

Effet de la formulation d'un béton de terre crue coulée sur le couplage ténacité-résistance mécanique

Atmane KATTI^{1,2}, Saber IMANZADEH^{1,2}, Armelle JARNO², Tariq OUAHBI², Said TAIBI², Eduardo SUZA DE CURSI¹

¹INSA Rouen Normandie, Normandie Univ, LMN UR 3828, F-76000, Rouen, France

²Normandie Université, UNIHAVRE, Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, UMR 6294

RESUME : L'impact environnemental des modes de construction actuels, très énergivore et consommateurs de matières ultra-transformées, issues de processus industriels, engendre un coût écologique et sociétal considérable. Cela encourage l'utilisation de matériaux biosourcés et géo-sourcés, comme la terre crue, qui a l'avantage d'être abondante, facilement accessible, nécessitant peu ou pas de transport. Mélangée à des fibres, la terre crue permet d'avoir des propriétés mécaniques nécessaires pour la construction de bâtiments du quotidien. L'un des atouts du béton de terre crue coulée est qu'il ne requiert ni le développement d'un nouveau processus industriel pour sa fabrication, ni la mise en place d'une logistique spécifique. Cette technique de construction s'appuie sur les technologies et ressources existantes utilisées pour la production des bétons traditionnels ou cimentaires. La principale différence réside dans la composition du mélange : les amendements granulaires nobles, tels que le sable et le gravier, sont remplacés par de la terre crue, avec l'ajout d'additifs et des fibres végétales pour le renforcement. Bien que le béton de terre crue coulée ne permette pas d'atteindre les niveaux de résistance du béton traditionnel, il constitue une alternative intéressante pour la construction de bâtiments peu élevés mais qui profitent des propriétés hygro-thermiques de la terre crue locale [Hamrouni et al., 2023]. L'objet de l'étude est d'étudier l'influence de la formulation d'un béton de terre coulée stabilisé sur certaines de ses propriétés mécaniques. On se focalise sur la relation entre résistance à la compression et ténacité de ce matériau.

Mots-clés : Béton de terre crue coulée, ténacité, résistance à la compression simple, formulation.

I. INTRODUCTION

Les modes de construction actuels ont un impact environnemental non négligeable. En effet, ils sont très énergivores et reposent sur l'utilisation massive de matériaux ultra-transformés, fabriqués à l'aide de processus industriels complexes. Cette dépendance aux matériaux transformés engendre un coût écologique élevé, en raison de l'extraction intensive des ressources naturelles, de la consommation d'énergie fossile pour leur fabrication et leur transport, ainsi que des émissions de gaz à effet de serre associées. De plus, ces pratiques entraînent des conséquences sociétales importantes, notamment en termes de dépendance à des industries lourdes et de l'impact sur la santé publique.

Face à ces enjeux, l'utilisation de matériaux biosourcés et géo-sourcés se présente comme une alternative durable et responsable [Perrot et al., 2024]. En particulier, ceux issus de sources renouvelables ou disponibles naturellement sur site, permettent de réduire l'empreinte carbone du secteur de la construction avec une diminution de l'utilisation des liants hydrauliques [Delgado et al., 2006]. Parmi eux, la terre crue se distingue par ses nombreux avantages : elle est abondante,

facilement accessible et ne nécessite que très peu de transformation, limitant ainsi la consommation d'énergie et les émissions polluantes. De plus, la terre crue possède d'excellentes propriétés thermiques et hygrométriques, contribuant au confort des bâtiments tout en réduisant les besoins en chauffage et en climatisation [Hamrouni et al., 2024 et Jalili et al., 2024].

Le béton de terre crue coulée présente une résistance à la compression simple bien inférieur à celle du béton de ciment traditionnel, en raison du procédé de mise en œuvre, qui repose uniquement sur la vibration matériau. Il est donc important d'optimiser sa formulation, notamment en minimisant l'ajout de liant minéraux [Imanzadeh et al., 2018] et en s'appuyant sur l'analyse de ses propriétés mécaniques.

