

Etude des performances mécaniques de matériaux terre-fibre

Tuan Anh Phung¹, Malo Le Guern², Mohamed Boutouil³

¹ ESITC Caen, 1 rue Pierre et Marie Curie, 14610, France, mail : tuan-anh.phung@esitc-caen.fr

² ESITC Caen, 1 rue Pierre et Marie Curie, 14610, France, mail : malo.leguern@esitc-caen.fr

³ ESITC Caen, 1 rue Pierre et Marie Curie, 14610, France, mail : mohamed.boutouil@esitc-caen.fr

RÉSUMÉ. Dans cette étude, le comportement mécanique de différentes formulations de bauge (mélange de terre et de fibre) a été étudié. Différents mélanges de terre-fibre ont été réalisés à l'aide des trois sols et des deux fibres dont la longueur et la teneur varient. Les performances mécaniques de ces matériaux sont ensuite déterminées. Les résultats montrent que les fibres de lin permettent d'obtenir une résistance mécanique plus importante que les fibres de paille. Une des caractéristiques importantes pour les matériaux à base de sol est la teneur en eau. Usuellement, dans le domaine du BTP, la teneur en eau recherchée est celle à l'optimum Proctor. Cependant, la fabrication de bauge est effectuée traditionnellement avec une teneur en eau plus importante afin d'obtenir un matériau malléable. Des échantillons ont donc été fabriqués à différentes teneurs en eau afin d'évaluer son influence à la fabrication sur les performances mécaniques finales du matériau. Les résultats montrent que la résistance du matériau diminue lorsque la teneur en eau initiale des échantillons augmente, cependant, cette diminution est dépendante du sol utilisé.

ABSTRACT. In this study, the mechanical behaviour of different cob formulations (mixture of soil and fibre) has been studied. Different mixtures of earth-fibre have been made with three soils and two fibres with different length and content. Then, mechanical performances of these materials are determined. The results show that flax fibres allow to have a greater mechanical strength than the straw fibres. An important characteristic for soil-based materials is the water content. Usually, in the field of construction, the desired water content is that the Proctor optimum. However, manufacturing cob is done traditionally with higher water content in order to obtain a malleable material. Samples were therefore made with different water contents in order to assess its influence during the manufacture on the final mechanical performance. Results show that resistance of the material decreases when the initial water content of the samples increases, however, this decrease is dependent on the soil used.

MOTS-CLÉS : Construction en terre, bauge, matériau durable, terre-fibre.

KEY WORDS: Earth construction, Cob, durable material, earth-fibre.

1. Introduction

La terre crue a été et demeure l'un des principaux matériaux de construction utilisés par les hommes depuis des milliers d'années. Aujourd'hui encore, plus d'un tiers des habitants de la planète vit dans des habitats en terre. Pour les pays en développement, ce pourcentage s'élève à 50% de la population rurale et à au moins 20% de la population urbaine et périurbaine [HOU 06].

Dans les pays en développement, la construction en terre apparaît comme un moyen efficace de production à court terme d'un habitat économique permettant le logement du plus grand nombre, l'essor d'une exploitation des ressources locales en matériau de construction, la formation de techniciens et d'artisans du bâtiment, la création d'emplois.

Au cours des dernières années, un regain d'intérêt pour les matériaux de construction en terre a eu lieu pour des raisons de restauration et de réparation de bâtiments historiques et culturels du patrimoine ainsi que pour une utilisation comme matériau à faible consommation d'énergie dans l'architecture bioécologique et durable [AYM 12]. Le renouveau de l'utilisation de la terre comme matériau de construction est lié à la réduction significative de l'impact environnemental due à l'utilisation de matières premières locales et de procédés de fabrication simples et économes en énergie [BER 00 ; MIN 00 ; HOU 06 ; MIN06 ; AVR 08]. De plus, les matériaux à base de terre permettent un meilleur équilibre et contrôle thermique et acoustique intérieure par rapport à des matériaux de construction usuels. Cela est dû à leurs performances en termes d'absorption/désorption d'humidité, de capacité de stockage de la chaleur (régulation hygrothermique) et des propriétés de transmission du son [BER 00 ; MIN 00 ; MIN 06 ; BIN 09 ; AVR 08]. Actuellement, les maîtres d'ouvrage et les architectes choisissent également la terre comme matériau de construction de par les avantages en termes d'esthétique et de qualité sanitaire de l'air [ULR 13].

