

Analyse de l'influence de la teneur en eau et des agrégats végétaux sur le phénomène de retrait dans des blocs de terre crue

Imane Gharbage ¹, Ferhat Benmahiddine ¹, Nassim Sebaibi ¹

¹ Builders Lab, Builders Ecole d'Ingénieurs, ComUE NU, 1 rue Pierre et Marie Curie, 14610, Epron, France

RESUME

Loin d'être un matériau du passé, la terre crue s'aligne avec les enjeux du développement durable actuels. C'est un matériau localement disponible et réutilisable, assurant un confort hygrothermique optimal, présentant ainsi une faible empreinte environnementale et énergétique. Ces avantages s'accompagnent par certaines limitations liées essentiellement aux performances techniques. Parmi ces limites au développement de la construction en terre, le phénomène du retrait est identifié comme un point crucial. Ainsi, des investigations approfondies de ce phénomène sont requises afin de développer des techniques de construction visant à minimiser ses effets. Cet article vise à analyser l'effet de la teneur en eau et de la paille de blé sur le phénomène du retrait caractérisant la terre crue. Les différents résultats montrent une augmentation du retrait linéaire avec la teneur en eau a été observé. En revanche, l'incorporation de la paille de blé a montré un effet favorable, permettant ainsi une réduction du retrait longitudinal et latéral respectivement d'environ 70% et 100%.

Mots-clefs Matériaux géosourcés ; Paille de blé ; Résistance à la compression ; Retrait

Key-words Earthen materials ; Wheat straw ; Compressive strength ; Shrinkage

I. INTRODUCTION

La construction a un impact majeur sur l'environnement et l'équilibre écologique en raison de sa forte consommation de ressources naturelles telles que le sable, l'acier, l'aluminium et l'eau. Les activités de construction engendrent également d'importantes émissions de gaz à effet de serre et une production conséquente de déchets non dangereux. En 2022, le secteur de la construction représentait environ un quart des émissions mondiales de CO₂ et absorbait près de 30 % de la consommation énergétique finale à l'échelle mondiale (Energy System IEA, 2023). La prise en conscience des enjeux environnementaux et énergétiques actuels du domaine de la construction conduisent à mettre l'accent sur les matériaux verts qui permettent de réduire les impacts énergétiques et environnementaux en assurant un confort hygrothermique, acoustique et une bonne qualité de l'air intérieur. Cela inclut notamment l'utilisation des matériaux biosourcés et géosourcés. Cet intérêt vers la construction en terre a suscité l'attention de nombreux chercheurs, notamment sur le retrait de la terre crue. La mesure du phénomène du retrait de la terre crue est l'un des paramètres les plus importants pour évaluer le comportement et les performances d'une construction en terre crue. La terre crue, contenant de l'argile, gonfle au contact de l'eau et rétrécit au séchage. Dans les deux cas, des déformations se produisent, d'où l'importance du contrôle du

gonflement/retrait de la terre. Ainsi, la gravité de ce phénomène dépend principalement de la teneur en argile (distribution granulométrique), du type de l'argile et de la teneur en eau/humidité (Hall & Djerbib, 2004; Hamard et al., 2013; Mkaouar et al., 2019; Quagliarini & Lenci, 2010; Smith' & Austin, 1996). En effet, en présence de certains minéraux argileux tels que les smectites, un gonflement important se produit lors de l'absorption d'eau pendant la préparation du mélange, suivi de retrait excessifs lorsque la terre sèche. Cette réaction est principalement dû à la grande capacité d'échange ionique et la surface spécifique de certaines argiles gonflantes (BERGAYA et al., 2011; Wagner, 2013). Par conséquent, une grande attention a été accordée à la détermination expérimentale de ce paramètre. Plusieurs méthodes expérimentales existent pour évaluer le retrait de la terre crue. Parmi les approches les plus couramment utilisées figure le suivi du retrait linéaire de la terre crue dans des moules rectangulaires. Cette méthode implique le suivi du retrait d'un échantillon en terre sur sa longueur et sa largeur dans le temps jusqu'à sa stabilisation (NZS 4298, 1998). Différents normes guides et recherches (Cycle Terre, 2021; GBPCT, 2018; NZS 4298, 1998; RIGASSI, 1995; Standards Australia, 2002) ont établi les limites maximales acceptables de retrait pour la construction en terre crue, tel que présenté dans le Tableau 1.