Alors que la résistance à la compression simple mesure la capacité d'un matériau à supporter une force de compression sans rompre, la ténacité évalue sa résistance à la propagation d'une fissure. Elle indique ainsi sa capacité à absorber de l'énergie et à se déformer plastiquement avant de céder. La ténacité est estimée par différents essais normalisés, choisis en fonction du type de matériau. Parmi eux, on peut citer l'essai de traction ou de flexion, utilisant des éprouvettes entaillées ou bien encore les essais Charpy ou Izod, où l'estimation de la ténacité est en lien avec la résistance du matériau à des chocs. Dans le cas de la terre, la littérature est peu fournie sur ce sujet. Bien que l'essai de compression simple ne soit pas spécifiquement conçu pour évaluer la ténacité, il permet d'observer la propagation des fissures. Nous estimons ainsi la ténacité axiale à travers cet essai pour différentes formulations d'un matériau de terre crue coulée et la mettons en lien avec la résistance à la compression du matériau.

II. Matériaux et méthodes

Cette étude porte sur l'analyse des résultats expérimentaux de A. Hibouche [Hibouche, 2013] concernant un béton de terre coulée étudié en compression sur ses propriétés mécaniques, notamment sa résistance [Imanzadeh et al., 2018] et sa ténacité [Shamas et al., 2023] en les analysant conjointement. L'intérêt de faire une relecture des résultats avec cette approche consiste à renseigner les constructeurs sur la maîtrise d'un paramètre supplémentaire nous permettant de décrire le comportement mécanique du béton de terre crue coulée.

A. Matériaux

Dans cette étude, la terre utilisée pour la fabrication du béton de terre crue coulée est du limon-sableux (SM) selon la classification LPC-USCS [ASTM D2487-11]. Ce matériau provient des travaux de terrassement d'un site de construction situé en région de Normandie [Kanema et al., 2016].

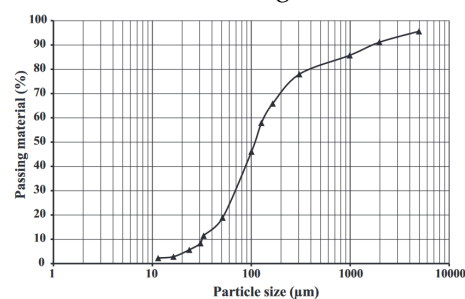


FIGURE 1. Courbe granulométrique du limon utilisé, [Imanzadeh et al., 2018]

Selon la figure 1, la terre est composée de sable (< 2 mm) avec une teneur de 67 %, suivie par 25 % de limon et 8 % de gravier. Ce matériau présente ainsi une large distribution granulométrique.

Pour la fabrication des éprouvettes de béton de terre crue coulée, la terre est mélangée à des liants tels que la chaux vive calcique CL 90-Q (R5, P3) selon la norme EN 459-1, du ciment CEM I 52.5 N [Kouta et al., 2021], et des fibres végétales de lin, abondantes en région Normande [Eid et al., 2015]. Ces fibres, d'un diamètre de 10 à 15 μm et d'une longueur comprise entre 50 et 70, sont incorporées avec de l'eau.

Le domaine expérimental représentant le pourcentage des constituants des différentes formulations est présenté dans le tableau 1 ci-dessous.

TABLEAU 1. Limite de teneur des constituants dans les mélanges

Constituant	Limite bas (%)	Limite haut (%)
Fibres	0.3	0.45
Chaux	0	12
Ciment	4	16
Eau	20	25
Limon	47	75

B. Préparation des mélanges

Pour la préparation des éprouvettes cylindriques de 50 mm de diamètre et de 100 mm de hauteur, un malaxage à sec de deux minutes est réalisé avec la terre, la chaux et du ciment, suivi d'un malaxage de trois minutes avec l'ajout de l'eau. La pâte homogène est ensuite coulée par gravité dans les moules et vibrée à l'aide d'une table vibrante pendant deux minutes. Les échantillons sont stockés dans des conditions de laboratoire à une température de 22°C et une humidité de 50 %. Toutes les formulations produites sont répertoriées dans le tableau 2 ci-dessous.