Les modes de construction en terre ont été influencés par la situation géographique et les cultures usuelles. Donc, de nombreux modes de construction existent : l'adobe, la brique de terre comprimée, la bauge, la terre empilée, le pisé. En Normandie, la technique la plus répandue est la bauge qui est un mélange de terre crue et de fibres végétales (paille usuellement). La technique de construction en bauge consiste en l'édification d'un mur massif, souvent porteur, mis en œuvre par empilement de boules de terre-fibre à l'état plastique, éventuellement à l'aide de coffrage, compactées à la fourche et au bâton puis taillé au paroir. Afin de faciliter le malaxage, les plus gros éléments sont enlevés. Les fibres permettent de maintenir la cohésion et de limiter le retrait au séchage. En général, la teneur en eau du mélange est comprise entre 10 et 20% pour obtenir une pâte compacte (qui ne s'effrite pas). Un sol typique utilisé en bauge doit contenir environ 30% de gravier, 35% de sable et 35% de limon et d'argile avec une variation de ces paramètres de plus ou moins 10% [AKI 06].

Dans cette étude, outre la fibre de paille traditionnelle, du lin a été utilisé. Différentes formulations de bauge seront réalisées afin d'évaluer l'influence des différents paramètres (type de sol et de fibre, teneur en eau, longueur et teneur en fibre).

2. Matériaux et méthodes

2.1. Sols

Pour cette étude, trois sols différents provenant de la carrière de Lieusaint ont été choisis : un sable brut (sol 1), une argile rouge (sol 2) et un limon (sol 3) (figure 1). Les propriétés géotechniques des sols sont présentées dans le tableau 1.

Afin d'obtenir des performances mécaniques optimales, il est nécessaire que le matériau soit le plus dense possible. Des mélanges des différents sols choisis vont donc être effectués. D'après la teneur en fines, le sol 1 possède le pourcentage le plus important de gros grains. Le sol 1 sera donc utilisé pour former le squelette du matériau. Etant donné leur fort pourcentage en fines (entre 70 et 90%), les sols 2 et 3 joueront le rôle de liants entre les grains du sol 1. Deux mélanges seront réalisés : le sol 1 avec le sol 2 (mélange A) et le sol 1 avec le sol 3 (mélange B). Le dosage en masse retenu est de 2/3 de sol 1 et 1/3 de sol 2 ou 3. Les courbes granulométriques de ces mélanges sont présentées dans la figure 1. Les courbes granulométriques des 2 formulations sont proches (figure 2). Il est à noter que ces courbes diffèrent entre 0,3 mm et 80 μ m. Pour la construction en bauge traditionnelle, le sol utilisé doit contenir environ 30% de gravier, 35% de sable et 35% de limon et d'argile à plus ou moins 10% près [AKI 06]. Les deux mélanges choisis sont donc typique de la bauge traditionnelle (\approx 26% de gravier, \approx 35% de sable, \approx 39% de limon et d'argile).

Tableau 1. Les propriétés des sols

	Valeur au bleu (g/100g)	Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité (%)	Teneur en eau à l'optimum Proctor (%)	Masse volumique optimal Proctor (kg/m ³)	Teneur en fines (%)
Sol 1	0,30	48,9	28,5	20,4	9,5	2034	12,97
Sol 2	0,91	53,5	24,5	29,0	15,5	1770	72,65
Sol 3	0,55	34,1	20,4	13,7	14,0	1827	89,51

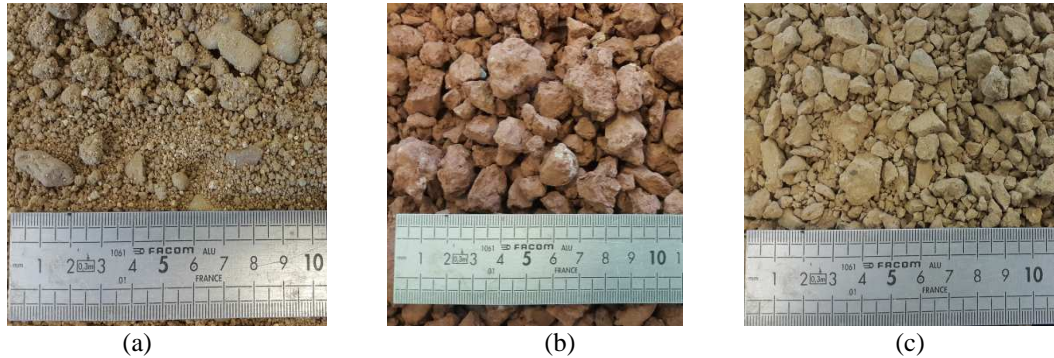


Figure 1. Sols utilisés pour l'étude : sol 1 (a), sol 2 (b) et sol 3 (c)