TABLEAU 1. Le retrait linéaire accessible selon plusieurs références.

Retrait linéaire maximal accessible	Référence
0.05%	(NZS 4298, 1998)
2.5%	(Standards Australia, 2002)
0,5 mm/m	(Cycle Terre, 2021)
5 mm/m	(GBPCT, 2018)
1%	(RIGASSI, 1995)

Plusieurs études recommandent l'incorporation des granulats végétaux dans les matériaux à base de terre crue. Cette pratique permet de minimiser les phénomènes de gonflement/retrait excessifs de l'argile après le séchage. Dans ces études, le retrait de la terre renforcée est mesuré avant et après le séchage complet. Les résultats ont pu montrer que différents granulats végétaux notamment les fibres de canne à sucre, de coco, de palmier [13], la paille d'orge (Bouhicha et al., 2005), les fibres de jute (Zardari et al., n.d.), de bambou et sisal (Ghavami et al., 1999; Hamard et al., 2013), le roseau et les fibres de lin (Azil, 2022) ou encore le foin de blé (Mohamed, 2013a), réduisent le pourcentage de retrait linéaire. Danso, Humphrey, et al. (Danso et al., 2015) ont étudié le retrait linéaire de blocs de terre renforcé avec 0.25, 0.5, 0.75 et 1% de fibres de coco, de palmier ou encore de canne à sucre en mesurant la longueur de l'échantillon à l'aide d'un comparateur avant et après le séchage. Les résultats ont indiqué que le retrait linéaire des blocs de sol diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres. L'incorporation de 1% de fibre de canne à sucre ou de coco a permis de réduire le retrait de 53% par rapport à la référence (0% de fibres). D'autre part, l'incorporation de 1% de fibres de palmier a réduit le retrait de 61%. Ces résultats ont été expliqués par la capacité des fibres à s'opposer à la déformation de la matrice du sol par frottement. Cet effet a été également confirmé par Bouhicha et al., 2005 qui ont étudié l'effet du temps de séchage et de la paille d'orge sur le retrait linéaire et volumique de la terre crue. Cette étude a montré que le retrait augmente avec le temps pour tous les sols à mesure que le séchage augmente. Cependant, ce phénomène diminue avec l'augmentation du taux de renforcement. Par ailleurs, le retrait s'est stabilisé plus rapidement dans les échantillons renforcés car la paille accélère l'évaporation par les canaux d'air qu'elle forme. Toutefois, il a été démontré que l'utilisation excessive de granulats végétaux peut provoquer un

retrait accru (Demir, 2006). Demir, 2006 a attribué ce résultat à la forte capacité d'absorption d'eau des granulats végétaux qui augmente la teneur en eau requise pour obtenir le mélange optimal. Cette augmentation de la teneur en eau favorise ainsi le retrait du mélange comme le confirme plusieurs études antérieures (Mkaouar et al., 2019). Par exemple, Mkaouar et al., 2019 ont analysé le retrait volumétrique de huit formulations différentes en faisant varier la teneur en eau : 70% de sable et 30% d'argile avec des proportions d'eau variant de 8% à 22%. Les résultats de cette étude ont montré que l'augmentation de la teneur en eau engendrait une perte de masse accrue, favorisant ainsi le retrait. Le pourcentage de retrait est passé donc de 3.39% à 4.68% pour des teneurs en eau respectives de 8% et 22%.

