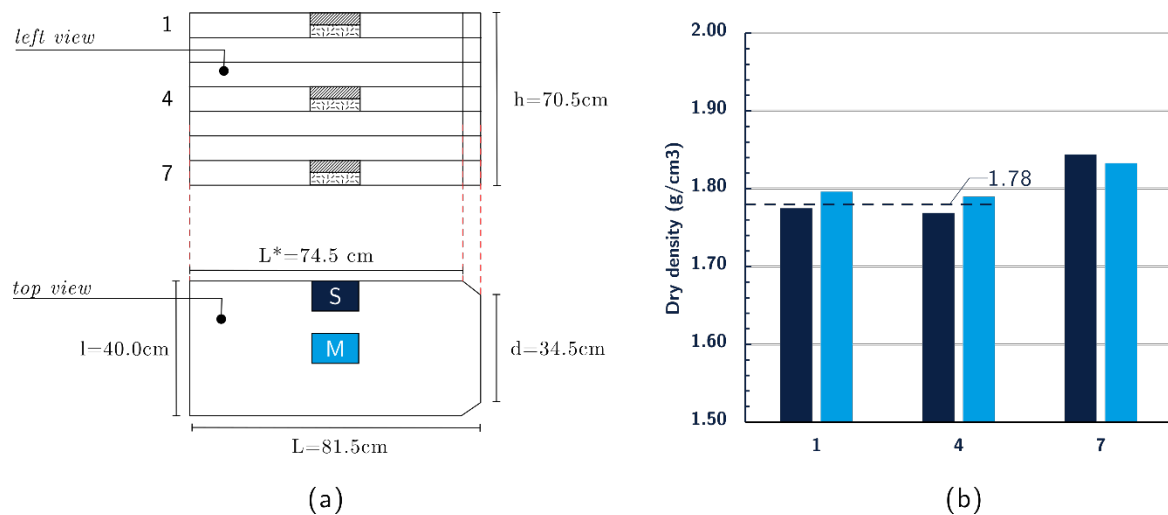


FIGURE 4. Cartographie de la densité sèche du muret réalisé par le maçon. (a) Schéma du muret avec ses dimensions et localisation des zones de prélèvement aux couches 1, 4 et 7, au centre (M) et sur le côté (S), en partie haute et basse. (b) Densité sèche en fonction du numéro de couche. Densité sèche moyenne : 1.78 ± 0.01 .

Le comportement mécanique du pisé étant fortement lié à sa densité sèche, il a été choisi d'identifier les paramètres mécaniques à l'ordre 0 sur des éprouvettes cylindriques homogènes (sans couches, sans gradient de densité). Pour cela, un double compactage (Mesbah et al., 1999) à l'aide d'un moule métallique équipé de deux ressorts identiques en série a été utilisé pour la fabrication des éprouvettes. Le protocole de fabrication adopté, du remplissage du moule au programme de compactage, est similaire à celui développé par (Champiré, 2017, p. 61). Il permet de garantir selon l'auteur l'homogénéité des éprouvettes, qui dans notre cas a été vérifiée par analyse tomographique. Les images obtenues par micro-tomographie ont permis d'estimer la densité sèche locale à partir des niveaux de gris des projections, analysés en fonction de la hauteur de l'éprouvette. Les résultats montrent trois observations principales (i) la présence d'un double gradient de densité sèche, reflet du double compactage effectué lors de la fabrication de l'éprouvette. (ii) Les variations de densité sèche induites par le double compactage demeurent faibles, de l'ordre de 0.02 g.cm^{-3} , ce qui les rend négligeables en comparaison des gradients plus significatifs observés sur un muret construit avec le même matériau, où une variation de 0.12 g.cm^{-3}

³ a été mesurée en moyenne à l'intérieur d'une couche de pisé. L'homogénéité globale obtenue est ainsi satisfaisante. (iii) Néanmoins, des microfissures horizontales de l'ordre d'un 1/3 mm sont présentes sur la hauteur de l'éprouvette. Elles peuvent être notamment induites lors de la phase de déchargement du piston dans le moule.

Le moule métallique a permis la réalisation d'éprouvettes cylindriques de 35mm de diamètre et d'une hauteur de 72 mm, correspondant à un élancement 2. La présence de microfissures a justifié le choix d'un élancement 1 pour les éprouvettes de traction indirecte afin de garantir une meilleure répétabilité du fendage complet.

