
Renforcements bio-sourcés pour améliorer la rhéologie, les caractéristiques mécaniques et la durabilité à l'eau des matériaux de construction à base de terre crue

S. Guihéneuf^{1*}, D. Rangeard¹, A. Perrot²

¹ INSA Rennes, EA 3913, LGCGM, F-35000 Rennes

² Univ. Bretagne Sud, FRE CNRS 3744, IRDL, F-56100 Lorient

*Corresponding author; e-mail: Simon.Guiheneuf@insa-rennes.fr

RÉSUMÉ.

De nombreux ajouts bio-sourcés sont utilisés autour du monde afin de stabiliser, de protéger de l'eau, ou d'améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux de construction en terre crue. Parmi ces ajouts, on peut citer les alginates, les tannins, les extraits de glands de chêne, la colle végétale, les eaux fermentées de fibres végétales, la caséine, l'huile de lin ou encore l'acide citrique. Ces ajouts impliquent différents mécanismes à l'échelle micro-structurale des matériaux à base de terre crue pour en améliorer les différentes caractéristiques. Dans cette étude, 4 types de sols prélevés à différents endroits en Bretagne et présentant des caractéristiques sensiblement différentes ont été étudiés. Plusieurs essais de laboratoire ont été réalisés pour observer et comparer l'influence de ces différents ajouts sur les propriétés des matériaux à base de terre crue formulés à partir de ces 4 sols. Cette étude montre que ces ajouts bio-sourcés, associés à des procédés de mise en œuvre plus maîtrisés, peuvent être une bonne alternative aux liants hydrauliques afin de stabiliser les matériaux de construction à base de terre crue.

ABSTRACT.

Large amounts of natural materials are used all around the world to stabilize, to protect from water or to enhance mechanical properties of earth-based building materials. Of these materials are: alginate, tannins, oak seed extract, cellulosic glue, natural fibers washing water, casein, linseed oil and citric acid. These additions induce different mechanisms at the microstructural scale of earth-based materials and have an influence on their rheology, water sensitivity or mechanical properties. In this study we will focus on 4 kinds of fine soils that come from the same region (Brittany) and are composed of different varieties of clay and different contents of sand, silt and clay. Several laboratory tests have been carried out in order to observe and compare the influence of these additions on raw earth-based materials properties. This study shows that natural additions, combined with contained process methods, can be a good alternative to hydraulic binders in order to stabilize earth-based building materials.

MOTS-CLÉS : Terre crue, ajouts bio-sourcés, rhéologie, résistance à l'eau, caractéristiques mécaniques..

KEY WORDS: Earth-based materials, natural additions, rheology, water durability, mechanical strength.

1 Introduction

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique incontrôlé, il est important de trouver des solutions pour améliorer nos techniques de construction afin de les rendre moins impactantes pour l'environnement. C'est pourquoi on observe un regain d'intérêt dans la construction en terre crue grâce à son caractère local, son faible impact environnemental et sa forte recyclabilité [MOE 15]. Cependant la terre crue est un matériau très sensible à l'eau et menant à un large panel de résistances mécaniques différentes [BUI 14]. Aujourd'hui encore, il n'existe que peu de solutions pour obtenir des niveaux de résistance du matériau terre crue conformes aux normes en vigueur dans le milieu de la construction. Une des seules solutions aujourd'hui est d'ajouter des liants hydrauliques à la formulation pour limiter le temps de séchage du matériau et de lui conférer des caractéristiques mécaniques minimales et une durabilité à l'eau suffisante. [WAL 97]. Une autre option inspirée des méthodes de formulation du béton est d'améliorer la maniabilité du matériau en réduisant les interactions entre les particules d'argiles en les défloculant [MOE 15]. Cette défloculation peut être obtenue à l'aide de dispersants comme le sodium-hexamétaphosphate (Na-HMP) qui agit sur les argiles de la même manière qu'un superplastifiant agit sur les particules de ciment dans le béton [PER 12; PER 16]. Cette option, pour un procédé de mise en œuvre donné, permet de limiter l'apport initial d'eau au mélange, réduisant ainsi la porosité finale du matériau et améliorant sa résistance et sa durabilité. Néanmoins, l'utilisation de liants hydrauliques ou de Na-HMP (produit chimique) implique une consommation d'énergie grise et un impact environnemental non négligeables. Même si ces impacts semblent limités, certains ajouts bio-sourcés, communément appelés biopolymères, pourraient remplacer ces produits industriels pour formuler un matériau performant à base de terre crue avec le plus faible impact environnemental possible.