Ainsi, il est essentiel d'évaluer les caractéristiques de retrait d'un sol et de les intégrer dans la conception pour répondre aux besoins de service de la structure prévue afin de prendre en compte les éventuelles variations dimensionnelles et tassement durant la durée de vie d'un bâtiment en terre crue. En analysant l'effet de la teneur en eau et de la paille de blé sur le retrait de la terre crue, cette recherche avait pour objectif d'enrichir la base de données existante sur différents granulats naturels utilisés pour le renforcement de la terre à travers la mesure du retrait de la terre crue. Parallèlement, elle offre des perspectives sur la faisabilité et les avantages de l'utilisation des sous-produits agricoles pour la construction durable.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux

Dans ce travail, la terre issue du chantier du Grand Paris Express en Île-de-France et la paille de blé normande, ont été utilisées. La granulométrie et la plasticité de cette terre ont été évaluées afin de classer ce matériau. La distribution granulométrique obtenue par tamisage par voie humide et sédimentation conformément à la norme (NF EN ISO 17892-4, 2018), est présentée dans la Fig. 1. Les propriétés de plasticité de la fraction fine ont été évaluées en se basant sur les limites d'Atterberg et la valeur de bleu de méthylène conformément aux normes (NF EN 17542-3, 2022; NF EN 17892-12, 2018), respectivement. Pour assurer une bonne répétabilité des résultats, trois mesures ont été effectuées pour chaque essai. Le Tableau 2 récapitule les différentes propriétés de la terre étudiée. D'après les résultats de cette caractérisation et selon la classification L.C.P.C / U.S.C.S, la terre étudiée est une terre argileuse.

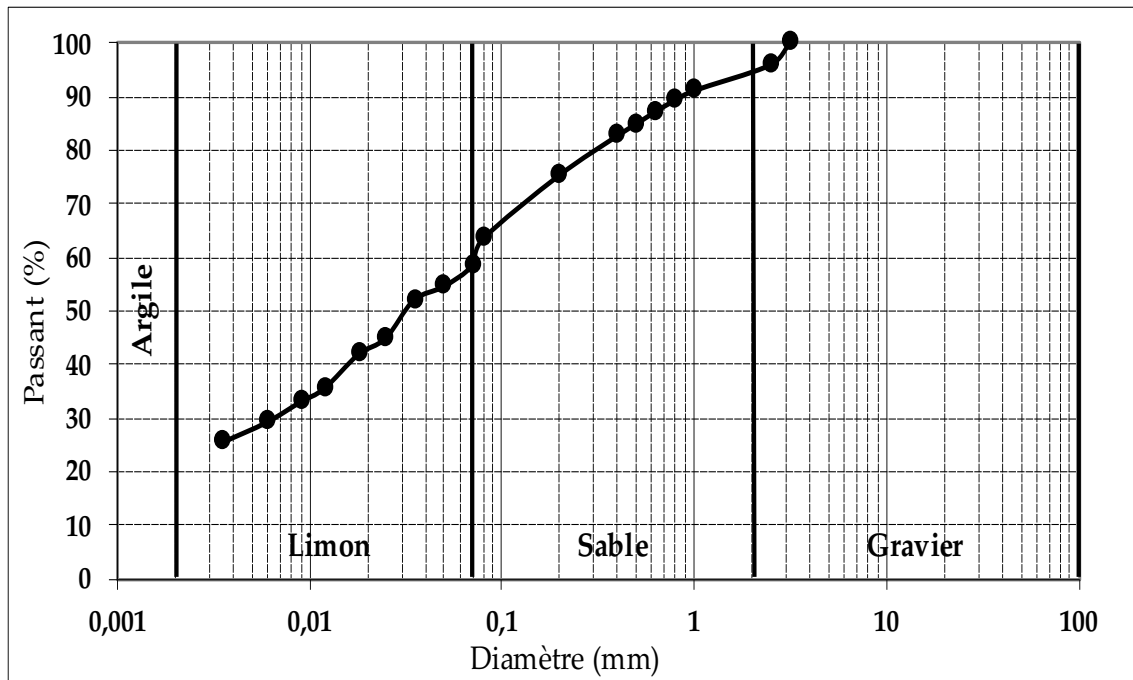


FIGURE 1. Distribution granulométrique de la terre étudiée.

TABLEAU 2. Les propriétés de la terre étudiée.

Nature de la terre	Terre argileuse	
Limites d'Atterberg	Limite de liquidité (Wl %)	35 ±1
	Indice de plasticité (Ip %)	12 ±2
Valeur de bleu de méthylène	VBSsol (g/100g)	2.78 ±0.13

Concernant les granulats végétaux, la paille de blé a été broyée avec un broyeur à couteaux. Les dimensions de granulats variaient entre 1 et 3 cm tels que présenté dans la Fig. 2.



