
Retrait empêché d'un matériau à base de terre crue.

Joanna Eid¹, Jean-Marc Kanema¹, Gediminas Bulatovas¹, Salima Bouchemella^{2,1},
Said Taibi¹

¹ LOMC, CNRS UMR 6294, Université Le Havre Normandie, 76058 Le Havre, France ; joanna.eid@univ-lehavre.fr; kanematm@univ-lehavre.fr; 208022@via.dk; said.taibi@univ-lehavre.fr.

² Laboratoire INFRARES, Université de Souk Ahras, Algérie ; sali.bouchemella@gmail.com;

RÉSUMÉ. Les éco-géomatériaux de construction à base de terre crue constituent une bonne alternative aux matériaux de construction classiques qui sont très énergivores en termes d'énergie grise. L'un des problèmes posé par ces matériaux à base de terre crue est leur aptitude accrue à la fissuration lors de la dessiccation. L'article présente une étude expérimentale permettant de quantifier les contraintes internes générées par le retrait de dessiccation, et qui sont à l'origine de l'apparition de la fissuration. Les résultats obtenus sur un béton de terre sont comparés à ceux d'un mortier de ciment classique, et mettent en évidence le comportement ductile, caractéristique des matériaux à base de terre crue.

ABSTRACT. Raw earth eco-geomaterials are a good alternative to conventional building materials that are very energy-intensive in terms of gray energy. One of the problems of raw earth materials is their increased ability to crack during desiccation. The paper presents an experimental study to quantify the internal stresses generated by the drying shrinkage, which are at the origin of the appearance of the cracking. The results obtained on a raw earth concrete are compared with those of a conventional cement mortar, and show the ductile behaviour, characteristic of the materials based on raw earth.

MOTS-CLÉS : éco-géomatériaux, terre crue, béton de terre, retrait, fissuration, essai à l'anneau.

KEY WORDS: eco-gomaterials, raw earth, earth concrete, shrinkage, cracking, Ring test.

1. Introduction

La construction en terre crue a été largement utilisée par nos ancêtres sous différentes techniques, en bloc de terre comme la bauge ou l'adobe, ou encore sous forme de murs compressés comme le Pisé [HAM 16], [ILL 14]. De nos jours, la construction en terre crue est de nouveau d'actualité vue ses avantages écologiques et environnementaux [MOR 01], [MEL 14], [PAC 12]. En Normandie, un nouveau béton de terre, nommé Cematerre, a été mis au point et sa technique de mise en place brevetée par un industriel Normand. Il est composé essentiellement de terre crue traitée avec un faible pourcentage de liants ($\approx 11\%$) et peut être amendé à l'aide de granulats de béton recyclé [KAN 16]. La nouveauté de sa technique est qu'il est coulé dans des banches comme dans le cas d'un béton classique. La présence de terre crue, et par conséquent de particules fines dans sa composition, rend ce béton de terre sensible au retrait. D'où la nécessité d'étudier son comportement lors du séchage et de tenter de minimiser l'apparition de la fissuration. Il a été démontré dans de précédentes études sur ce béton de terre, que l'ajout de renforts réduit la densité de fissuration d'un rapport 10 [EID 15], et que la fissuration est due à une déformation hétérogène au sein du matériau, résultante de la succion qui génère des efforts de traction.

Plusieurs techniques existent pour mesurer le retrait empêché, tel que le retrait linéaire empêché [BLO 95], le retrait 2D empêché [WEI 98] et l'essai à l'anneau (Ring Test). Les deux premières méthodes sont moins avantageuses que la troisième par le fait que l'empêchement est limité aux bords de l'échantillon [ALT 02] [HOS 04]. Ainsi, le « Ring Test » présente une plus grande souplesse et une simplicité lors de son utilisation par rapport aux autres tests dédiés aux mêmes objectifs. Il est réputé pour sa grande précision dans la détermination de la sensibilité à la fissuration.

Dans la littérature, il existe différents travaux sur le Ring Test. [HOS 04], [SAM 15a,b], [SAM 16], [BEU 16]. Dans ce travail, nous avons utilisé la technique du retrait empêché pour suivre le retrait de ce nouveau

matériau à base de terre crue. Le but est de comparer sa sensibilité à la fissuration à celle d'un mortier de ciment classique, et ensuite d'analyser son comportement vis-à-vis du retrait empêché. Cette étude permettra, par la suite, d'estimer les contraintes mécaniques internes générées par la dessiccation.