Le matériau CLM a été préparé à la teneur en eau souhaitée dans un malaxeur planétaire PERRIER pendant 5 min à vitesse de rotation modérée, puis les agglomérats de particules fines ont été pulvérisés dans un mortier-pilon avant d'être déposés dans un sac plastique hermétique pendant 48h pour homogénéiser la teneur en eau au sein du matériau. Une teneur en eau de 7.1% (n=3) est mesurée selon la norme NF P 94-050 dans le sac.

Toutes les éprouvettes ont été réalisées par la suite à partir de la même gâchée. Elles sont ensuite mises en étuve à 60°C afin d'atteindre un état sec stable. Une fois que l'équilibre en masse était atteint en étuve, c'est-à-dire une masse constante avec une variation inférieure de 2% en 48h, les éprouvettes étaient sorties de l'étuve, puis laissées en conditions ambiantes de laboratoire jusqu'à stabilisation de leur température. Durant cette phase transitoire, une ré-augmentation de leur teneur en eau est observée, liée aux échanges hygrothermiques avec l'environnement. Ce

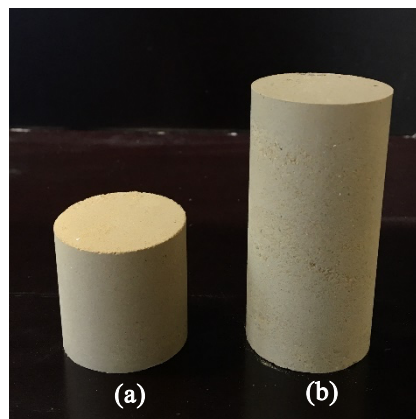


FIGURE 5. Eprouvettes en terre compactée réalisées par double compactage. (a) Eprouvette avec un élancement 1, destinées aux essais de traction indirecte. (b) Eprouvette avec un élancement 2, utilisées pour les essais de compression simple cyclique.

phénomène, non souhaitable, compromet la répétabilité des conditions d'essai, en introduisant une variabilité non maîtrisée des teneurs en eau d'essai. Dans la suite de l'étude, nous allons mettre en place un conditionnement intermédiaire, par exemple à l'aide d'un film étirable hermétique, qui permettrait de limiter ces échanges avec l'air ambiant pendant la période de refroidissement. Une telle précaution limitera l'incertitude liée à la teneur en eau d'essai. Tous les essais mécaniques ont été réalisés dans les conditions de température et d'humidité relative ambiantes du laboratoire. Une

teneur en eau d'essai de 0.9% a été mesurée en moyenne sur chaque éprouvette post-mortem avec un écart type de 0.1%.

C. Dispositifs expérimentaux

Essais à la compression simple

Les essais de compression simple ont été réalisés à l'aide d'une presse hydraulique (INSTRON 8502, Norwood, Etats-Unis) équipée d'un capteur de force d'une capacité de 5kN. Les déformations axiales et radiales ont été mesurées par stéréo-corrélation d'images en double configuration, permettant une fréquence d'acquisition de 2 Hz. Comme illustré schématiquement [FIGURE 6](#), l'angle formé entre chaque paire de caméras était de 152° , tandis que l'angle séparant les deux caméras d'une même paire était de 28° . Ce dispositif garantit une incertitude de mesure de $\pm 2.6 \mu\text{m/m}$ pour les déformations calculées.

Les caractéristiques du système optique sont détaillées dans le [TABLEAU 1](#). Une faible ouverture de diaphragme ($f/16$) a été retenue pour optimiser la profondeur de champ en raison de la géométrie cylindrique de l'éprouvette analysée. Cette configuration a nécessité l'utilisation d'un éclairage puissant assuré par quatre projecteurs (LED SMD 48W, angle de diffusion 60°) afin de garantir un contraste suffisant.

TABLEAU 1. Caractéristiques des systèmes optiques

Caméra		Objectif optique	
Ref.	<i>FLIR Grasshopper3 monochrome</i>	Ref.	<i>Schneider Kreuznach XENOPLAN</i>
Modèle	<i>GS3-U3-51S5M</i>	Modèle	<i>2.0/28-0901</i>

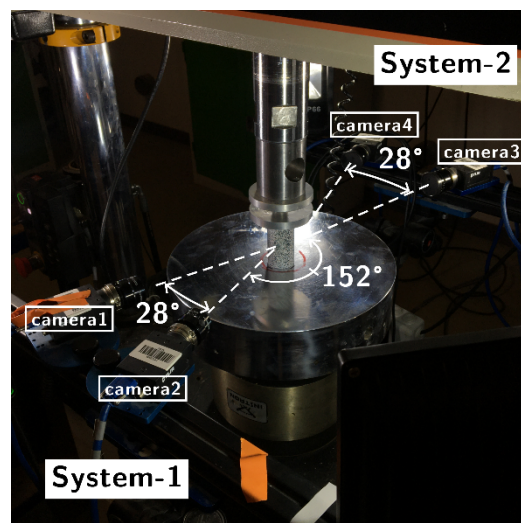


FIGURE 6. Dispositif expérimental d'acquisition par stéréo corrélation d'images.

