

Formulation et renforts de blocs de terre crue pour une utilisation structurelle

Simon Guihéneuf^{1,2}

¹ LGCGM, INSA Rennes - 20 Avenue des Buttes de Coësmes CS 70839, 35708 Rennes Cedex 7, France

² IRDL, UMR CNRS 6027, Université de Bretagne Sud – BP 92116, 56321 Lorient Cedex, France

RESUME

Le contexte actuel d'accélération du changement climatique et d'augmentation de la population mondiale pousse le secteur du bâtiment à envisager des changements de paradigme conséquents. Ainsi, le développement local de matériaux de construction bio-sourcés prend tout son sens. Les travaux de thèse présentés dans cet article visent à développer des blocs de terre crue reproductibles, aux caractéristiques mécaniques maîtrisées pour construire des bâtiments en R+3. Trois terres représentatives de la variabilité des ressources disponibles en Bretagne, stabilisées avec des ajouts bio-sourcés, sont étudiées dans le but de développer ces blocs. Dans cet article une méthodologie pour élaborer des blocs porteurs en terre crue bio-stabilisée est proposée. D'abord le comportement rhéologique des terres formulées avec des ajouts bio-sourcés à la mise en œuvre est étudié. Puis l'optimisation des résistances mécaniques à l'état sec et sous variations d'humidité est mise en valeur pour ces différentes terres formulées. Enfin différentes caractéristiques de durabilité de ces formulations de terres bretonnes sont étudiées. Les résultats obtenus permettent d'envisager le développement à une échelle semi-industrielle la fabrication locale de blocs porteurs en terre crue à faibles impacts environnementaux.

Mots-clés : terre, stabilisants bio-sourcés, mise en œuvre, caractéristiques mécaniques, durabilité

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, l'accélération du changement climatique est due aux émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre. Le milieu de la construction en est en partie responsable (GABC-2018 Global status report, 2018) par son recours massif aux matériaux de construction conventionnels comme le ciment, responsable de 5 à 10% des émissions mondiales de CO₂ (Barcelo et al., 2014). Ce secteur est aussi en partie responsable de la raréfaction de certaines ressources minérales (Krausmann et al., 2009). Il apparaît ainsi primordial de développer des matériaux de construction locaux et bio-sourcés pour faire évoluer ce secteur. Ainsi, l'utilisation de matériaux de construction à base de terre crue à faible impact environnemental, facilement recyclables et disponibles localement doit être reconsidérée (Morel et al., 2001). Cependant quelques freins à leur développement persistent et doivent être levés : leur durabilité à l'eau, leurs caractéristiques mécaniques tributaires de leur

mise en œuvre et leur variabilité notamment (Champiré et al., 2016; Perrot et al., 2018). Pour faire face à ces enjeux afin de concevoir des matériaux à base de terres aux propriétés variables, on peut envisager des solutions à faible impact environnemental pour limiter leur sensibilité à l'eau tout en préservant leur capacité à diffuser la vapeur d'eau, leur assurer des propriétés mécaniques minimales à l'aide d'un procédé de mise en œuvre maîtrisé ou limiter leurs pertes de résistance avec la teneur en eau.

Il existe plusieurs options pour répondre à chacun de ces aspects. Certaines d'entre elles ont souligné l'importance d'optimiser le procédé de mise en œuvre de la terre crue pour atteindre systématiquement de bonnes propriétés mécaniques et laissent entrevoir la démocratisation de nouvelles méthodes à plus grande échelle : compaction, hypercompaction, vibro-compaction, terre coulée, extrusion ou impression 3D (Bruno et al., 2017; Guihéneuf et al., 2020a; Landrou et al., 2018). Pour faciliter et optimiser cette mise en œuvre d'autres études proposent une stratégie de formulation des terres avec des dispersants réduisant les interactions entre les particules argileuses, améliorant la maniabilité des matériaux (Landrou et al., 2018; Perrot et al., 2018, 2016). Cette stratégie permet, lors de la mise en œuvre d'une terre donnée, de réduire l'apport initial d'eau au mélange, de limiter la porosité du matériau pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et sa durabilité. Enfin pour améliorer la durabilité à l'eau et les caractéristiques mécaniques en service des matériaux à base de terre crue, plusieurs études, inspirées de savoir ancestraux, ont mis en valeur l'intérêt d'une stratégie de formulation de ces terres avec différents ajouts bio-sourcés (Anger et al., 2013; Chang et al., 2015; Perrot et al., 2018).