FIGURE 2. Paille de blé broyée.

Dans le cadre de cette étude, dix formulations à base de terre crue renforcée ou non avec la paille de blé ont été étudiées. Les formulations sont résumées dans le Tableau 3.

TABLEAU 3. Les différentes formulations des matériaux étudiés.

Formulations	Pourcentage massique par rapport à la masse totale de sol utilisée	
	Paille de blé (%)	Teneur en eau (%)
Ref-20W	-	20
Ref-22W	-	22
Ref-24W	-	24
Ref-26W	-	26
Ref-28W	-	28
Ref-30W	-	30
1PB-30W	1	30
2PB-30W	2	30
3PB-30W	3	30
4PB-30W	4	30

B. Méthodes de caractérisation

Le phénomène de retrait concerne principalement la fraction fine de la terre. Pour cela, la terre étudiée a été tamisée préalablement à 80 μm afin d'amplifier l'effet du retrait et de mieux mettre en évidence l'effet des granulats végétaux sur ce phénomène. Les mélanges ont été préparés manuellement en ajoutant progressivement la paille de blé jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène. Ils ont été ensuite compactés dans des moules de 16x4x4 cm. Le phénomène de retrait est un processus qui prend beaucoup de temps. Afin d'accélérer l'observation du retrait des échantillons, les éprouvettes ont été séchées à 40°C jusqu'à dessiccation. Enfin, le retrait linéaire a été mesuré sur la longueur (l) et la largeur (L) des échantillons tout au long de leur processus de séchage jusqu'à la stabilisation du retrait, à l'aide d'un pied à coulisse, tel que présenté sur la Fig.3. Il est important de souligner que la méthode de mesure du retrait linéaire avec un pied à coulisse est une méthode courante et largement utilisée. Cependant, elle reste une méthode très sensible et dépendante de l'utilisateur, ce qui entraîne une incertitude qui peut parfois être significative. Pour assurer une bonne répétabilité des résultats, trois éprouvettes ont été fabriquées pour chaque formulation et les mesures de retrait ont été répétées plusieurs fois afin de minimiser les erreurs de lecture.

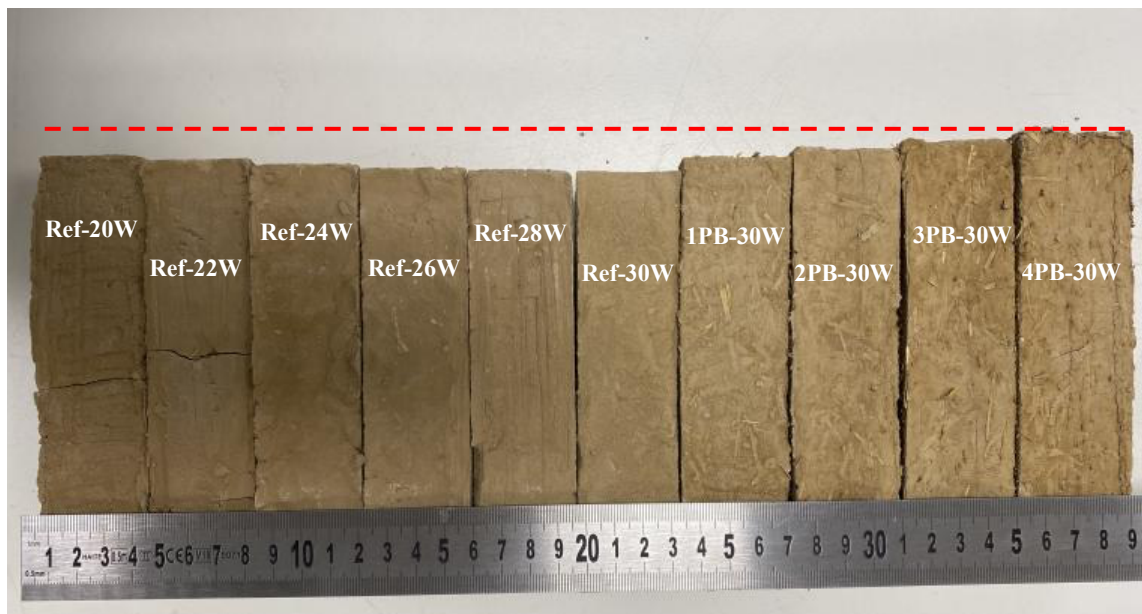


FIGURE 3. Echantillons étudiés, de Ref-20W à gauche à 4PB-30W à droite.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Retrait