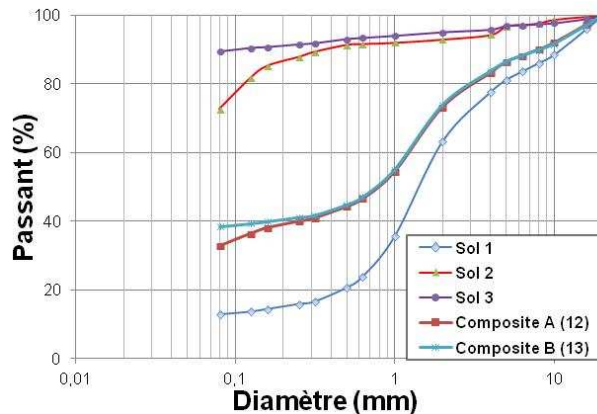


Figure 2. Les courbes granulométriques des sols et des mélanges

2.2. Fibres

L'utilisation de fibres végétales présente différents avantages pour une utilisation comme renfort de matériaux. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles et de faible coût [AKB 07]. De plus, leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, leur valorisation permet la réduction de l'impact environnemental par rapport à des fibres minérales ou polymères de par leur nature renouvelable, biodégradable, neutre vis-à-vis des émissions de CO₂ et demandant peu d'énergie pour être produites [BAL 04].

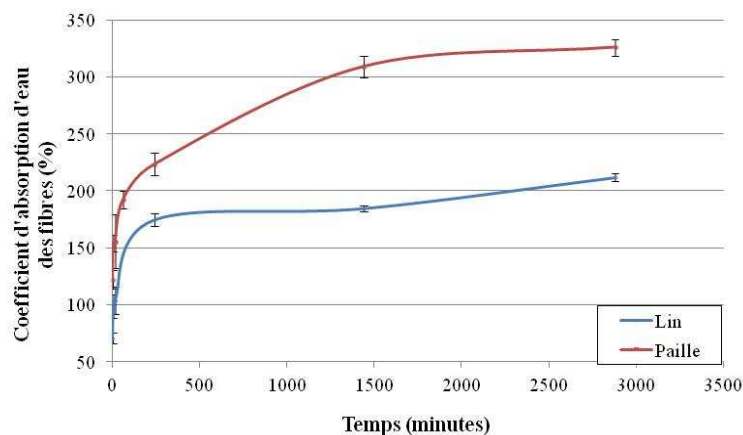
De plus, l'ajout de fibres aléatoirement distribuées dans un matériau offre une résistance isotropique [YET 03 ; KUM 06]. La présence de fibre empêche la propagation de la fissure lors de la traction après déformation initiale [MIC 00]. L'augmentation de la teneur en fibres permet de diminuer le nombre de fissures causées par le retrait et d'augmenter la conductivité hydraulique du sol compacté [MIL 04 ; TAN 10].

Les fibres utilisées ici sont la paille et le lin. La paille provient de Laigneville (Manche) et le lin de la plaine de Caen. Le lin utilisé possède la particularité d'être pauvre en fibre, c'est la raison pour laquelle il n'a pas été exploité par la filière linière habituelle. Les propriétés de la paille et du lin sont présentés dans le tableau 2. La variabilité de la longueur de la paille et du lin s'explique par l'influence d'une multitude de facteurs sur son développement agricole mais aussi sur sa transformation industrielle et la méthode utilisée pour la récolte.

Tableau 2. Propriétés de la paille et du lin.