TABLEAU 2. Formulation des mélanges

Formulation	Fibres	Chaux	Ciment	Eau	Limon
1	0,3	0	16	22,39	61,31
2	0,3	3,3	4	25	67,4
3	0,3	0	4	22,9	72,8
4	0,45	0	4	22,87	72,68
5	0,3	0	4	23,45	72,25
6	0,45	0	4	23,42	72,13
7	0,3	0	16	22,95	60,75
8	0,45	0	16	22,92	60,63
9	0,45	3,3	8,81	25	62,44
10	0,3	3,3	10,4	25	61
11	0,45	3,3	10,32	25	60,93
12	0,45	0	12	22,53	65,02
13	0,45	0	16	22,55	0,61
14	0,4	0	16	22,37	61,23
15	0,3	2,37	13,63	23,26	60,44

16	0,45	3,3	4	25	67,25
17	0,45	3,3	4	24,29	67,96
18	0,45	3,3	11,21	24,12	60,92
19	0,35	3,3	4	25	67,35
20	0,35	3,3	8,87	25	62,48
21	0,38	0	10	22,91	66,72
22	0,3	2,99	8,41	23,96	64,33
23	0,38	2,61	8,59	24,09	64,33
24	0,38	3,2	12,8	23,83	59,8
25	0,38	3,01	8,4	23,95	64,26
26	0,38	3,01	8,4	23,95	64,26
27	0,38	3,01	8,4	23,95	64,26

C. Résistance à la compression simple et ténacité

Après un temps de cure de 90 jours, les éprouvettes sont soumises à un test de compression simple conformément aux normes NF P94-420, NF P94-425, à l'aide d'une presse de 100 kN avec un pas de 0.1 mm/min. Les résultats des tests sont reportés sur une courbe contrainte-déformation (figure 2 (a) et (b)) pour chaque éprouvette, mettant en évidence les paramètres suivants : Le point de pic de contrainte de compression simple (*Peak stress*), la pente maximale de la zone linéaire (*Slope*), et le point correspondant à une contrainte seuil fixée à 85% de la valeur au pic pour le matériau utilisé [Imanzadeh et al., 2020], représentative de la contrainte ultime (*Ultimate stress*) définie pour les matériaux conventionnels.

En effet pour les matériaux ductiles à base de terre, notamment ceux renforcés avec des fibres végétales, il est difficile de définir la contrainte correspondant à la rupture du matériau. La solution retenue consiste à définir un seuil commun représentatif du comportement post-pic.

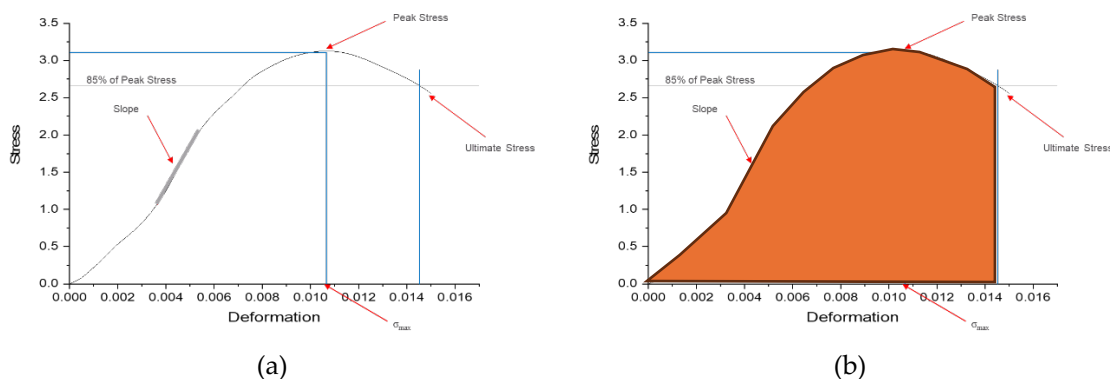
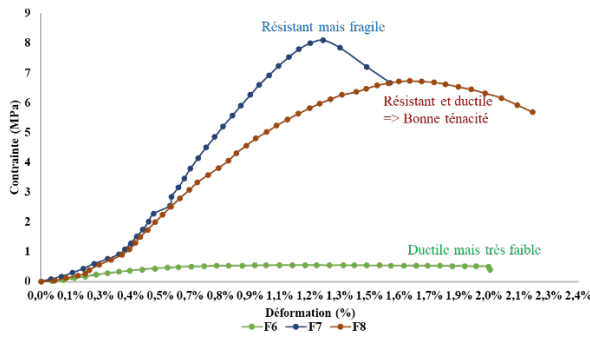