2. Méthodes et Matériaux

Dans cette étude, le retrait empêché d'un béton de terre, nommé Cematerre, est évalué à l'aide d'un essai à l'anneau suivant la norme ASTM C1581. De même, une formulation de mortier, utilisée dans plusieurs études de la littérature a été aussi testée pour effectuer une comparaison avec la littérature et les résultats obtenus sur le béton de terre.

2.1. Matériaux

2.1.1. Béton de Terre crue

Le béton de terre utilisé est composé à 72% de sol naturel (limon sableux SL (SM) selon la classification USCS-LCPC) traité, au préalable, avec 3% de chaux. Au sol sec, on ajoute un faible pourcentage de ciment $\approx 6.7\%$, de l'eau et un adjuvant (Tempo 10). La formulation de ce béton de terre est présentée dans le Tableau 1. Il faut noter que le rapport W/C dans la formulation du béton de terre est assez élevé, mais cette quantité d'eau est nécessaire sa mise en œuvre en tant que béton banché.

2.1.2. Mortier

Les essais réalisés sur le mortier avaient pour but d'une part de valider l'expérience en comparant les résultats à des résultats similaires dans la littérature, et d'autre part de les comparer aux résultats obtenus par le béton de terre. Dans ce but, une formulation standard de mortier a été choisie et présentée dans le Tableau 1. Elle est similaire à celle utilisée par Haouas [HAO 07]. Le rapport W/C est 0.5.

Tableau 1. Formulation du béton de terre et du mortier classique

Béton de Terre		Mortier de ciment	
Ingrédients	Quantité (kg/m ³)	Ingrédients	Quantité (kg/m ³)
Sol traité à la chaux	1390	Sable 0-4 mm (humide)	1365
Ciment CEM III/A 52.5L	130	Ciment CEM III/A 52.5L	575
Eau	410	Eau	220
Adjuvant	6	Adjuvant	1.5

2.2. Méthodes

2.2.1. Dispositif de l'essai à l'anneau selon la norme ASTM C15181

Le dispositif de l'essai à l'anneau utilisé est présenté sur la Figure 1. Il est composé d'un anneau d'acier de module d'Young $E_s=200$ GPa, de rayon intérieur $R_{IS}=152.5$ mm, de rayon extérieur $R_{OS}=165$ mm et d'épaisseur de 13 mm. Quatre jauges de déformation sont collées à mi-hauteur sur la face intérieure de l'anneau horizontalement pour mesurer la déformation de l'anneau en acier. Deux thermocouples sont placés dans l'environnement de l'échantillon pour mesurer en continue la température et l'humidité relative. L'anneau externe en PVC est utilisé pour le coulage du matériau d'épaisseur 38 mm. Toutes les données sont sauvegardées automatiquement à l'aide d'un système d'acquisition relié à un PC dédié.

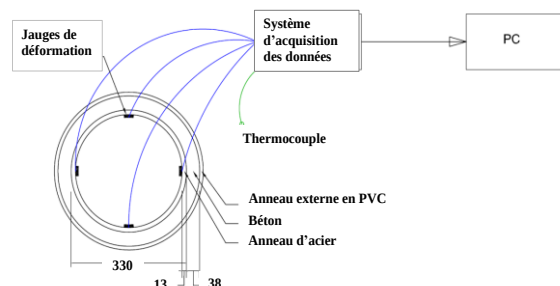


Figure 1. Schéma du dispositif d'essai à l'anneau-vue de dessus-

2.2.2. Protocole expérimental

Après coulage, les échantillons sont couverts à l'aide d'un film en plastique pour minimiser au maximum l'évaporation durant la prise du béton. Après 24h, l'anneau externe est enlevé ainsi que le film plastique. La dessiccation a lieu par la surface et la circonférence de l'échantillon. L'acquisition des données débute dès le coulage (avant le démoulage) et est réalisée toutes les 10 min afin d'obtenir un bon suivi à jeune âge. Les mesures sont effectuées jusqu'à l'apparition de la fissuration et se poursuivent jusqu'au retour à zéro de la déformation.

D'autres essais complémentaires ont aussi été réalisés : retrait linéaire sur des parallélépipèdes 7*7*28 cm, essai de flexion 4 points, essai de compression simple et essai brésilien.