	Masse volumique (g/cm ³)	Longueur (cm)	Teneur en eau initiale (%)
Paille	1,182 ± 0,073	37,4 ± 12,1	8,4
Lin	1,337 ± 0,010	83,6 ± 3,2	5,8

Une caractéristique importante des fibres végétales est le coefficient d'absorption d'eau. En effet, le comportement des fibres vis-à-vis de l'eau va influencer d'une part le mélange à l'état frais, lorsque l'eau de gâchage est disponible et peut être absorbée par les fibres, mais également le comportement à long terme puisque la capacité des fibres végétales à absorber plus ou moins d'eau pourra entraîner des variations volumiques des fibres dans le mélange et engendrer des modifications de l'interface fibres/matrice. Pour déterminer ce coefficient d'absorption d'eau, les fibres ont été immergées dans de l'eau pendant différentes durées (1 minute, 5 minutes, 15 minutes, une heure, 4 heures, 24 heures et 48 heures). Après immersion, les fibres sont essorées à l'aide d'une centrifugeuse à une vitesse de 500 tours par minutes pendant 15 secondes. Les résultats obtenus montrent que le coefficient d'absorption obtenu est plus important pour la paille que pour le lin (figure 3). En effet, la valeur moyenne d'absorption à 24 heures est de 309 % pour la paille et de 185% pour le lin (mesures réalisées sur 6 échantillons pour chaque intervalle de temps).

**Figure 3.** Coefficient d'absorption des fibres selon le temps d'immersion

Selon les précédentes études, le pourcentage optimal de fibre est situé entre 1% et 1,5% en masse sèche [AKI 06]. Pour cette étude, un ajout de 0,5 % et 1% en masse sèche a été effectué. Ce choix est dû à la maniabilité du mélange qui diminue dès que le taux de fibre est supérieur à 1%.

2.3. Méthodes

2.3.1. Evaluation des différents mélanges de bauge à la teneur en eau l'optimum Proctor

Afin de déterminer les interactions entre les différents paramètres de sols (mélange A ou B) et de fibres (type, taille, teneur), les différentes formulations ont été compactées à la teneur en eau de l'optimum Proctor dans un moule cylindrique CBR (Ø152 x H152 mm) (figure 4). Ce choix permet de compacter les échantillons à la dame Proctor de manière semblable pour tous les échantillons. Etant donné la taille des moules, les longueurs de fibres choisies sont de 5 et 10 cm (PIN-2010).

La conservation des éprouvettes est effectuée en salle de conservation à une température de 21°C ± 1°C et une humidité relative de 60 %. Cette condition de conservation se situe dans l'intervalle observé dans la bibliographie [COV 04 ; MIC 14]. Les éprouvettes sont retournées tous les deux jours afin d'obtenir une teneur en eau uniforme dans tout l'échantillon. Les essais de rupture sont effectués à 28 jours.



(a)



(b)

Figure 4. *Mélange A (a) et Mélange B (b) avec 1% de paille de 10 cm*

2.3.2. Evaluation des mélanges à la teneur en eau initiale variable

L'évaluation des différents mélanges est effectuée à la teneur en eau à l'optimum Proctor. Or, la méthode traditionnelle de construction en bauge nécessite une teneur en eau plus importante. En effet, sur chantier, les artisans estiment la quantité des composants à l'œil et travaillent avec un sol plastique. Les teneurs en eau mesurées sur chantier sont supérieures d'environ 6% à w_{OPN} . Cependant, l'augmentation de la teneur en eau des éprouvettes engendre une déformation lors du démoulage. Pour cette partie de l'étude, des moules cubiques de dimension 150x150x150 mm ont été utilisés. De plus, les parois des moules sont badigeonnées d'huile de lin afin de faciliter le démoulage (figure 5). Les formulations étudiées sont les deux mélanges de terre avec un ajout de 1% de paille de 10 cm de longueur à des teneurs en eau de départ de w_{OPN} , 3% et 6% au dessus de w_{OPN} .



a) huilage du moule



b) réalisation des échantillons cubiques

Figure 5. *Fabrication des échantillons cubiques*

Afin d'éviter une différence de teneur en eau entre les éprouvettes lors de la rupture, la rupture est effectuée, pour tous les mélanges, à une échéance de 35 jours. La période de conservation des échantillons dans le moule est différente selon les mélanges (7 jours pour A et 14 jours pour B).