L'évolution du retrait linéaire en fonction de la teneur en eau et de la teneur en paille de blé est présentée dans la Fig.4 et la Fig. 5, respectivement. Un écart type minimal de 0.05% a été calculé pour un retrait de 1.60% (correspondant à la formulation Ref-28W) et un écart type maximal de 1,96% a été calculé pour un retrait de 6.16% (correspondant à la formulation Ref-24W). Pour éviter d'encombrer les graphiques, les barres d'erreurs n'ont pas été présentées. Sur la base de ces résultats, il a été constaté que l'évolution du retrait dépend à la fois de la teneur en eau et de la

teneur en paille de blé. En effet, la Fig. 4a et la Fig. 4b montrent une augmentation du retrait longitudinal et latéral, respectivement, avec l'augmentation de la teneur en eau. Cependant ce phénomène de retrait diminue avec la teneur en paille de blé, comme illustré dans la Fig. 5a et la Fig. 5b.

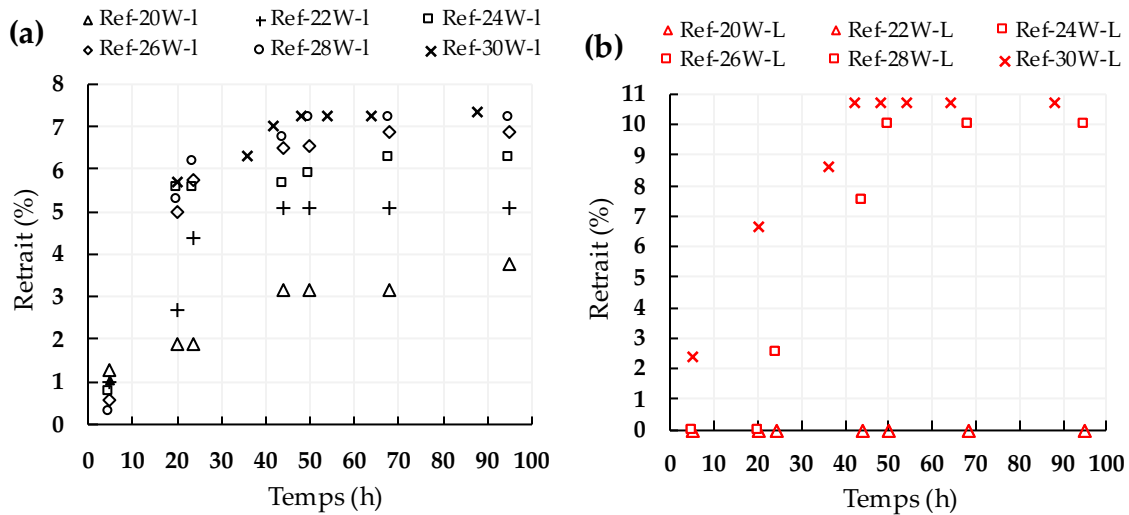


FIGURE 4. Evolution du retrait longitudinal (a) et latéral (b), dans le temps, en fonction de la teneur en eau.