2.2.3. Analyse des données

A partir des déformations mesurées par les jauges $\mu\epsilon$, on peut remonter aux contraintes. Une approche de « shrink-fit » a été développée considérant une pression élastique à l'interface entre l'anneau et le béton [HOS 04]. A partir des équations de Timoshenko et de la théorie qui relie le déplacement d'un mur cylindrique à la pression auquel il est soumis, on peut déduire une relation entre la contrainte tangentielle dans l'anneau σ_θ , la pression élastique $\Delta p_{res.}$ et les paramètres des deux cylindres (anneau en acier et béton). Pour simplifier les calculs, on considère que le séchage se fait principalement par la surface supérieure de l'échantillon, et par conséquent la contrainte maximale se trouve à l'interface anneau-acier. A partir de ces hypothèses, on peut calculer la contrainte maximale à l'interface, à l'aide des équations suivantes :

$$\Delta p_{res.} = \frac{\mu\epsilon \cdot E_s \cdot (R_{OS}^2 - R_{IS}^2)}{2R_{OS}^2} \quad [1]$$

$$\sigma_{\theta max} = \Delta p_{res.} \cdot \frac{(R_{OS}^2 + R_{IC}^2)}{R_{OC}^2 - R_{IC}^2} \quad [2]$$

Avec : R_{OS} et R_{IS} respectivement rayon extérieur et intérieur de l'anneau d'acier, et R_{OC} et R_{IC} ceux du béton, et E_s le module d'Young de l'acier.

3. Résultats

Les résultats obtenus sur le mortier de ciment sont conformes à ceux de la littérature. Par conséquent ces résultats vont nous servir à interpréter ceux obtenus sur le matériau à base de terre crue.

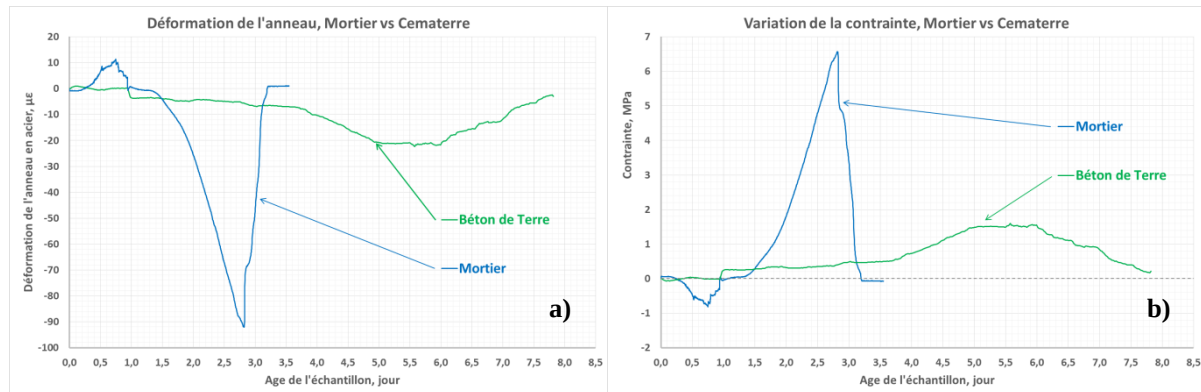


Figure 2. Comparaison Mortier de ciment et Béton de terre : **a)** Variation de la déformation **b)** variation de la contrainte.

Nous présentons sur la figure 2 l'évolution de la déformation et de la contrainte obtenus sur les échantillons de mortier de ciment et de béton de terre. Sur la figure 2a sont présentés ceux de la déformation et sur la figure 2b ceux de la contrainte. Nous notons tout d'abord, une brusque diminution de la déformation de l'anneau métallique après environ une journée de test. Ceci correspond au démoulage des échantillons et au début de leur exposition aux conditions thermiques et hydriques ambiantes. On observe ensuite une phase de stagnation ou de légère évolution de la déformation dans les deux matériaux. Elle correspond à un domaine où les matériaux sèchent sans présenter une grande déformation. Nous constatons également que cette phase est beaucoup plus courte sur le mortier de ciment que sur le béton de terre. Elle est d'environ une demi-journée pour le mortier et d'environ deux jours et demi pour le béton de terre. Cette dichotomie de comportement est sans doute liée à la