Dans le cadre des travaux de thèse présentés dans cet article, une méthodologie est proposée pour développer des briques de terre crue, avec des terres bretonnes présentant une grande variabilité, permettant d'atteindre des résistances à la compression suffisantes pour construire des bâtiments en R+3 sans ajouts de liant hydrauliques, en ne jouant que sur l'optimisation du mode de mise en œuvre, l'ajout de dispersants et la formulation des terres avec des ajouts bio-sourcés. En premier lieu cet article se focalisera sur le comportement rhéologique des différentes terres sélectionnées formulées avec différents ajouts bio-sourcés pour l'adapter à différents modes de mise en œuvre sélectionnés. Ensuite les caractéristiques mécaniques de certaines formulations de matériaux mises en œuvre seront étudiées lorsqu'elles seront soumises à différentes conditions. Enfin la durabilité à l'eau de certaines formulations sélectionnées sera évaluée à l'aide de plusieurs essais.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. Trois terres bretonnes : Les terres K, R et S.

Les trois terres K, R et S ont toutes été prélevées en Bretagne et sont représentatives de la variabilité et de l'hétérogénéité des ressources locales. Elles ont toutes déjà été étudiées dans des études préalables (Guihéneuf et al., 2020a, 2020b; Perrot et al., 2018), leurs granulométries obtenues par différentes méthodes pour les fractions fines (granulométrie laser et sédimentation) sont visibles sur la figure 1 et certaines de leurs caractéristiques sont disponibles dans le tableau 1. La terre K est une terre à faible potentiel cohésif alors que la terre S présente le potentiel cohésif le plus élevé des trois terres. Comme déjà observé lors d'études précédentes, la terre K présentera donc les plus faibles résistances à la compression, la terre R des résistances intermédiaires et la terre S les plus

grandes résistances (Guihéneuf et al., 2020b, 2020a). Aussi la terre S présentera la plus grande sensibilité à l'eau, de par sa plus forte activité argileuse (Guihéneuf et al., 2020b).