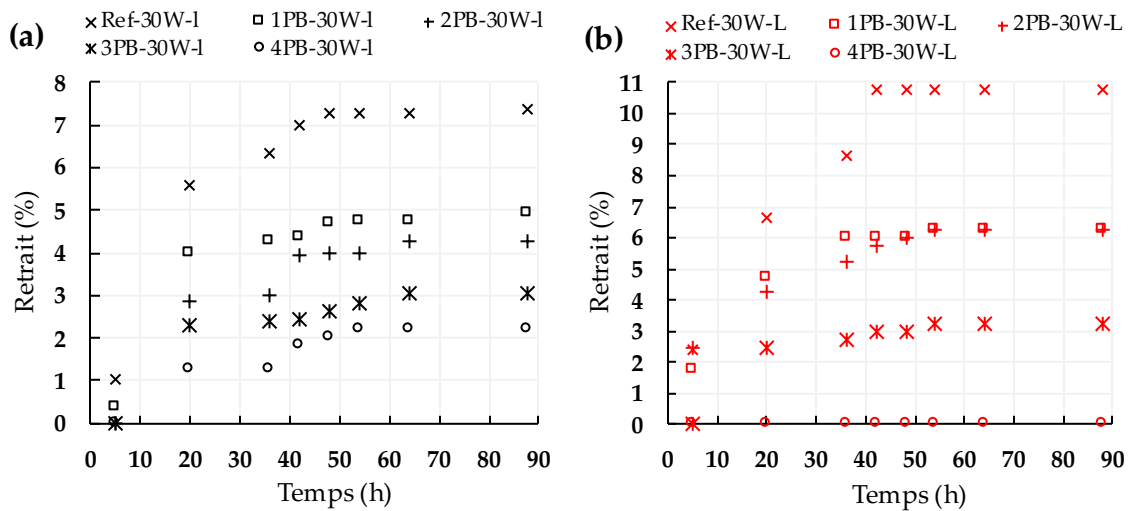


FIGURE 5. Evolution du retrait longitudinal (a) et latéral (b), dans le temps, en fonction de la teneur en paille de blé.

Après stabilisation, le retrait longitudinal et latéral varie de 2% à 7% et de 0% à 11%, respectivement. Le retrait longitudinal maximal obtenue, 7%, correspond à l'échantillon Ref-30W qui contient la teneur en eau la plus élevée. Ce pourcentage représente une augmentation de 18% par rapport à la référence Ref-24W, contenant la teneur en eau plastique de la terre. Ces résultats peuvent s'expliquer par la capacité d'absorption d'eau de la terre, et son évaporation pendant le séchage. Cela dépend principalement du type et de la quantité des argiles dans la terre. En effet, en présence des argiles gonflantes tels que la montmorillonite et la bentonite, un gonflement important se produit pendant la formulation, suivi d'un retrait significatif lors du séchage. Concernant les

échantillons renforcés avec 1%, 2%, 3% et 4% de paille de blé, une diminution du retrait longitudinal de 32%, 40%, 58% et 70%, respectivement, par rapport à Ref-30W, a été constatée. De plus, 4% de paille de blé a permis d'empêcher le retrait latéral. Ainsi, la formulation 4PB-30W respecte la limite supérieure de retrait (2.5%) exigée par les standards australiens (Standards Australia, 2002). Ces observations s'alignent avec les conclusions antérieures sur l'influence des granulats végétaux sur le retrait de la terre crue (Danso et al., 2015; Ghavami et al., 1999; Mkaouar et al., 2019; Mohamed, 2013b). Ces effets s'expliquent par les caractéristiques des granulats végétaux. En effet, la capacité des granulats végétaux à s'opposer à la déformation de la matrice du sol par frottement diminue le gonflement/retrait de la terre. Parallèlement, leur grande capacité d'absorption d'eau va leur permettre d'absorber l'eau du mélange et le libérer directement, à travers leurs pores.

VI. CONCLUSION

La présente étude visait à évaluer l'effet de la teneur en eau et de la quantité de paille de blé sur le retrait linéaire de la terre crue. Les résultats mettent en évidence les conclusions suivantes :

- Le retrait linéaire des échantillons de terre crue est proportionnel à la teneur en eau initiale pendant la préparation du mélange. Un retrait maximal, longitudinal et latéral, de 7.36% et 10.75% ont été obtenus sur l'échantillon formulé avec la teneur en eau la plus élevée, à savoir Ref-30W.
- L'incorporation de la paille de blé conduit à une amélioration significative du retrait de la terre crue. L'ajout de 4% de paille de blé (4PB-30W) a entraîné une diminution du retrait longitudinal et latéral de 70% et 100%, respectivement, par rapport à la référence, formulée avec la teneur en eau la plus élevée (Ref-30W).