Résolution	5 MPixel	Longueur focale	28mm
Largeur pixel	3.45 μm	Ouverture diaphragme	16mm

La surface des éprouvettes a été préalablement recouverte d'une fine couche de peinture blanche, puis tachetée de noir à l'aide d'un aérosol pour générer un mouchetis. L'analyse par stéréocorrélation d'images a été effectuée grâce au logiciel commercial DaVis 10.2.1 (LaVision, Göttingen, Allemagne). Ce dernier segmente l'image en imagerie (zones carrées de dimensions identiques) regroupant entre 5 et 10 taches noires, et suit le déplacement du centre de chaque imagerie d'une image à l'autre. La précision de l'acquisition dépend en partie de la taille du mouchetis : un mouchetis plus fin améliore la résolution du calcul des déplacements, à condition qu'il reste suffisamment large pour être détecté avec précision par les caméras. La taille des imagerie a été déterminée manuellement à 43 px².

Un exemple du champ de déplacement vertical selon l'axe (Oy) calculé par stéréocorrélation d'images est donné FIGURE 7. Le champ de déplacement est calculé tout au long de l'essai sur les 2/3 de la surface de l'éprouvette à partir d'une paire de caméras. Des extensomètres virtuels formés à partir de paires de points de suivi sont placés dans le tiers central pour mesurer la déformation de l'éprouvette. Les déformations moyennes radiale et axiale ont ensuite été respectivement calculées à partir de la moyenne des 4 extensomètres horizontaux et des 4 extensomètres verticaux, répartis sur les deux faces de l'éprouvette.

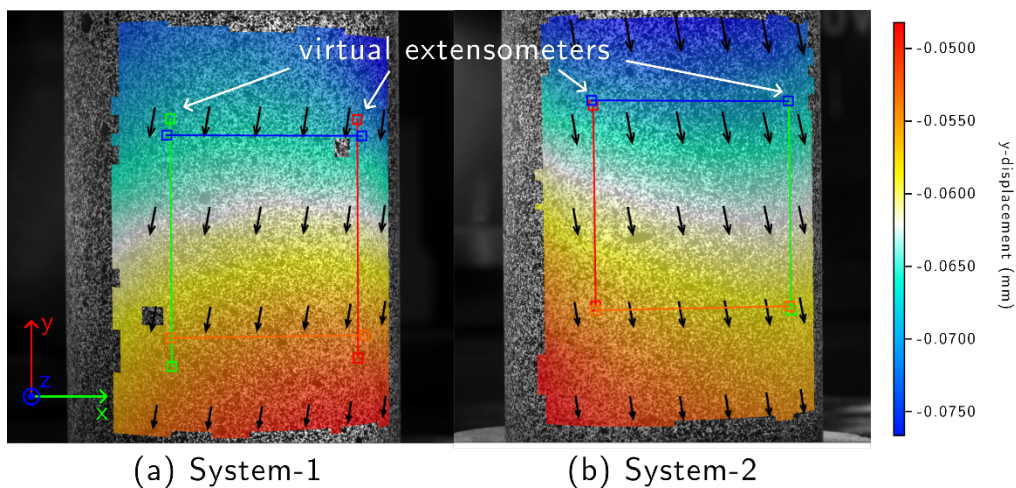


FIGURE 7. Corrélation d'images pour chaque système de caméras, donnant le calcul du déplacement vertical sous une contrainte donnée.

Le chargement de l'éprouvette s'effectue en pilotant le déplacement du piston à une vitesse constante de 0.4 mm/min, jusqu'à la rupture de cette dernière. Un pré-chargement d'environ 0.2 MPa est appliqué, une valeur suffisamment faible comparativement à la résistance en compression R_c , permettant ainsi d'en assurer la mesure. Au cours du chargement, une série de cycles de

chargement-déchargement est effectuée, à environ 25% de R_c , avec une amplitude de 0.3 kN pour déterminer les paramètres élastiques du matériau (Poullain et al., 2023). Il est implicitement supposé que ces cycles n'ont pas d'effet sur la résistance à la compression simple et qu'ils sont conduits dans le régime réversible de déformations. De plus, selon la théorie élasto-plastique, le comportement du matériau est supposé être linéaire et élastique durant ces cycles. L'évaluation des paramètres élastiques nécessite une phase de déchargement, où seules des déformations élastiques sont supposées se produire. C'est dans ce contexte que les deux paramètres fondamentaux de la loi de Hooke, à savoir le module de Young (E), et le coefficient de Poisson (ν), sont déterminés au cours des cycles selon les relations suivantes :

$$E = \frac{\Delta\sigma_{xx}^{\text{cycle}}}{\Delta\varepsilon_{xx}^{\text{cycle}}} \quad ; \quad 1 - 2\nu = \frac{\Delta\varepsilon_v^{\text{cycle}}}{\Delta\varepsilon_{xx}^{\text{cycle}}} \quad (1)$$