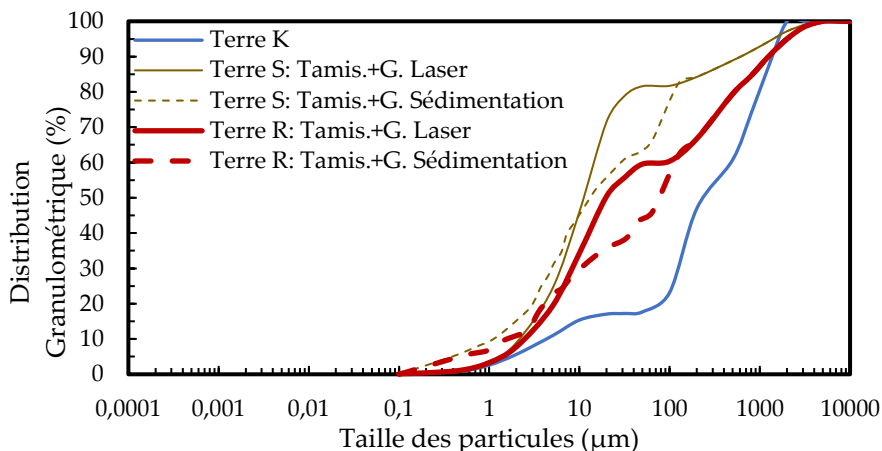


FIGURE 1: Distributions granulométriques des terres K, R et S

TABLEAU 1 : Quelques caractéristiques des terres K, R et S

Terre	VBS	CEC (Cmol ⁺ /kg)		Limites d'Atterberg (%)			Essai Proctor		Fraction argileuse
		Terre	Fraction argileuse	W _p	W _l	I _p	ρ (kg/m ³)	W _{OPN} (%)	
K	0,2	0,9	5,3	18,6	32	13,4	2080	5,5	Kaolinite
R	0,7	3,0	27,8	21,8	36,5	14,7	1858	14,5	Kaolinite, Illite et Chlorite
S	1,1	7,9	54,1	29,7	46,2	16,5	1606	20,6	Kaolinite, Illite et Vermiculite

B. Différents ajouts bio-sourcés et sodium hexametaphosphate

Plusieurs ajouts, bio-sourcés ou non, seront étudiés ici, d'abord pour leur influence sur les caractéristiques rhéologiques de différentes terres. Ils ont tous déjà fait l'objet d'une étude détaillée (Guihéneuf et al., 2020b) concernant leurs effets sur la durabilité à l'eau de trois terres (K, R et S) dans laquelle leurs caractéristiques sont détaillées : sodium-hexametaphosphate (HMP), tanins de châtaignier (Tan), extrait de glands de chêne (OSE), solutions d'acide citrique (Ac. Citr. pH2 et Ac. Citr. pH4), solution de bicarbonate de sodium (NaHCO₃ pH8), solutions de carbonate de sodium (Na₂CO₃ pH10 et Na₂CO₃ pH11,9), colle végétale (Col), alginates (Alg), caséine (Cas), gomme xanthane (Xan) et huile de lin (HDL). Si l'impact de tous ces ajouts sur le comportement rhéologique des différentes terres est étudié ici, seuls les impacts de la gomme xanthane (Xan 0,5% ou 1%), de l'huile de lin ajoutée dans la masse ou appliquée en surface (HDL 1%, HDL 2% ou HDLSurf) et du sodium hexametaphosphate (HMP 0,0425%) sont étudiés pour les autres campagnes expérimentales de cet article. Chaque dosage est exprimé en % de la masse sèche de terre.

C. Quatre modes de mise en œuvre pour optimiser la résistance à la compression sèche

Les impacts de quatre modes de mise en œuvre sur les propriétés finales des blocs de terre crue réalisés sont étudiés : le moulage, la compaction, la vibro-compaction et l'extrusion. Pour chaque mode de mise en œuvre, pour chaque type de terre mise en œuvre et pour chaque formulation, il

existe une teneur en eau initiale optimale pour viser les densités les plus élevées possibles de matériau et donc des propriétés mécaniques optimales et maîtrisées (Guihéneuf et al., 2020a).

D. Différentes campagnes expérimentales

Pour évaluer les impacts des différents ajouts sur les propriétés rhéologiques de chacune des terres sélectionnées, des essais simples ont été développés. Une étude précédente a mis en valeur le fait que la détermination des limites de consistances géotechnique pouvait être considérée pour caractériser le comportement rhéologique à faible taux de cisaillement d'une terre (Perrot et al., 2016). Ainsi l'évolution des limites de liquidité des trois terres obtenues au pénétromètre à cône (AFNOR, 2018) a été appréhendée pour chacune de leurs formulations. Des mesures complémentaires de seuil de cisaillement au rhéomètre coaxial à géométrie vane (Anton Paar MCR 702, déformation constante, vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}=0,01 \text{ s}^{-1}$) sur certaines formulations choisies des trois terres K, R et S à une teneur en eau équivalente à leur limite de liquidité. Ces différents essais ont pour but de mettre en valeur le comportement dispersant ou viscosant de chaque ajout testé, afin d'adapter chaque formulation de terre à chaque mode de mise en œuvre étudié.

Sur des formulations choisies de la terre K, au plus faible potentiel cohésif, avec HMP, Xan et HDL, des essais de compression ont été réalisés suivant les recommandations généralement décrites dans différentes normes (AFNOR - XP P 13-901, 2017; AFNOR-NF EN 196-1, 2016). Ces essais ont été réalisés sur des éprouvettes d'élanement 1 : après séchage à l'étuve (50°C), stabilisées à 20°C et 50%HR, exposées à différentes durées en chambre humide (23°C / 98% HR).