FIGURE 2. (a) Courbe contrainte (kPa) – déformation type, (b) Aire sous la courbe contrainte (kPa) – déformation.

Concernant la ténacité, elle représente la quantité d'énergie (J/m^3) qu'un matériau peut absorber avant de rompre. Dans notre cas, elle correspond au calcul de l'aire sous la courbe contrainte - déformation des éprouvettes (figure 2 (b)).

La courbe contrainte-déformation pour 3 formulations F6, F7 et F8 (Tableau 3), représentatives des différents types de comportement observés, est présentée en figure 3. Le matériau peut être très résistant mais relativement fragile (Formulation F 7), résistant et ductile (Formulation F 8) ou encore ductile et non résistant (Formulation F 6). Il est à noter que, pour le matériau fibré contenant peu de liant minéraux (4%, F 6), le mode de rupture est différent avec un affaissement du matériau sans rupture et sans gain de résistance.



Formulation	Fibres (%)	Ciment (%)	Eau (%)	Limons (%)
6	0.45	4	23	72
7	0.30	16	22.9	60
8	0.45	16	22.9	60

FIGURE 3. Exemple de couplage contrainte-ténacité dans trois formulation F6, F7 et F8.

TABLEAU 3. Pourcentage des constituants des formulation F6, F7 et F8.

III. Analyse des résultats

A. Effet des constituants sur la ténacité absolue (T)

Des études rapportées par [Hibouche, 2013] et [Al-Mukhtar et al., 2014], précisent l’intervalle d’efficacité des réactions chimiques de la chaux entre [3 – 4 %], au-delà duquel le comportement de ce constituant est assimilé à celui de fines particules granulaires. Dans cette étude, la limite supérieure de la chaux est fixée à 3,3 %. L’excédent est ajouté au limon.

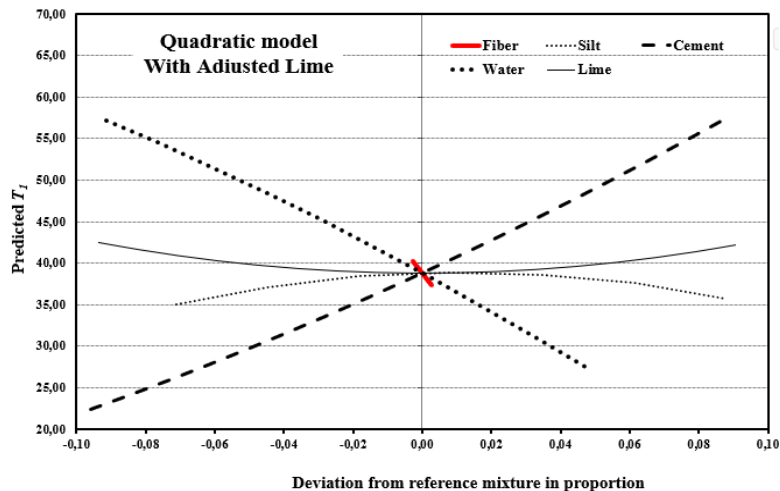


FIGURE 4. Effet des constituants sur la ténacité absolue T [kJ/m³].