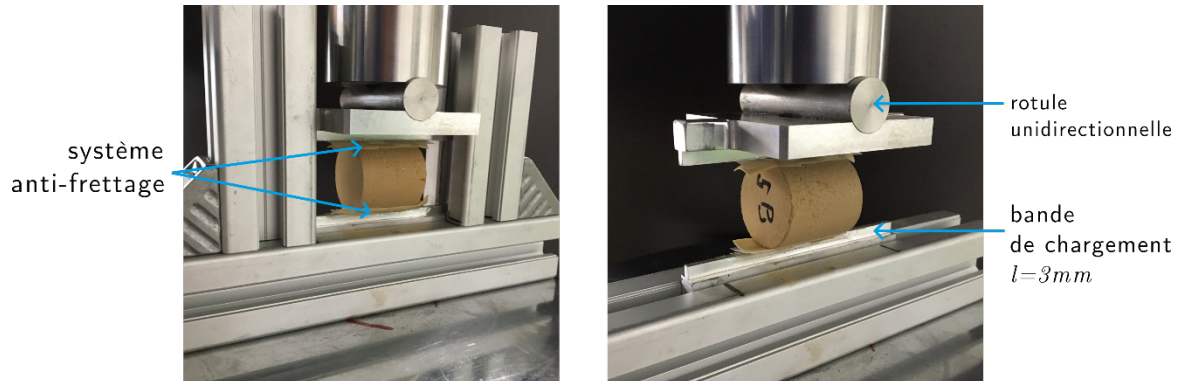
Où $\Delta\sigma_{xx}^{\text{cycle}}$, $\Delta\varepsilon_{xx}^{\text{cycle}}$, $\Delta\varepsilon_v^{\text{cycle}}$ sont la variation de la contrainte axiale, de la déformation axiale, et de la déformation volumétrique entre les charges minimal et maximal d'un cycle.

Essai de traction indirecte

L'essai de traction directe présente plusieurs limitations pratiques. Contrairement au béton, il n'est pas envisageable de solidariser l'échantillon au piston de la presse par simple collage. Par ailleurs, la fixation des éprouvettes par des dispositifs de préhension, tels que des mâchoires de traction, pose des difficultés d'accrochage mécanique sans induire des contraintes parasites. Ces systèmes ne garantissent pas un alignement parfait des forces appliquées, ce qui peut engendrer l'apparition d'efforts secondaires, notamment de flexion ou de cisaillement, susceptibles de fausser les résultats. Enfin, le matériau terre est particulièrement fragile en traction dans son état sec, ce qui accentue la sensibilité de l'essai aux perturbations mécaniques et rend sa reproductibilité discutable. A l'inverse, l'essai de traction indirecte, désigné également sous les termes d'essai brésilien ou d'essai de fendage, se distingue par sa simplicité de mise en œuvre. Il favorise une distribution des efforts bien contrôlée tout en étant moins affecté par les défauts d'alignement. L'essai de traction indirecte consiste à soumettre une éprouvette à une compression appliquée le long de deux génératrices diamétralement opposées. Ce chargement a pour effet d'induire des contraintes de traction orthogonales à la direction de l'effort appliqué, provoquant ainsi la rupture de l'éprouvette par fendage vertical le long de ses génératrices. Le dispositif expérimental a été spécifiquement conçu pour s'adapter aux dimensions des éprouvettes cylindriques étudiées. L'essai s'effectue à l'aide d'un système de chargement placé entre les plateaux d'une presse et comprenant :

- Un plateau supérieur en inox, monté sur un appui rotulé graissé unidirectionnel le long de la génératrice, et muni d'une bande de chargement de 3 mm, correspondant à 8.5% du diamètre de l'éprouvette ;
- Un plateau inférieur en inox, également équipé d'une bande de chargement de 3 mm ;

- Un système d'anti-frettage, composé d'un élastomère, et d'une couche d'huile intercalée entre deux bandes de polypropylène (PP).