Enfin l'impact d'ajouts sélectionnés (HDL et Xan) sur la durabilité des différentes terres étudiées a été estimé à l'aide de différents essais simples. Un essai d'absorption capillaire développé et largement décrit dans une étude précédente (Guihéneuf et al., 2020b) qui permet de déterminer un coefficient d'absorption capillaire normalisé par la porosité apparente de l'échantillon $A_{cap/n}$ et une teneur en eau capillaire w_{cap} . Un essai d'érosion (drip test) accéléré inspiré de l'essai d'Yttrup (Yttrup et al., 1981) lors duquel un volume de 100mL tombe goutte après goutte sur une éprouvette 40*40*160 mm³ inclinée à 30° pendant 10 minutes et à la fin duquel on mesure une profondeur d'empreinte érodée moyenne notée $P_{e,moy}$. Enfin un essai de compression après différentes durées d'immersion a été conduit sur des échantillons moulés de la terre S (la terre S étant la plus sensible à l'eau) formulés avec de la gomme xanthane (Xan 0,5%) et de l'huile de lin (HDL 2%) afin d'illustrer leur potentiel pour améliorer la durabilité à l'eau de matériaux à base de terre crue.

III. COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE, OPTIMISATION DE LA MISE EN ŒUVRE

Les diverses influences de tous les ajouts bio-sourcés testés sur le comportement rhéologique des trois terres ont d'abord été évaluées. L'évolution des limites de liquidité mesurées au pénétromètre à cône a donc été suivie. La figure 2a illustre les résultats obtenus sur ces essais qui ont permis de mettre en valeur le caractère dispersant de plusieurs ajouts qui limitent la teneur en eau à viser pour une terre donnée pour atteindre une consistance donnée. Le sodium hexametaphosphate, dispersant connu, reste le plus efficace pour cela. Cependant d'autres dispersants bio-sourcés ou peu impactants pour l'environnement apparaissent comme alternatives : tanins de châtaignier, extrait de glands de chêne, acide citrique, carbonate de sodium et bicarbonate de sodium. Il est

aussi apparu que d’autres ajouts bio-sourcés jouaient le rôle contraire, viscosant, augmentant la teneur en eau à viser pour atteindre une consistance donnée : alginates, caséine ou colle végétale. Pour certains ajouts (HDL et Xan), les mesures au pénétromètre à cône semblaient faussées, l’aspect du mortier étant très visqueux. Des mesures au rhéomètre ont ainsi été réalisées à teneur en eau équivalente à la limite de liquidité de la terre K avec et sans Xan ou HDL, puis en ajoutant du HMP à ces mélanges. La figure 2b rend compte de ces essais et illustre bien l’effet « viscosant » des ajouts de Xan et de HDL, augmentant la valeur du seuil de cisaillement d’une terre à teneur en eau donnée. Cependant, il est aussi possible de limiter largement ces seuils de cisaillement en ajoutant du HMP.