3. Résultats et analyse

La résistance en compression est une des caractéristiques les plus importantes. De nombreuses études ont été effectuées sur la construction en terre par différents organismes en Europe : CRATerre, UMR 5140 archéologie des sociétés méditerranéennes, le Module UNIVERSITERRA, le réseau Dachverband Lehm (DVL), l'université de Bath, l'université de Plymouth ou le Centro de Investigacion d'Arquitectura Tradicional (CIAT) (Espagne). Selon ces différentes études, l'intervalle de la résistance en compression se situe entre 0,4 et 2 MPa [MID 92 ; MIC 2014].

Les essais sont réalisés à l'aide d'une machine à compression IGM ayant une capacité de 250 kN. L'essai est piloté en force à une vitesse de 0,2 kN.s⁻¹.

3.1. Effet de la composition à la teneur en eau initiale constante

Les résultats des essais de compression sont présentés dans les figures 6 et 7. Ces résultats montrent que l'utilisation de fibres de lin engendre une résistance supérieure aux fibres de paille. Cela peut être dû à la résistance des fibres comme l'indique la masse volumique du lin qui est supérieure à la paille. De plus, le coefficient d'absorption d'eau du lin (185% en 24h) est inférieur à celui de la paille (309% en 24h), ce qui engendre une différence dans le gonflement des fibres lors de la fabrication des échantillons. Lors du séchage,

l'espace entre les fibres et sol est donc différent et contribue donc à une moindre résistance des mélanges avec paille par rapport au lin [HEJ 12].

Concernant les mélanges de sol, les résultats montrent que le mélange B conduit à de meilleures résistances que le mélange A. Cette différence peut s'expliquer par une masse volumique des mélanges B toujours supérieure aux mélanges A (tableau 3).

Cependant, l'influence de la teneur et de la longueur des fibres n'est pas identifiée. En effet, par exemple, les mélanges B avec fibres de lin montrent une résistance similaire quelque soit les paramètres. Cette influence devra être déterminée par des observations ultérieures.

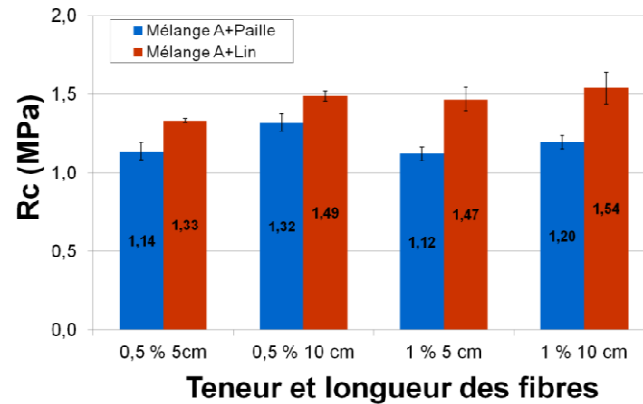


Figure 6. Résistance à la compression des mélanges A

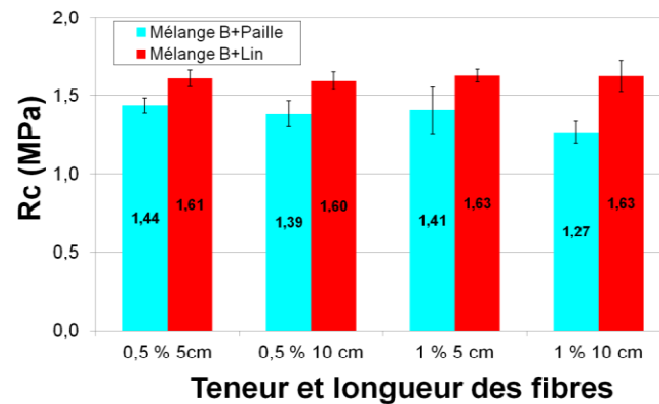


Figure 7. Résistance à la compression des mélanges B

Tableau 3. Teneur en eau à l'état rupture des différents composites fibrés

Teneur et longueur fibre	0,5% de 5cm		0,5% de 10cm		1% de 5cm		1% de 10cm	
	W _f (%)	ρ (kg/m ³)	W _f (%)	ρ (kg/m ³)	W _f (%)	ρ (kg/m ³)	W _f (%)	ρ (kg/m ³)
Mélange A + lin	2,7	1904	2,5	1823	2,8	1869	2,7	1803
Mélange B + lin	1,9	1945	1,9	1954	2,0	1917	2,0	1921
Mélange A + paille	3,0	1887	3,1	1909	3,0	1849	3,1	1837
Mélange B + paille	1,9	1950	1,8	1941	1,9	1874	2,1	1843