En effet, autour du monde, de nombreux ajouts naturels sont empiriquement utilisés pour améliorer les performances des matériaux à base de terre crue et quelques études ont déjà listé nombre de ces biopolymères [VIS 13, VIS 17]. Et certaines études ont déjà mis en valeur l'efficacité et les mécanismes induits par certains de ces ajouts pour améliorer la résistance mécanique, la durabilité ou la maniabilité du matériau terre crue [ANG 11; VIS 13; PER 18]. Dans cette étude l'objectif est de comprendre comment différents ajouts bio-sourcés améliorent les propriétés des matériaux à base de terre crue à différents niveaux avec différents mécanismes induits.

2 Matériaux et méthodes

2.1 4 différents sols locaux

Le matériau « terre » est caractérisé par une grande variabilité et hétérogénéité dans sa composition et dans les potentielles caractéristiques mécaniques qu'il permet de viser. Plusieurs types de sols vont donc être étudiés afin d'illustrer au mieux cette hétérogénéité, même à une échelle régionale (Bretagne) :

- Un premier sol élaboré en laboratoire composé de 17% de kaolin de Ploemeur, 23% de sable fin et 60% de sable normal déjà étudié dans plusieurs études précédentes [PER 18]
- Un second sol fin sableux et peu argileux contenant des oxydes de fer rouges prélevé à Redon (Bretagne). Sa fraction fine est composée de quartz et de différentes argiles (kaolinite, illite et chlorite).
- Un sol fin argilo-limoneux dont la fraction fine est composée de quartz, de kaolinite et d'illite, prélevé à Bréal-sous-Monfort (Bretagne).
- Un dernier sol fin argilo-limoneux dont la fraction fine est composée de quartz, de kaolinite, d'illite et de smectite, pouvant s'apparenter à une terre à bauge, prélevé à Saint-Sulpice-la-Forêt (Bretagne). [PER 18].

2.2 Ajouts bio-sourcés sélectionnés

Comme expliqué précédemment, dans cette étude, de nombreux ajouts bio-sourcés ont été testés pour tenter de stabiliser ces matériaux. Ils ont été sélectionnés après consultation de nombreuses études et de recettes traditionnelles et sont les suivants : alginates, tanins, extrait de glands de chêne (OSE), colle végétale, eau de fermentation de fibres végétales, caséine, huile de lin et acide citrique, vernis à base d'huiles végétales [ANG 11; VIS 13; VIS 17; PER 18]. Ils ont été sélectionnés car ils sont facilement disponibles en Bretagne pour une éventuelle production locale de blocs préfabriqués. Chacun de ces ajouts possède différentes propriétés et pourrait permettre d'améliorer la résistance mécanique, la durabilité à l'eau ou la maniabilité du matériau terre crue.

2.3 Méthodes expérimentales

Pour mettre en valeur chacun des effets de ces ajouts sur la terre crue, différents essais de laboratoire ont été menés. Certains essais ont été réalisés pour mettre en valeur l'action des ajouts qui peuvent jouer le rôle de dispersants : observation au microscope à balayage électronique (MEB), suivi du pH de l'eau interstitielle et

détermination des limites de consistances pour chacun des ajouts pour différents types de terre. Un autre essai a été réalisé pour illustrer l'amélioration de la durabilité à l'eau induite par l'apport de certains ajouts : il s'agit d'un test d'absorption inspiré par différentes normes AFNOR (NF EN 13057 et XP P 13-901). Enfin, des essais ont été menés pour mettre en valeur l'action des ajouts sur la résistance mécanique de blocs en terre crue à différentes teneurs en eau : suivi de la résistance à la compression de blocs de terre crue lorsque leur teneur en eau évolue, pour différentes formulations (tests de résistance à la compression selon la norme NF EN 196-1).