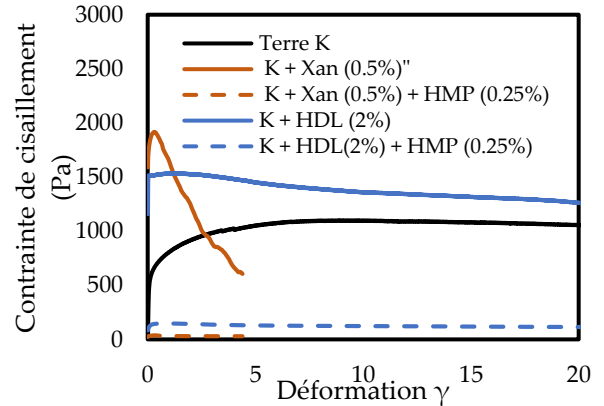
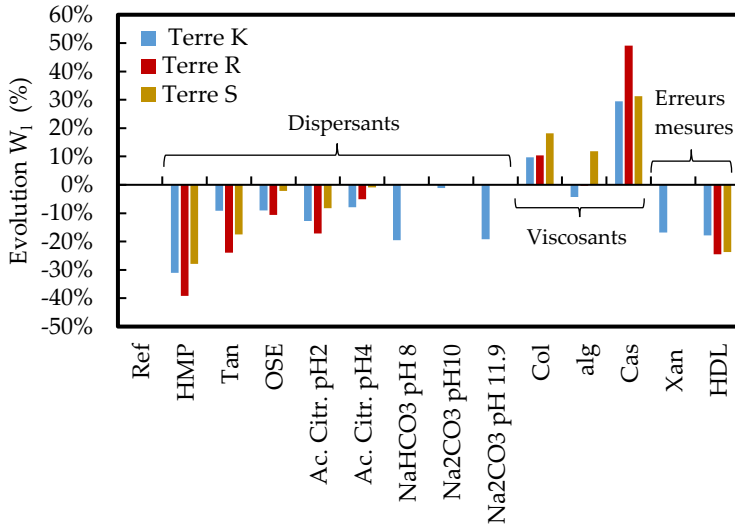


FIGURE 2a : Évolution des limites de liquidité W_l des trois terres K, R et S selon leur formulation

FIGURE 2b : Évolution des contraintes de cisaillement à faible vitesse (0,01 s-1) pour plusieurs formulations de la terre K mise en œuvre à une teneur en eau visée correspondant à sa limite de liquidité naturelle

TABLEAU 2 : Quelques teneurs en eau optimales à la mise en œuvre pour plusieurs formulations de la terre K pour 4 modes de mise en œuvre

Formulation	Teneur en eau optimale à la mise en œuvre (%)			
	Moulage	Extrusion	Compaction	Vibro-compaction
Terre K	14 %	10-14%	10 %	9%
Terre K+HMP	12%	9-12%	8%	7.5%
Terre K+HMP+HDL (2%)	12%	-	8%	6.5%
Terre K+HMP+Xan (0.5%)	11-13%	-	9%	8%

En prenant en compte les conclusions d’études précédentes (Guihéneuf et al., 2020a), et les résultats de ces essais rhéologiques il a été possible d’adapter la teneur en eau à la mise en œuvre de chaque formulation de chaque terre pour chaque mode de mise en œuvre afin qu’elle soit optimale pour viser systématiquement des caractéristiques mécaniques élevées et optimisées. Le tableau 2 illustre des valeurs de teneurs en eau optimales obtenues certaines formulations de la terre K.

IV. CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES D’UN BLOC DE TERRE CRUE EN SERVICE

Pour deux ajouts choisis (Xan et HDL) les évolutions des résistances à la compression obtenues pour des formulations de la terre K mises en œuvre par moulage ont été suivies dans différentes conditions, à l’état sec ($W\%=0\%$), stabilisées à 20°C 50%HR et exposées durant différentes périodes

en chambre humide. La figure 3a illustre l'évolution des résistances à la compression en fonction de la teneur en eau pour ces formulations et la figure 3b illustre l'évolution de la teneur en eau avec le temps passé en chambre humide pour ces formulations. Sur la figure 3a, la bande bleutée illustre les teneurs en eau généralement atteintes par le matériau soumis à des conditions normales d'utilisation. Il apparaît ainsi que la gomme xanthane permet de limiter la perte de résistance à la compression avec la prise de teneur en eau (figure 3a) et que l'huile de lin limite l'augmentation de teneur en eau dans le matériau lorsqu'il est exposé en chambre humide (figure 3b). Dans les deux cas ces ajouts bio-sourcés limitent la perte de résistance des matériaux en service.