3.2. Effet de la teneur en eau initiale

Comme présenté dans le paragraphe 2.3.2., l'utilisation des échantillons cubiques permet d'évaluer l'influence de la teneur en eau lors de la confection sur la résistance mécanique du matériau. L'augmentation de la teneur en eau initiale implique une diminution de la densité de la bauge. Les résultats montrent que lorsque la teneur en eau de confection augmente, la résistance en compression diminue (figure 8). Il est à remarquer que, contrairement aux résultats précédents, les mélanges A possèdent des caractéristiques mécaniques supérieures aux mélanges B. Pour les mélanges à la teneur en eau à l'optimum Proctor, cela peut s'expliquer par l'utilisation d'une masse plus importante que celle prévu par l'optimum Proctor. Pour les autres teneurs en eau initiales, la plasticité du mélange entraîne une liaison plus importante entre les fibres et le mélange A. Cela est dû à l'activité de la fraction argileuse qui est plus importante pour le mélange que le mélange B.

Cependant, ces résistances sont obtenues pour des déformations supérieures à 5%. En prenant exemple sur les études de béton de chanvre, la résistance mécanique a été déterminée pour une déformation de 2% (figure 9). Dans ce cas, les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus pour les échantillons cylindriques. L'influence de l'interaction sol-fibre semble donc jouer pour des déformations plus importantes. Les résultats obtenus pour le mélange B (de 0,85 à 0,99 MPa) et le mélange A (0,5 à 0,87 MPa) montrent que leur utilisation est possible en construction pour les différentes teneurs en eau initiales utilisées.

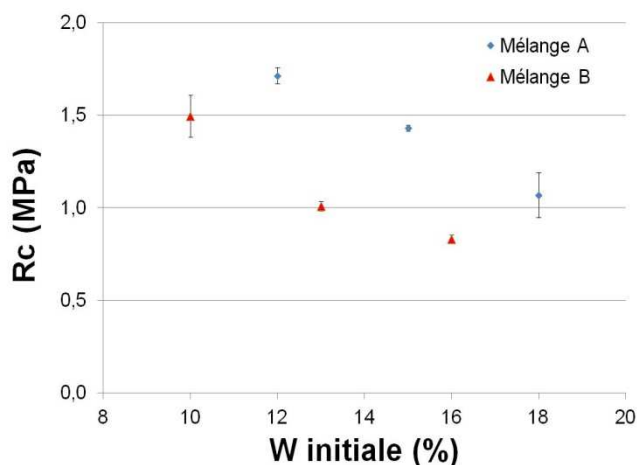


Figure 8. Résistance à la compression des mélanges avec 1% de paille de 10 cm

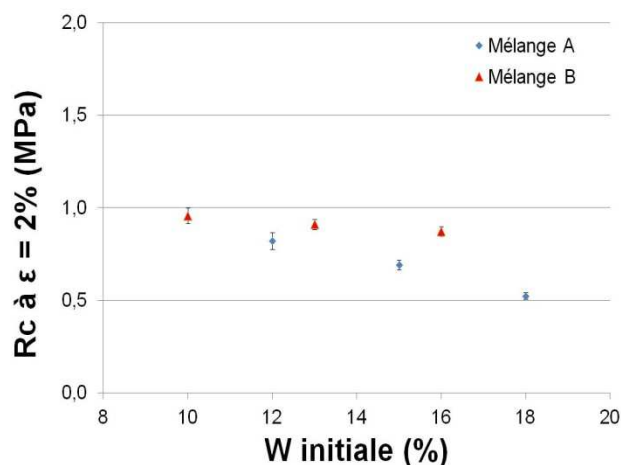


Figure 9. Résistance à la compression des mélanges avec 1% de paille de 10 cm pour une déformation de 2%

4. Conclusion

Cette étude avait pour objet d'étudier le comportement de matériaux terre-fibre utilisant différents mélanges de sols et de type, teneur et longueur de fibres ainsi que différentes teneurs en eau initiale. Il a été montré que :

- la masse volumique influe sur la résistance à la compression des matériaux fibrés ; une augmentation de la masse volumique donne une augmentation de la résistance à la compression,
- l'absorption d'eau des fibres et leur masse volumique semblent jouer un rôle sur les performances mécaniques du matériau terre-fibre,
- l'utilisation d'un mélange plastique favorise la liaison terre-fibre pour des sols ayant une forte activité argileuse,
- la détermination de la résistance mécanique pour une déformation de 2% doit être effectuée pour définir l'utilisation possible d'un matériau terre-fibre.

