
Briques de terre crue : procédure de compactage haute pression et influence sur les propriétés mécaniques

A.W. Bruno¹, D. Gallipoli¹, C. Perlot¹, J. Mendès¹, N. Salmon²

¹ Laboratoire SIAME, Equipe Géomatériaux et Structures du Génie Civil, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 1 allée du Parc Montauray, 64600 Anglet, France. agostinowalter.bruno@univ-pau.fr

² Nobatek, Centre de Ressources Technologiques, 67 rue Mirambeau, 64600 Anglet, France.

RÉSUMÉ. Au cours des dernières décennies, un intérêt croissant est porté à la terre crue en tant qu'éco-matériau de construction pour son caractère local et la faible consommation d'énergie qui caractérise son cycle de vie global. Toutefois, sa résistance mécanique relativement faible et sa sensibilité à l'eau freinent le développement de ce matériau. Le principal but de cette étude est d'améliorer les propriétés mécaniques de briques de terre crue par l'emploi d'une nouvelle procédure de compactage à pression élevée maintenue pendant une durée correspondante au temps de consolidation. Un système de compactage a été élaboré afin de compacter le sol à haute pression en permettant le drainage de l'eau interstitielle. Dans un premier temps, les caractéristiques géotechniques du matériau d'étude ont été déterminées. Après compactage à 25, 50 et 100 MPa, les échantillons ont été placés dans une enceinte climatique (25°C, humidité relative de 62 %) jusqu'à équilibre hydrique, puis testés afin d'évaluer leur module d'Young et leur résistance mécanique en compression. Cette nouvelle méthode de compactage à haute pression a permis d'atteindre des performances mécaniques élevées. Ainsi, un des principaux freins à l'utilisation de la terre crue comme matériau de construction serait levé.

ABSTRACT. Nowadays a growing interest is addressed to earthen construction materials for their eco-friendly credentials such as local character and reduced consumption of energy over their entire life cycle. However, the relatively low strength and high vulnerability to water infiltration hinder the development of these materials. The main goal of this study is to improve mechanical properties of compacted earth bricks by adopting a new compaction method. The application of very high compaction stress for a sufficient long period of time to allow soil consolidation is the main property of the proposed method. A compaction equipment has been designed to withstand high pressure and to allow pore water drainage. Firstly, geotechnical properties of the samples have been determined. Then, three levels of compaction stress have been tested: 25, 50 and 100 MPa. After compaction, specimens have been stored in a climatic chamber at constant temperature and relative humidity (25°C and 62%) until equalization. Afterwards, unconfined compressive tests were performed to determine stiffness and strength of the samples. This new compaction method led to very high mechanical performances. Thus, one of the main brake to the development of earthen construction material can be removed.

MOTS-CLÉS : Terre crue compressée, compaction, module d'Young, résistance mécanique.

KEY WORDS : Compressed earth, soil compaction, Young modulus, compressive strength.

1. Introduction

Les coûts énergétiques associés à la construction et surtout l'exploitation de bâtiments sont parmi les plus élevés de tous les secteurs de l'activité humaine. Le développement de pratiques de construction durables est donc primordial, non seulement afin de se conformer aux objectifs actuels de réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais aussi pour limiter la consommation d'énergie à l'échelle mondiale. Dans ce contexte, le développement de matériaux de construction économes en énergie, mais aussi dont les impacts environnementaux sont limités et notamment en terme d'épuisement des ressources, apparaît comme un challenge prometteur. Une des possibilités est l'utilisation de terre crue compressée : matériau local [MOR 2001] et dont la mise en forme ne nécessite que peu d'énergie, il peut être entièrement recyclable. Par ailleurs, ses propriétés hygrothermiques confèrent aux bâtiments la possibilité de "respirer" en absorbant ou libérant de l'humidité en fonction des conditions hydriques environnantes. La condensation et l'évaporation d'eau à l'intérieur de murs de terre crue génèrent des échanges de chaleur latente, régulant la température intérieure des bâtiments. Ainsi, la facture énergétique liée à la climatisation et au chauffage est diminuée [ALL 2010], tout en améliorant le confort intérieur [PAC 2012].