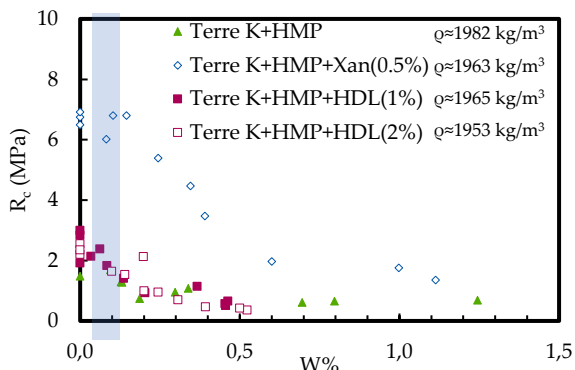


FIGURE 3a : Évolution de R_c en fonction de $W\%$ exposition en chambre humide (23°C , $98\%\text{HR}$) pour plusieurs formulations de la terre K

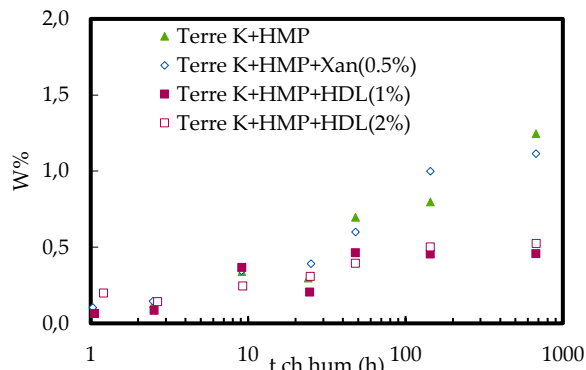


FIGURE 3b : Évolution de $W\%$ en fonction du temps passé en chambre humide (23°C , $98\%\text{HR}$) pour plusieurs formulations de la terre K

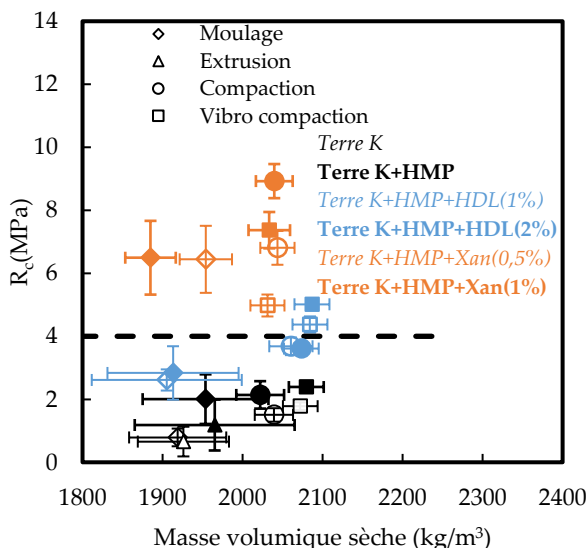


FIGURE 4 : Évolution de R_c (MPa) en fonction de ρ (kg/m^3) pour certaines formulations de la terre K en fonction de leurs modes de mise en œuvre

V. DURABILITÉ DES MATÉRIAUX

Enfin pour ces mêmes ajouts de Xan et de HDL, quelques caractéristiques de durabilité ont été appréhendées et mesurées. La figure 5a, issue d'une étude précédente, présente les coefficients

Enfin les résistances à la compression à l'état sec ont été obtenues pour ces formulations de la terre K pour différents modes de mise en œuvre (figure 4). Il apparaît que lorsque l'on ajoute de la gomme xanthane à la terre K, peu importe le mode de mise en œuvre, on obtient des résistances supérieures à 4 MPa suffisantes pour envisager de construire en R+3. Dans le cas d'ajout de HDL à la terre K, lorsqu'on le combine à une mise en œuvre par vibro-compaction, on obtient de la même manière cette résistance à la compression supérieure à 4MPa. Dans tous les cas, il semble pour cette terre peu cohésive, qu'il est possible d'en optimiser les caractéristiques mécaniques en combinant formulation avec HDL ou Xan et vibro-compaction ou compaction.