(a) Mise en place de l'éprouvette (b) Eprouvette pré-chargée

FIGURE 8. Dispositif d'essai de traction indirecte développé pour les éprouvettes cylindriques d'élongement 1 (dimensions : 35 x 72 mm).

Le choix de la largeur des bandes de chargement est un paramètre déterminant dans l'essai de traction indirecte, car la résistance à la traction mesurée dépend à la fois des dimensions de l'éprouvette et de la largeur de ces bandes. Selon (Rocco et al., 1999), une largeur relative inférieure à 8% du diamètre de l'éprouvette est recommandée pour limiter l'effet de taille.

Un système d'aide au chargement des éprouvettes est utilisé pour positionner l'éprouvette sous la presse et pour appliquer un pré-chargement initial de 50 N, soit environ 23% de R_t . Ce dispositif inclut également une règle de centrage, garantissant un centrage précis des éprouvettes le long de leurs génératrices en contact avec les bandes de chargements. Une fois le pré-chargement appliqué, ce système est retiré avant la phase d'essai. L'essai est conduit à une vitesse de déplacement constante de 0.06 mm/min, soit 1/7 de la vitesse utilisée lors des essais de compression. Cette vitesse a été choisie suffisamment faible pour éviter tout biais sur les résistances mesurées et d'assurer une bonne répétabilité des résultats. En effet, il a été observé une augmentation de 20% de la résistance à la traction lorsque la vitesse varie de 1 à 10^e (Olivier and Mesbah, 1995). La résistance à la traction est calculée en appliquant la loi de Hooke grâce la formule proposée par (Carneiro, 1943) :

$$R_t = \frac{2F}{\pi RL} \quad (2)$$

Où F est la force de compression maximale appliquée, R et L sont respectivement le rayon et la longueur de la génératrice.

III. Résultats

A. Essai à la compression cyclique

L'objectif des essais de compression simple cycliques était de déterminer simultanément les paramètres élastiques du matériau, à savoir le module d'Young et le coefficient de Poisson, ainsi que sa résistance à la compression. La première chose a consisté à vérifier l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire durant les cycles de chargement-déchargement. Les résultats des essais de compression cycliques sur CLM sont tracés en **FIGURE 9**. Les courbes de contrainte-déformation montrent un comportement linéaire marqué tant en phase de chargement que de déchargement, ce qui est corroboré par des coefficients de corrélation de régression linéaire satisfaisant (0.99 ± 0.01 en moyenne). Néanmoins, de légères boucles d'hystérésis sont observables, bien que leur amplitude demeure limitée. Par conséquent, l'hypothèse d'un comportement linéaire élastique est validé en première approximation.

Durant les cycles, un module de Young moyen de 1.9 ± 0.1 GPa a été mesuré. Ces valeurs s'avèrent cohérentes avec celles de la littérature pour des éprouvettes de terre compactée, généralement comprises entre 0.5 et 2 GPa (Fabbri et al., 2022) dans le cas d'éprouvettes en pisé ayant une résistance à la compression comprise entre 0.5 à 3 MPa.

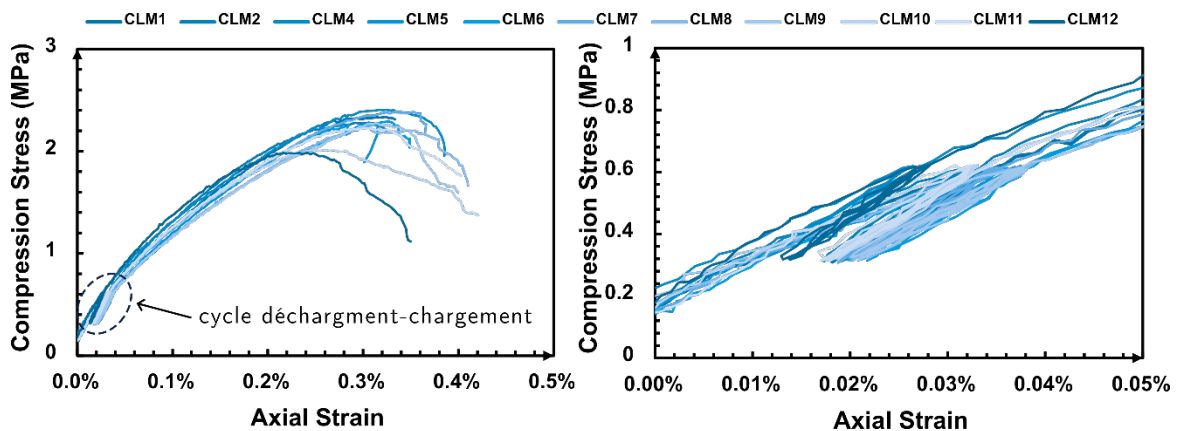


FIGURE 9. Evolution de la contrainte axiale en fonction de la déformation axiale. (a) Courbe complète. (b) Zoom sur les cycles de chargement-déchargement.