Par la suite, il sera intéressant de s'intéresser aux propriétés thermiques de ces matériaux afin de déterminer les différents avantages de la terre-fibre par rapport à d'autres matériaux de construction. De plus, il sera nécessaire de déterminer la courbe de rétention d'eau de ce matériau afin d'évaluer la capacité du matériau à réguler son humidité. Il sera également intéressant de procéder à des essais de perte au feu.

5. Bibliographie

- [ACH 06] ACHENZA M., FENU L., « On earth stabilization with natural polymers for earth masonry construction. », *Material and Structures*, vol. 39, n° 1, 2006, p. 21-27
- [AKB 07] AKBULUT S, ARASAN S, KALKAN E., « Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. », *Applied Clay Science*, vol. 38, n°1-2, 2007; p. 23–32.
- [AKI 06] AKINKUROLERE. O. O; JIANG. CANGRU; OYEDIRAN. A. T; DELE-SALAWU. O. I; ELESINLA, A. K., « Engineering Properties of Cob as a Building Material. », *Journal of Applied Science*, vol. 6, n° 8, 2006, p. 1882-1885.
- [AYM 12] AYMERICH. F, FENU. L AND MELONI. P. Effect of reinforcing wool fibres on fracture and energy absorption properties of an earthen material. *Construction and Building Materials*, 27(2012) 66-72.
- [AVR 08] AVRAMI E., GUILLAUD H., HARDY M., *Terra literature review. An overview of research in earthen architecture conservation*, Los Angeles, The Getty Conservation Institute, 2008.
- [BAL 04] BALEY. C., « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. », *Techniques de l'ingénieur AM6 (AM5130)*, 2004, p 1-12.
- [BER 00] BERGE B., *The ecology of building materials*, Oxford, Architectural press, 2000.
- [BIN 09] BINICI H, AKSOGAN O, BAKBAK D, KAPLAN H, ISIK B. «Sound insulation of fibre reinforced mud brick walls. », *Construction and Building Materials*, 2009, vol. 23, n°2, p.1035-1041.
- [HOU 06] HOUBEN H, GUILLAUD H., *Traité de construction en terre*, Marseille, Editions Parenthèses, 2006.
- [HEJ 12] HEJAZI S., SHEIKHZADEH M., ABTAHI S., ZADHOUSH A., «A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers.», *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 30, p. 100-116.
- [COV 04] COVENTRY K. A., Specification development for the use of Devon cob in earthen construction, Thesis, University of Plymouth, 2004
- [KUM 06] KUMAR A, WALIA B, MOHAN J., «Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. », *Construction and Building Materials*, 2006, vol. 20, p.1063-1068.
- [MIC 00] MICHAEL S., *Alternative Construction: Contemporary Natural Building Methods*, John Wiley and Sons, New York, 2000.
- [MIC 14] MICCOLI L., MÜLLER U., FONTANA P., «Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. », *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 61, p.327-339.
- [MIL 04] MILLER J., RIFAI S., «Fiber reinforcement for waste containment soil liners.», *Journal of Environmental Engineering*, 2004, vol. 130, p. 981-985.
- [MIN 00] MINKE G., *Earth construction handbook: the building material earth in modern architecture*, Southampton, Wit Press, 2000.
- [MIN 06] MINKE G. *Building with earth. Design and technology of a sustainable architecture*. Basel : Birkhäuser; 2006.
- [TAN 10] TANG C., SHI B., ZHAO L., «Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. », *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, vol. 28, n° 1, p. 54–62.
- [ULR 13] ULRICH ROHLEN, CHRISTOF ZIEGERT. *Construire en terre crue (Construction- Rénovation- Finitions)*. Livre. Edition du Moniteur, 2013, ISBN 978-2-281-11567-3.
- [YET 03] YETIMOGLU T., SALBAS O., «A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers.», *Geotextiles and Geomembranes*, 2003, vol. 21, n° 2, p. 103-110.