différence d'évolution du module d'élasticité des deux matériaux au jeune âge. Cette phase de stagnation est suivie par une phase de grande déformation de l'anneau, qui se fait de manière quasi linéaire mais suivant deux pentes différentes pour les deux matériaux. Le mortier se déforme plus vite que le béton de terre crue. En observant toujours les courbes, on constate que la phase de grande déformation des matériaux est interrompue brusquement. Cette brusque diminution de la déformation correspond aux premières apparitions des fissures dans les matériaux. On note aussi que cette première apparition de fissures se fait de manière plus tardive dans les bétons de terre que dans le mortier de ciment. Elle apparaît respectivement à 2.75 jours pour le mortier comparativement à 5 jours pour le béton de terre. Nous observons également l'évolution de la fissure principale se fait de manière assez rapide dans le mortier et plutôt lente dans le béton de terre. Elle se matérialise sur les graphes par un retour plus rapide à une déformation nulle de l'anneau. Elle marque également le comportement fragile du mortier de ciment et ductile du béton de terre. Il est important également de souligner la forte contrainte générée dans le mortier. Celle-ci est environ quatre fois plus importante que celle du béton de terre. Ceci est sans doute lié à une présence plus importante de ciment dans le matériau.

4. Conclusion

L'utilisation de la technique expérimentale du retrait empêché à l'anneau, habituellement appliquée aux bétons et aux mortiers de ciment, peut être étendue aux matériaux à base de terre crue. Les résultats montrent qu'on peut quantifier les contraintes internes à l'origine de l'apparition des fissures lors de la dessiccation. Ceci permettra de dimensionner les renforts nécessaires à reprendre ces contraintes.

5. Bibliographie

- [ALT 02] ALTOUBAT S., LANGE D. A. « Grip-specimen Interaction in Uniaxial Restrained Test », *American Concrete Institute*, vol. 206, 2002, p. 189-204.
- [BEU 16] BEUSHAUSEN H., BESTER N. « The influence of curing on restrained shrinkage cracking of bonded concrete overlays » *Cement and Concrete Research*, vol. 87, 2016, p. 87-96.
- [BLO 95] BLOOM R., BENTUR A. « Free and Restrained Shrinkage of Normal and High-Strength Concretes » *American Concrete Institute*, vol. 92, n° 2, 1995, p. 211-217.
- [EID 15] EID J. [et al.] « Drying, cracks and shrinkage evolution of a natural silt intended for a new earth building material. Impact of reinforcement », *Construction and Building Materials*, vol. 86, 2015, p. 120-132. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.115.
- [HAM 16] HAMARD E. [et al.] « A vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building », *Building and Environment*, vol. 106, 2016, p. 103-119. - <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009>.
- [HAO 07] HAOUAS A. Comportement au Jeune âge des matériaux cimentaires - Caractérisation et modélisation chimio-hydro-mécanique du retrait, rapport de recher [s.l.] , 2007, ENS Cachan,.
- [HOS 04] HOSSAIN A. B., WEISS J. « Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens », *Cement and Concrete Composites*. Vol. 26, n° 5, 2004, p. 531-540.
- [ILL 14] ILLAMPAS R., IOANNOU I., CHARMPIS D. « Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress-strain equation », *Construction and Building Materials*, vol. 53, 2014, p. 83-90.
- [KAN 16] KANEMA J. M., EID J., TAIBI S. « Shrinkage of earth concrete amended with recycled aggregates and superplasticizer. Impact on mechanical properties and cracks », *Materials and Design*, vol. 109, 2016, pp. 378-389. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.025>.
- [MEL 14] MELIA P. [et al.] « Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters », *Cleaner Production*, vol. 80, 2014, p. 179-186.
- [MOR 01] MOREL J.C. [et al.] « Building Houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction », *Building and Environment*, vol. 36, 2001, p. 1119-1126.
- [PAC 12] PACHECO-TORGAL F., JALALI S. « Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction », *Construction and Building Materials*, vol. 29, 2012, p. 512-519.
- [SAM 15a] SAMOUH H. « Evaluation de la sensibilité à la fissuration des BAP: Apport de l'analyse du comportement viscoélastique ». *Acte de RUGC'15- Bayonne* 27-29 mai, 2015.
- [SAM 15b] SAMOUH H. Nouvelles approches des relations entre formulation et comportement différé des matériaux cimentaires : application aux bétons autoplaçants, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2015.
- [SAM 16] SAMOUH H. ROZIERE E., LOUKILI A. « Self-Consolidating concrete cracking sensitivity: cracking index and database » *Acte de 8th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete; 6th North American Conference on Design and Use of Self-Consolidating Concrete, At Washington, DC, USA, 2016*
- [WEI 98] WEISS W. J., YANG W., SHAH S.P. « Shrinkage Cracking of Restrained Concrete Slabs », *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 124, n° 7, 1998, p. 765-774