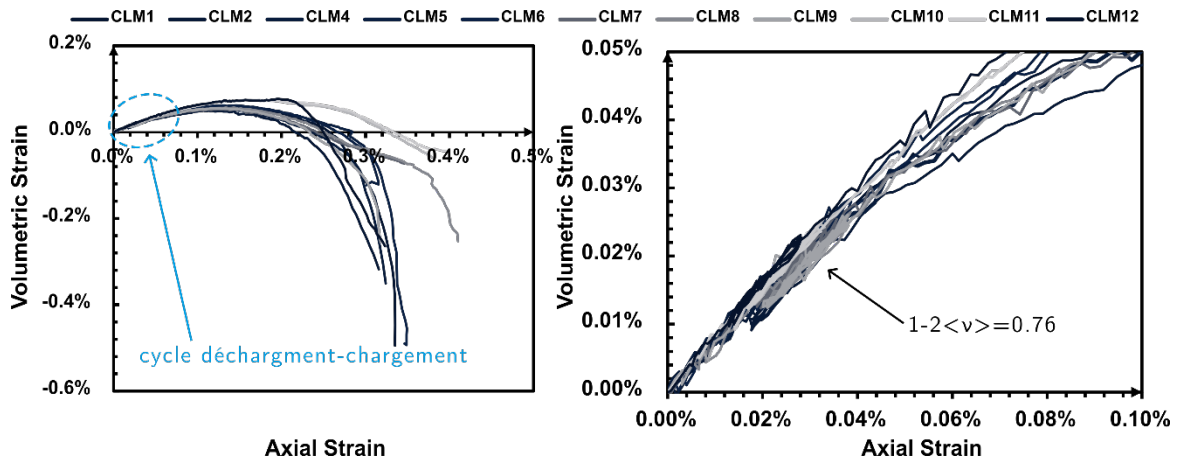


FIGURE 10. Evolution de la déformation volumique en fonction de la déformation axiale. (a) Courbe complète. (b) Zoom sur les cycles de chargement-déchargement.

Au début de la phase de chargement, la relation entre la déformation volumique et la déformation axiale reste linéaire, jusqu'à environ 45% de R_c , avec un coefficient de Poisson variant de 0.11 à 0.15, pour une valeur moyenne de 0.12 avec un écart type de 0.01. Au-delà de ce seuil, la relation devient de plus en plus non-linéaire pour l'ensemble des éprouvettes testées, et transite vers un régime de dilatance lié à l'ouverture de fissures.

Les valeurs obtenues pour le coefficient de Poisson sont cohérentes avec celles rapportées dans une étude sur des éprouvettes de terre compactées carottées (Champiré et al., 2016). Néanmoins, elles apparaissent significativement inférieures à certaines valeurs de la littérature, avec un écart relatif de 56% par rapport aux résultats de (Bui et al., 2014; Narayanaswamy, 2016). De plus, un intervalle de 0.2 à 0.35 est donné par (Fabbri et al., 2022). Toutefois, ces valeurs ne sont pas directement comparables, les différences pouvant s'expliquer par des teneurs en eau distinctes lors des essais ainsi que par des niveaux de chargement des cycles différents.

B. Essai de traction indirecte

Les essais ont donné des résultats reproductibles concernant les contraintes à la rupture avec un

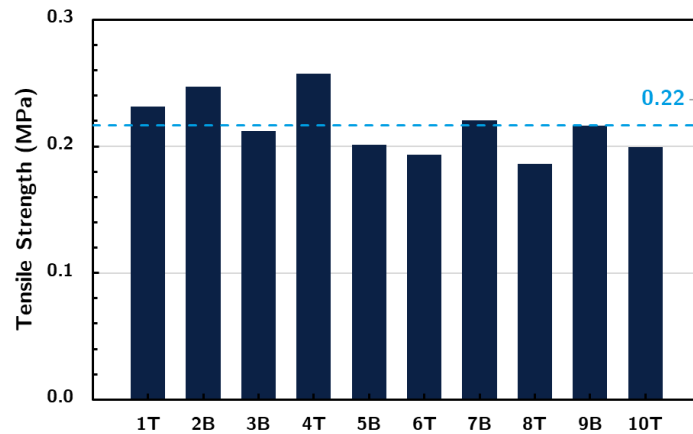


FIGURE 11. Résistances à la traction mesurées par fendage en fonction du numéro d'échantillon (T=top, B=bottom indiquant le positionnement dans le moule lors du compactage). La valeur moyenne est représentée par un trait pointillé.