d'absorption capillaire $A_{cap/n}$ et les teneurs en eau capillaires w_{cap} obtenus pour différentes formulations des terres K, R et S. La figure 5b, présente les profondeurs érodées moyennes (en mm) obtenues après l'essai simple d'érosion. Il apparaît dans tous les cas que les ajouts de Xan et de HDL dans tous les matériaux permettent de réduire drastiquement l'absorption d'eau capillaire ($A_{cap/n}$ très faibles) dans leurs pores et leur érosion ($P_{e,moy}$ nulles). Ces ajouts permettent ainsi d'améliorer la durabilité à l'eau des blocs de terre crue formulés et mis en œuvre.

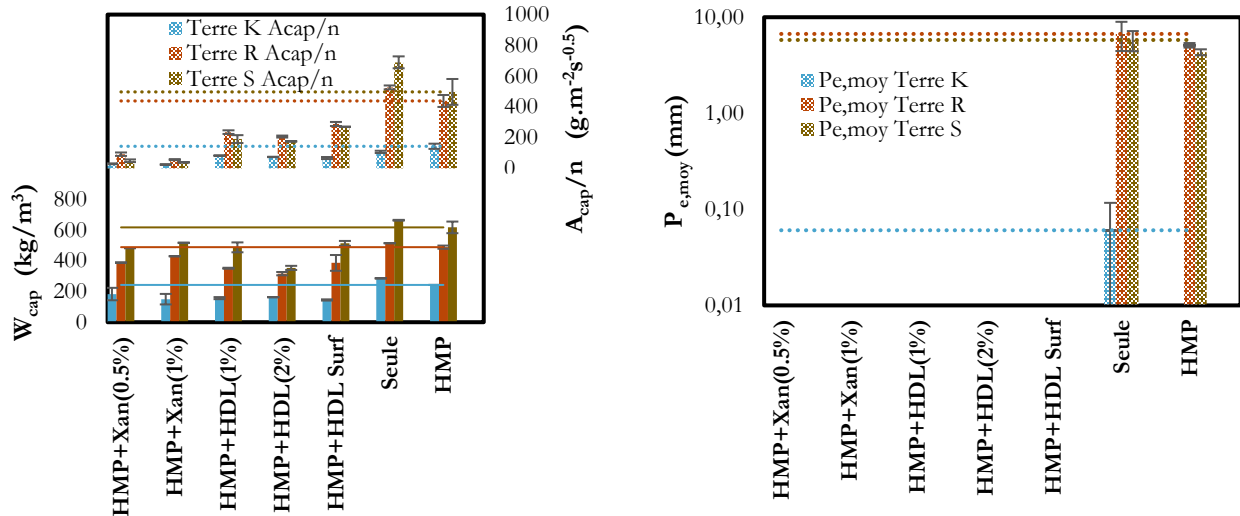


FIGURE 5a : Valeurs de w_{cap} et d' $A_{cap/n}$ pour **FIGURE 5b :** Valeurs des profondeurs érodées moyennes ($P_{e,moy}$) mesurées différentes formulations des terres K, R et S

Enfin pour des formulations de la terre S, qui est la plus sensible à l'eau, avec HDL et Xan des essais de compression après différentes périodes d'immersion ont été réalisés sur des demi-éprouvettes moulées 40x40x160 mm³ (tableau 3). Ces ajouts permettent aux échantillons de terre crue de résister à l'immersion et de présenter des résistances de 7 MPa après 15 minutes d'immersion pour l'ajout de gomme xanthane et de 2,5 MPa après 15 minutes d'immersion pour l'ajout d'huile de lin.

TABLEAU 3: Évolution de la résistance à la compression après différentes durées d'immersion pour plusieurs échantillons 40*40*80 mm de formulations de la terre S.