A l'aide de la méthode des plans d'expériences, les résultats expérimentaux ont été analysés. Un modèle quadratique, validé par une analyse de la variance (ANOVA), a été défini pour estimer la ténacité. L'effet des constituants a été étudié pour un mélange de référence (Formulation $F 10 = 0,3 \% \text{ Fibres} + 3,3 \% \text{ Chaux} + 10,4 \% \text{ Ciment} + 25 \% \text{ Eau} + 61 \% \text{ Limon}$), dont la ténacité moyenne représentée en figure 4, est de $39,45 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$. On observe que l'ajout d'une petite quantité de ciment dans le mélange tend à augmenter sa ténacité, tandis qu'un ajout relatif d'eau tend à la réduire.

B. Ténacité absolue (T) en fonction de la résistance à la compression (UCS)

D'après la figure 5, lorsque la résistance à la compression augmente, la ténacité absolue augmente également. Trois gammes de ténacité absolue peuvent être distinguées : de 0 à $20 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$, correspondant à une résistance à la compression variant de 0 à 2 MPa ; de 20 à environ $60 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$, correspondant à une résistance à la compression de 2 à 5 MPa ; et enfin, d'environ 60 à $100 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$, où la résistance à la compression simple varie entre de 6 et 10 MPa .

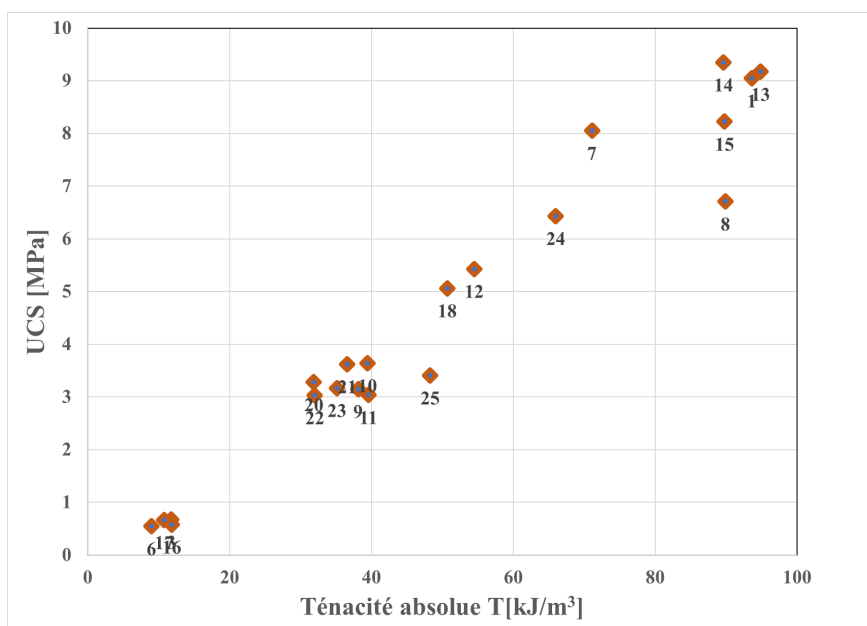


FIGURE 5. Ténacité absolue T en fonction de la résistance à la compression simple UCS .

L'essai de compression simple a révélé une relation linéaire entre résistance et ténacité du béton de terre crue coulée, avec une variation de la ténacité pouvant aller jusqu'à un facteur de 9 selon la formulation. Les formulations contenant davantage de liant minéral sont plus résistantes et plus tenaces. En revanche, celles sans stabilisant minéral s'affaissent sous contrainte sans rupture ni gain de résistance. Les formulations atteignent une résistance de 2 à 5 MPa et une ténacité de 30 à 50 kJ/m^3 , adaptées pour des structures de type R+1.