3 Résultats

3.1 Impacts des ajouts bio-sourcés sur le comportement rhéologique du matériau terre crue

3.1.1 Observations au MEB

Le rôle d'un dispersant est de défloculer les particules d'argiles en limitant leurs interactions entre elles. Selon [PER 16], sans ajout de dispersant le réseau de particules d'argiles présente une configuration de « château de cartes ». Les bords des particules d'argiles chargés positivement sont attirés par les faces de ces mêmes particules chargées négativement. L'ajout d'un dispersant comme le Na-HMP, annule les charges de bord des argiles qui sont ainsi dispersées et s'organisent de manière plus compacte et alignée autour des autres grains à l'état sec, le matériau présentant ainsi une plus faible porosité. Cette propriété des dispersants est mise en valeur par les figures 1 et 2. Les observations au MEB ont permis d'observer sur le sol à base de kaolin l'influence des différents ajouts bio-sourcés, et certains d'entre eux semblent agir de la même manière que le Na-HMP sur les images obtenues : l'ajout de tanins ou encore d'acide citrique (plus efficace en solution à pH2 qu'à pH4).

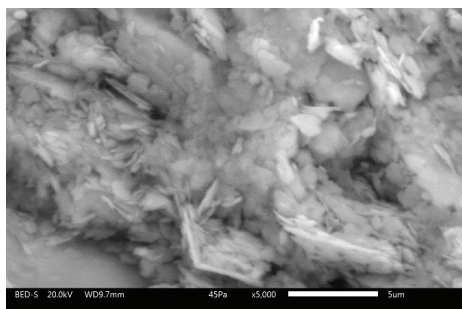


Figure 1: Observation au MEB d'un échantillon de sol kaolin seul

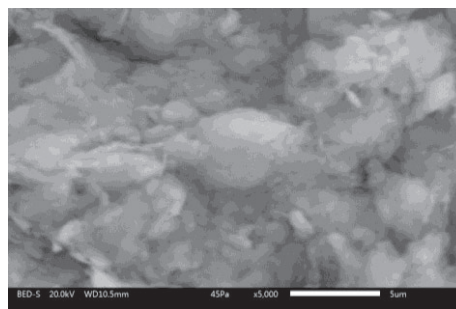


Figure 2: Observation au MEB de la formulation kaolin-Na-HMP

3.1.2 Suivi du pH de l'eau interstitielle des différents matériaux formulés à la mise en œuvre

Formulation/Type de Sol	pH du liquide interstitiel		
	Kaolin	Redon	St Sulp
Sol seul	7.7	7.5	7.1
Sol + HMP	4.3	5.4	6.0
Sol + tanins (4%)	4.2	3.9	3.8
Sol+OSE (4%)	7.2	5.1	6.9
Sol + acide citr. pH 2	2.6	2.5	2.7

Tableau 1: pH de l'eau interstitielle pour différentes formulations de sols

Pour plusieurs types de terres formulés avec les ajouts semblant avoir un potentiel dispersant, le pH de l'eau interstitielle présente dans le matériau à la mise en œuvre. Il ressort que certains ajouts induisent une acidification radicale du milieu (comme l'acide citrique en solution à pH 2), et cela semble être le mode d'action de ce dispersant. Pour les autres ajouts (HMP, OSE ou encore tanins), le mécanisme induit semble être différent. Cependant selon [ANG 11 ; VIS 13] les tanins ou l'OSE pourraient être plus efficaces à pH très acide (entre 1 et 3) ou basique (9 ou 10) comme dispersants.

3.1.3 Détermination des limites d'Atterberg pour différentes formulations de matériaux

Formulation	Kaolin		Saint-Sulpice	
	Wl(%)	Wp (%)	Wl(%)	Wp (%)
Sol seul	65.5	31.3	46.2	29.7
Sol+Na-HMP	45.1	27.5	33.3	21.7
Sol+tan (4%)	59.5	30.3	38.1	23.9
Sol+ Ac.Citr.pH2	57.1	25.8	42.3	21.9
Sol+ Ac.Citr.pH4	60.3	29.8	45.7	23.6
Soil+OSE poudre.	59.6	30.2	45.2	26.9

Tableau 2: Limites d'Atterberg de différentes formulations de sols, impacts des ajouts sur la rhéologie des matériaux

Des essais à plus grande échelle peuvent aussi permettre de révéler plus clairement l'impact des ajouts testés sur la rhéologie du matériau « terre crue ». Ils peuvent notamment permettre d'identifier facilement les ajouts bio-sourcés ayant un rôle dispersant. C'est pourquoi une campagne d'essais géotechniques (pénétromètre à cône, limite de plasticité au rouleau) a été menée pour déterminer les limites d'Atterberg des différents sols étudiés formulés avec tous les ajouts testés. Le tableau 2 illustre certains des résultats obtenus pour les sols de St Sulpice et le sol Kaolin. Ils illustrent les capacités dispersantes de certains ajouts comparés au Na-HMP (tanins, OSE et acide citrique). De nombreux autres essais ont été réalisés avec d'autres types de sols (Redon et Bréal) et tous les autres ajouts : certains agissent donc comme des dispersants, mais d'autres (caséine, alginates, et colle végétale) sont des gélifiants qui diminuent la maniabilité du matériau et nécessitent un apport d'eau plus conséquent et l'ajout de dispersants puissants comme le Na-HMP.