Formulation	R _c (MPa) 0 min imm.	R _c (MPa) 15 min imm.	R _c (MPa) 30 min imm.	R _c (MPa) 1h imm.	R _c (MPa) 1h30 imm.	R _c (MPa) 2h imm.
Terre S	4,3	-	-	-	-	-
S+HMP+HDL (2%)	6,6	2,5	1,6	0,9	0,7	0,5
S+HMP+Xan (0.5%)	8,5	7	5,0	4,2	3,6	3,2

VI. CONCLUSION

Finalement cette étude a mis en valeur quelques points clés pour faciliter la fabrication de blocs de terre crue porteurs à une échelle semi-industrielle malgré une variabilité de ressources et sans liants hydrauliques. Il faut d'abord bien appréhender le comportement rhéologique des terres formulées pour les adapter facilement à différents modes de mise en œuvre. Ensuite, l'optimisation du mode de mise en œuvre, en allant vers des techniques maîtrisées comme la vibro-compaction est

importante pour obtenir systématiquement de bonnes caractéristiques mécaniques à l'état sec. Aussi la formulation avec des dispersants et de l'huile de lin ou de la gomme xanthane est une bonne manière d'optimiser ces résistances à l'état sec ou en service. Ces ajouts confèrent aussi aux blocs de terre crue fabriqués une meilleure durabilité à l'eau, ce qui devrait faciliter leur démocratisation.

REFERENCES

- AFNOR, 2018. NF EN ISO 17892-12: Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : détermination des limites de liquidité et de plasticité - AFNOR.
- AFNOR - XP P 13-901, 2017. XP P 13-901 - Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons. AFNOR.
- AFNOR-NF EN 196-1, 2016. NF EN 196-1: Méthodes d'essais des ciments — Partie 1 : Détermination des résistances. AFNOR.
- Anger, R., Fontaine, L., Vissac, A., Couvreur, L., Moevus, M., Bourgès, A., Gandreau, D., Joffroy, T., 2013. PaTerre+: Interactions argiles/biopolymères, Patrimoine Architectural en terre et stabilisants naturels d'origine animale et végétale. CRAterre ENSAG.
- Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G., Gartner, E., 2014. Cement and carbon emissions. *Mater Struct* 47, 1055–1065. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0114-5>
- Bruno, A.W., Gallipoli, D., Perlot, C., Mendes, J., 2017. Mechanical behaviour of hypercompacted earth for building construction. *Mater Struct* 50, 160. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1027-5>
- 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>
- Chang, I., Jeon, M., Cho, G.-C., 2015. Application of Microbial Biopolymers as an Alternative Construction Binder for Earth Buildings in Underdeveloped Countries. *International Journal of Polymer Science* 2015, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2015/326745>
- GABC-2018 Global status report, 2018. Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector. Global Alliance for Buildings and Construction (GABC).
- Guihéneuf, S., Rangeard, D., Perrot, A., 2020a. Processing methods for optimising the mechanical strength of raw earth-based materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*. <https://doi.org/10.1680/jcoma.19.00115>
- Guihéneuf, S., Rangeard, D., Perrot, A., Cusin, T., Collet, F., Prétot, S., 2020b. Effect of bio-stabilizers on capillary absorption and water vapour transfer into raw earth. *Mater Struct* 53, 138. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01571-z>
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., 2009. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics* 68, 2696–2705. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>
- Landrou, G., Brumaud, C., Plötze, M.L., Winnefeld, F., Habert, G., 2018. A fresh look at dense clay paste: Deflocculation and thixotropy mechanisms. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 539, 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.12.029>
- Morel, J.C., Mesbah, A., Oggero, M., Walker, P., 2001. Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. *Building and Environment* 36, 1119–1126. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00054-8)
- Perrot, A., Rangeard, D., Levigneux, A., 2016. Linking rheological and geotechnical properties of kaolinite materials for earthen construction. *Mater Struct* 49, 4647–4655. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0813-9>
- Perrot, A., Rangeard, D., Menasria, F., Guihéneuf, S., 2018. Strategies for optimizing the mechanical strengths of raw earth-based mortars. *Construction and Building Materials* 167, 496–504. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.055>
- Yttrup, P., Diviny, K., Sottile, F., 1981. Development of a Drip Test for the Erodibility of Mud Bricks.