écart type de 0.02 MPa. Une résistance à la traction moyenne égale à 0.22 MPa ($n=10$) est obtenue, soit 9.8% de R_c . Ce ratio est cohérent avec les valeurs habituellement proposées à l'état sec (Araldi, 2017; Bui et al., 2009; Miccoli et al., 2015).

IV. CONCLUSION

Des essais de compression simple incluant des cycles de chargement-déchargement à hauteur de 25% de R_c ont été réalisés sur des éprouvettes en terre crue compactées par double compactage. Ces essais ont permis de déterminer les paramètres élastiques (le module de Young et le coefficient de Poisson), ainsi que la résistance à la compression d'un matériau local employé dans la construction en pisé. Les déformations radiales et axiales ont été mesurées avec un système d'acquisition en stéréo corrélation d'images. Bien que les essais aient été menés sur des éprouvettes homogènes de petites dimensions, les résultats obtenus révèlent un comportement élasto-plastique comparable à celui observé sur des éprouvettes du pisé. En parallèle, un dispositif d'essai de traction indirecte a été développé et mis en œuvre, permettant la réalisation d'essais répétables sur des éprouvettes de petites dimensions.

Dans la continuité de ces travaux, des essais de compression confinés et des essais d'extension à la cellule triaxiale seront entrepris pour caractériser respectivement le critère de cisaillement, et la dissymétrie de ce dernier. L'influence de la teneur en eau d'essai et de la densité sèche sur le critère limite modélisé sera étudiée.

Néanmoins, certaines limitations expérimentales doivent être soulignées. Les protocoles proposés s'adressent à des éprouvettes de petites dimensions, tandis que les terres utilisées dans les constructions en pisé peuvent contenir des inclusions dépassant parfois les 50 mm de diamètre. Dès

lors, la transposition directe de la méthodologie expérimentale à des terres graveleuses non tamisées s'avère inadéquate.

Deux stratégies peuvent alors être envisagées. La première consiste à tamiser le matériau brut, puis à établir des lois de similitude entre le matériau original et sa version tamisée, afin de prendre en compte les modifications induites sur la morphologie des éprouvettes (Pelé-Peltier et al., 2022). La seconde option préconise l'utilisation d'éprouvettes de plus grande taille, permettant l'incorporation directe du matériau dans son état granulométrique initial, sans tamisage au préalable de la granulométrie.

Enfin, il convient de souligner qu'un seul matériau testé ne suffit pas, à lui seul, pour valider et généraliser la méthodologie proposée. Les résultats obtenus à partir de la terre CLM ne sauraient être extrapolés à l'ensemble des terres à pisé. En effet, la variabilité intrinsèque des sols est telle qu'aucune terre ne peut, à elle seule, être considérée comme représentative de l'ensemble des terres utilisées dans ce type de construction. Cette observation souligne la nécessité d'élargir le champ d'étude à plusieurs types de terres, afin de prendre en compte la diversité des contextes géologiques et des pratiques constructives. C'est précisément un objectif poursuivi dans le cadre du projet PISEZ!, qui s'attache à explorer cette variabilité à travers le choix de deux matériaux différents, afin de balayer un spectre représentatif de la diversité des terres à pisé.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été réalisé dans le cadre du projet « PISEZ ! », projet de recherche lauréat de l'appel à projet SIC ADEME « Soutien à l'innovation dans la construction matériaux bois, biosourcés et géosourcés » financé par l'Etat dans le cadre de France 2030. Le projet contribue également directement aux travaux de recherche du Projet National Terre, labellisé par le Ministère de la Transition écologique en 2021.