3.2 Impacts des ajouts bio-sourcés sur l'absorption d'eau du matériau terre crue

Selon [VIS 13 ; VIS 17] certains des ajouts pourraient aussi diminuer la sensibilité à l'eau des matériaux à base de terre crue. Un test d'absorption capillaire a alors été développé pour mettre en valeur ces propriétés pour certains des ajouts testés. Des résultats intéressants ont ainsi été obtenus et certains ajouts bio-sourcés comme le vernis à base d'huiles végétales, ou les tanins dans une moindre mesure, limitent donc l'absorption d'eau du matériau.

3.3 Impacts des ajouts bio-sourcés sur la résistance à la compression des matériaux formulés lorsque leur teneur en eau évolue

Comme cela a déjà pu être mis en valeur, certains ajouts bio-sourcés permettent d'augmenter la résistance du matériau « terre crue » à l'état sec [PER 18], et pourraient limiter la perte de résistance mécanique lorsque la teneur en eau du matériau augmente. Les différents ajouts étudiés ont donc été formulés avec le sol à base de kaolins et les caractéristiques mécaniques des différents matériaux formulés ont alors été suivies, à l'état sec et lorsque leur teneur en eau évoluait. Pour beaucoup de ces ajouts (tanins, OSE, alginates, caséine et huile de lin notamment), la résistance à la compression à l'état sec du matériau augmente de manière significative. Cependant lorsque la teneur en eau de ces matériaux formulés augmente, les ajouts ne semblent pas avoir d'impact sur leur résistance mécanique, à l'exception de l'huile de lin qui limite la perte de résistance mécanique du matériau observée normalement lorsque sa teneur en eau augmente.

4 Conclusions

Cette étude a permis de mettre en valeur que différentes solutions bio-sourcées pouvaient durablement améliorer les caractéristiques physiques du matériau « terre crue » : ces ajouts permettent selon leurs propriétés d'améliorer la maniabilité, de réduire la sensibilité à l'eau ou encore d'augmenter la résistance à la compression de ce matériau. Ces ajouts sélectionnés judicieusement, associés à des méthodes de mise en œuvre maîtrisées, peuvent être de très bonnes alternatives aux liants hydrauliques et dispersants chimiques afin de stabiliser les matériaux de construction à base de terre crue et devraient permettre à ces matériaux d'être conformes aux normes du milieu de la construction.

5 Références

- [ANG 11] ANGER R., Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction, MATEIS-INSA Lyon, 2011
- [BUI 14] BUI Q.B., MOREL J.C., HANS S., et al., Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth, *Construction and Building Material*, March 2014, 54, pp.163–169.
- [MOE 15] MOEVUS M., JORAND Y., OLAGNON C., et al., Earthen construction: an increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase. *Mater Struct*, 2015, 49, pp.1555-1568.
- [PER 12] PERROT A., LECOMPTE T., KHELIFI H., et al., Yield stress and bleeding of fresh cement pastes. *Cem Concr Res*, 2012, 42, pp. 937–944.
- [PER 16] PERROT A., RANGEARD D., LEVIGNEUR A., Linking rheological and geotechnical properties of kaolinite materials for earthen construction. *Mater Struct*, 2016, 49, pp. 4647-4655.
- [PER 18] PERROT A., RANGEARD D., MENASRIA F., et al., Strategies for optimizing the mechanical strengths of raw earth based mortars, *Construction Building Materials*, Elsevier, February 2018, 167: 496-504.
- [VIS 13] VISSAC A., COUVREUR L., MOEVUS M. et al., PaTerre+, interactions argiles/biopolymères, CRATerre-ENSAG ; 2013
- [VIS 17] VISSAC A., BOURGES A., GANDREAU D., et al., *Argiles et biopolymères*, CRATerre Editions, 2017
- [WAL 97] WALKER P. and STACE T., Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars, *Mater Struct*, 1997, 30, pp. 545–551.