Cette étude a permis donc de mettre en évidence, d'une part, l'importance de formuler des blocs de terre crue avec une teneur en eau optimale permettant de minimiser le phénomène de retrait, et d'autre part, l'effet positif de l'incorporation de la paille de blé sur le retrait de la terre crue, soulignant ainsi le potentiel de l'incorporation des granulats végétaux dans la terre crue.

REFERENCES

- Azil, A. (2022). *Etude des performances mécanique et hygrothermique des matériaux en terre et fibre végétale : application dans un bâtiment pilote*.
- BERGAYA, F., JABER, M., & LAMBERT, J. (2011). Clays and clay minerals. *Rubber-Clay Nanocomposites: Science, Technology, and Applications*, 1–44.
- Bouhicha, M., Aouissi, F., & Kenai, S. (2005). Performance of composite soil reinforced with barley straw. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 617–621.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.013>
- Cycle Terre. (2021). *Guide de conception et de construction* (Sophie Bioul, amàco, Vol. 01).
- Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M., & Williams, J. B. (2015). Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres. *Construction and Building Materials*, 101, 797–809. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.069>
- Demir, I. (2006). An investigation on the production of construction brick with processed waste tea. *Building and Environment*, 41(9), 1274–1278.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.05.004>
- Energy System IEA. (2023). <https://www.iea.org/energy-system/buildings> (accessed September 09, 2023).

- GBPCT. (2018). *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue* (13 décembre 2018).
- Ghavami, K., Toledo Filho, R. D., & Barbosa, N. P. (1999). Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and Concrete Composites*, 21(1), 39–48. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00033-X)
- Hall, M., & Djerbib, Y. (2004). Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. *Construction and Building Materials*, 18(4), 281–286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.11.001>
- Hamard, E., Morel, J.-C., Salgado, F., Marcom, A., & Meunier, N. (2013). A procedure to assess the suitability of plaster to protect vernacular earthen architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 14(2), 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.04.005>
- Mkaouar, S., Maherzi, W., Pizette, P., Zaitan, H., & Benzina, M. (2019). A comparative study of natural Tunisian clay types in the formulation of compacted earth blocks. *Journal of African Earth Sciences*, 160, 103620. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103620>
- Mohamed, A. E. M. K. (2013a). Improvement of swelling clay properties using hay fibers. *Construction and Building Materials*, 38, 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.031>
- Mohamed, A. E. M. K. (2013b). Improvement of swelling clay properties using hay fibers. *Construction and Building Materials*, 38, 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.031>
- NF EN 17542-3. (2022). *Terrassements - Essais géotechniques en laboratoire - Partie 3 : Valeur de bleu de méthylène VBS d'un sol ou d'une roche*.
- NF EN 17892-12. (2018). *Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : détermination des limites de liquidité et de plasticité*.
- NF EN ISO 17892-4. (2018). *Reconnaissance et essais géotechniques — Essais de laboratoire sur les sols — Partie 4 : Détermination de la distribution granulométrie des particules*.
- NZS 4298. (1998). *Materials and Workmanship for Earth Buildings. Standard New Zealand*.
- Quagliarini, E., & Lenci, S. (2010). The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. *Journal of Cultural Heritage*, 11(3), 309–314. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.11.012>
- RIGASSI, V. (1995). *Compressed earth blocks-Volume 1: Manual of production*. A Publication of the Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien-GATE in: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH in coordination with BASIN.
- Smith', E. W., & Austin, G. S. (1996). *New Mexico Bureau of Mines & Mineral Resources Adobe, pressed-earth, and rammed-earth industries in New Mexico (revised edition)* (Vol. 537).
- Standards Australia. (2002). *The Australian Earth Building Handbook*.
- Wagner, J.-F. (2013). *Mechanical Properties of Clays and Clay Minerals* (pp. 347–381). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00011-0>
- Zardari, M. A., Lakho, A., & Amur, M. A. (n.d.). *Structural behaviour of large size compressed earth blocks stabilized with jute fiber*.