REFERENCES

- ADEME, 2023. Déchets Chiffres-clés.
- Adi Riyono, W., 2017. CJS-RE : a hierarchical constitutive model for rammed earth (These de doctorat). Lyon.
- Araldi, E., 2017. Identification of the mechanical behavior of rammed earth including water content influence.
- Beiser, V., 2017. He who controls the sand: the mining "mafias" killing each other to build cities. *The Guardian*.
- Bui, Q.-B., Morel, J.-C., Hans, S., Meunier, N., 2009. Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth. *Mater Struct* 42, 1101–1116. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9446-y>
- Bui, Q.-B., Morel, J.-C., Hans, S., Walker, P., 2014. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials* 54, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.067>

- Carneiro, F., 1943. A new method to determine the tensile strength of concrete, in: The 5th Meeting of the Brazilian Association for Technical Rules. Presented at the Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.
- Champiré, F., 2017. Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction. ENTPE.
- Champiré, F., Fabbri, A., Morel, J.-C., Wong, H., McGregor, F., 2016. Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. *Construction and Building Materials* 110, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.027>
- Fabbri, A., Morel, J.-C., Aubert, J.-E., Bui, Q.-B., Gallipoli, D., Reddy, B.V.V. (Eds.), 2022. Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials and Elements: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 274-TCE, RILEM State-of-the-Art Reports. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1>
- Guillaud, H., Houben, H., CRAterre, Dethier, J., 2006. *Traité de construction en terre*. Parenthèses Editions.
- Habert, G., Miller, S.A., John, V.M., Provis, J.L., Favier, A., Horvath, A., Scrivener, K.L., 2020. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nat Rev Earth Environ* 1, 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc), 2023a. *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1st ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Intergovernmental Panel On Climate Change (Ippc), 2023b. *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1st ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
- Joint Research Centre (European Commission), Cristóbal García, J., Caro, D., Foster, G., Pristerà, G., Gallo, F., Tonini, D., 2023. *Techno-economic and environmental assessment of construction and demolition waste management in the European Union: status quo and prospective potential*. Publications Office of the European Union.
- Jounin, N., 2014. *Chantier interdit au public: Enquête parmi les travailleurs du bâtiment*. La Découverte.
- Loccarini, F., Ranocchiai, G., Rotunno, T., Fagone, M., 2020. Experimental and numerical analyses of strengthened rammed earth masonry arches. *Computers & Structures* 239, 106329. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106329>
- Mesbah, A., Morel, J.-C., Olivier, M., 1999. Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents. *Mat. Struct.* 32, 687–694. <https://doi.org/10.1007/BF02481707>
- Miccoli, L., Oliveira, D.V., Silva, R.A., Müller, U., Schueremans, L., 2015. Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling. *Mater Struct* 48, 3443–3456. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0411-7>
- Morel, J.-C., Charef, R., Hamard, E., Fabbri, A., Beckett, C., Bui, Q.-B., 2021. Earth as construction material in the circular economy context: practitioner perspectives on barriers to overcome. *Phil. Trans. R. Soc. B* 376, 20200182. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0182>
- Narayanaswamy, A.H., 2016. Mechanical testing procedure for local building materials: rammed earth and laterite building stones.

- Olivier, M., Mesbah, M.A., 1995. LABORATORY TESTS FOR COMPACTED SOILS ESSAIS DE LABORATOIRE POUR LES SOLS COMPACTÉS.
- Pelé-Peltier, A., 2023. Toward situated civil engineering: the case of earth construction. ENTPE.
- Pelé-Peltier, A., Fabbri, A., Morel, J.-C., Hamard, E., Lhenry, M., 2022. A similitude relation to assessing the compressive strength of rammed earth from scale-down samples. *Case Studies in Construction Materials* 16, e00921. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00921>
- Poullain, P., Barnaure, M., Bonnet, S., 2023. Mechanical properties of cob-earth composites: Variability and focus on the different calculation methods of Young's modulus. *Journal of Building Engineering* 72, 106622. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106622>
- Rocco, C., Guinea, G.V., Planas, J., Elices, M., 1999. Size effect and boundary conditions in the Brazilian test: Experimental verification. *Mat. Struct.* 32, 210–217. <https://doi.org/10.1007/BF02481517>
- Röck, M., Saade, M.R.M., Balouktsi, M., Rasmussen, F.N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., Passer, A., 2020. Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy* 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
- Rojat, F., Hamard, E., Fabbri, A., Carnus, B., McGregor, F., 2020. Towards an easy decision tool to assess soil suitability for earth building. *Construction and Building Materials* 257, 119544. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119544>
- Sellier, A., Casaux-Ginestet, G., Buffo-Lacarrière, L., Bourbon, X., 2013. Orthotropic damage coupled with localized crack reclosure processing. Part I: Constitutive laws. *Engineering Fracture Mechanics* 97, 148–167. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.10.012>
- Torres, A., Brandt, J., Lear, K., Liu, J., 2017. A looming tragedy of the sand commons. *Science* 357, 970–971. <https://doi.org/10.1126/science.aao0503>
- UNEP, 2022. Global Status Report for Buildings and Construction. Global Alliance for Buildings and Construction.
- Villain, V., 2020. Sociologie du champ de la construction en terre crue en France (1970-2020).