IV. Conclusion et perspectives

L'essai de compression simple a été utilisé pour déterminer la ténacité axiale d'un béton de terre crue coulée et étudier la relation existante entre résistance et ténacité. Le béton de terre crue coulée étudié présente une gamme de ténacité étendue, pouvant varier d'un facteur de 9 suivant la formulation. Il existe une forte relation de linéarité entre résistance et ténacité. Les matériaux présentant une forte proportion de liants minéraux sont à la fois plus résistants et plus tenaces. A l'inverse, pour les formulations sans stabilisant minéraux, la rupture ne s'opère pas avec observation d'un plan de cisaillement : l'échantillon s'affaisse lorsqu'on le contraint sans accumulation d'énergie et gain de résistance associé.

Différentes formulations de matériaux permettent d'atteindre une résistance autour de 3 à 4 MPa, avec une même ténacité intermédiaire (de 30 à 50 kJ/m³). Cette gamme de résistance est suffisante pour construire une structure portante de type R+1. Il sera intéressant d'étudier le rôle du limon dans le gain de ténacité du matériau à travers sa capacité à se déformer plastiquement sans rompre.

REFERENCES

Hamrouni, I., Ouahbi, T., El Hajar, A., Taibi, S., Jamei, M., Zenzri, H., 2023. Water vapor permeability of flax fibers reinforced raw earth: Experimental and micro-macro modeling. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 27, 3020–3039. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2123857>

Perrot, A., Jacquet, Y., Caron, J.F., Mesnil, R., Ducoulombier, N., De Bono, V., Sanjayan, J., Ramakrishnan, S., Kloft, H., Gossler, J., Muthukrishnan, S., Mechtcherine, V., Wangler, T., Provis, J.L., Dörfler, K., Krakovska, E., Roussel, N., Keita, E., 2024. Snapshot on 3D printing with alternative binders and materials: Earth, geopolymers, gypsum and low carbon concrete. *Cement and Concrete Research* 185, 107651. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107651>

Delgado, M.C.J., Guerrero, I.C., 2006. Earth building in Spain. *Construction and Building Materials* 20, 679–690. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.006>

Hamrouni, I., Jalili, H., Ouahbi, T., Taibi, S., Jamei, M., Mabrouk, A., n.d. 2024. Thermal properties of a raw earth-flax fibers building material. *Construction and Building Materials*, Volume 423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135828>

Jalili, H., Ouahbi, T., Eid, J., Taibi, S., Hamrouni, I., 2024. Exploring Historical Perspectives in Building Hygrothermal Models: A Comprehensive Review. *Buildings* 14, 1786. <https://doi.org/10.3390/buildings14061786>

Imanzadeh, S., Hibouche, A., Jarno, A., Taibi, S., (2018). Formulating and optimizing the compressive strength of a raw earth concrete by mixture design. *Construction and Building Materials* 163, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.088>

A. Hibouche, Sols traités aux liants, performances hydro-mécaniques et hygrothermiques, applications en BTP (dissertation), Normandie Univ., Unihavre, 2013.

M. Al-Mukhtar, A. Lasledj, J.F. Alcover, Lime consumption of different clayey soils, *Appl. Clay Sci.* 95 (2014) 133–145, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.024>

Kouta, N., Saliba, J., Saiyouri, N., 2021. Fracture behavior of flax fibers reinforced earth concrete. *Engineering Fracture Mechanics* 241, 107378. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107378>

Shamas, Y., Nithin, H.C., Sharma, V., Jeevan, S.D., Patil, S., Imanzadeh, S., Jarno, A., Taibi, S., 2023. Toughness and Ultimate Compressive Strength of Bio-Based Raw Earth Concrete, in: Amziane, S., Merta, I., Page, J. (Eds.), *Bio-Based Building Materials*, RILEM Bookseries. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 310–323. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8_25

ASTM D2487-11, Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 2012.

Kanema, J.M., Eid, J., Taibi, S., 2016. Shrinkage of earth concrete amended with recycled aggregates and superplasticizer: Impact on mechanical properties and cracks. *Materials & Design* 109, 378–389. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.025>

Imanzadeh, S., Jarno, A., Hibouche, A., Bouarar, A., Taibi, S. (2020). Ductility analysis of vegetal fiber reinforced raw earth concrete by mixture design. *Construction and Building Materials* 239, 117829. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117829>