Malgré ces avantages, des freins subsistent à la diffusion de cette pratique constructive, comme notamment la faible résistance mécanique et rigidité de la terre crue compressée. La stabilisation de ce matériau par l'addition de liants chimiques (ciment ou chaux) permet d'en améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité [WAL 2000 ; JAY 2007]. Cependant ces ajouts contrebalancent les bénéfices environnementaux de la terre crue et limitent sa recyclabilité après démolition. De plus, actuellement la construction en blocs de terre est principalement fondée sur des pratiques empiriques et une connaissance heuristique.

Le but de cette étude est d'asseoir ces connaissances empiriques par un socle de connaissances scientifiques basé sur la mécanique des sols. Une procédure de compactage à haute pression est développée afin de réaliser des blocs dont les performances sont comparables à ceux à base de terre crue compressée stabilisée. La méthode de compactage proposée est basée sur deux principes géotechniques :

Tout d'abord, l'application d'une contrainte totale à un sol a pour première conséquence la réduction du volume des pores occupé par l'air, ce qui mène à l'augmentation du degré de saturation du sol même. La situation limite saturation du sol est atteinte lorsque tous les pores sont totalement remplis d'eau. Ainsi, la contrainte totale appliquée à un sol saturé correspond à la contrainte effective agissant sur le squelette solide si la surpression d'eau interstitielle dans les pores générée durant le chargement est dissipée. À son tour, la surpression d'eau est dissipée que si le sol peut se consolider, c'est-à-dire si l'eau des pores peut être drainée sous charge constante.

Deuxièmement, la densité sèche d'un sol augmente avec l'énergie de compactage. Aussi, l'augmentation des pressions de compactage améliore généralement les propriétés mécaniques.

Dans cette étude, la procédure de compactage est appliquée à trois niveaux de pression et les échantillons produits sont caractérisés afin d'évaluer l'influence de ce paramètre.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Matériau

Le matériau utilisé dans cette étude (mélange de sable et d'argile) provient d'une usine de briques de la région de Toulouse, France. Le tableau 1 récapitule ses principales propriétés. La distribution granulométrique a été déterminée par deux méthodes complémentaires : le tamisage par voie humide et la sédimentation, respectivement selon les normes XP P94-041 [AFNOR 1995] et NF P 94-057 [AFNOR 1992]. Les propriétés plastiques de la fraction fine, particules de taille inférieure à 400 μm , ont été mesurées comme définies dans la NF P94-051 [AFNOR 1993]. En particulier, la limite liquide (w_L) et l'indice de plasticité (I_p) sont déterminés comme la moyenne de quatre tests indépendants. La masse volumique des particules solides (G_s) a été mesurée en utilisant un pycnomètre (NF P 94-054 [AFNOR 1991]).

La distribution granulométrique et les propriétés plastiques des sols utilisés pour la construction en terre crue doivent répondre à des exigences spécifiques [JIM 2007]. La figure 1 compare la distribution granulométrique du matériau ici utilisé aux fuseaux de variations de distributions admissibles tels que fixés par trois guides de

recommandations pour la fabrication de briques de terre crue compressée [AFNOR 2001 ; CRATerre EAG 1998 ; MOPT 1992].

Tableau 1. Propriétés du matériau utilisé.

Distribution granulométrique			Propriétés plastiques	
Gravier	> 2 mm	0,4 %	Limite liquide, w_L (%)	33,0 %
Sable	0,063 – 2 mm	40,4 %	Limite plastique, w_P (%)	20,1 %
Limon	0,002 – 0,063 mm	42,9 %	Indice de plasticité, I_p (%)	12,9 %
Argile	< 0,002 mm	16,3 %	Indice d'activité, A_c (-)	0,79
Masse volumique des particules solides				
G_s (-)	2,66			

D'après la figure 1, le matériau utilisé pour cette étude se situe à proximité de la limite la plus fine admissible. De plus, dans le cas de terre crue non stabilisée (c'est-à-dire de terre crue compressée sans addition de ciment ou de chaux), la fraction fine joue le rôle clef de liant entre les grains de plus grande taille [KOU 2009], et doit pour cela satisfaire à des critères spécifiques pour assurer un niveau de cohésion satisfaisant.

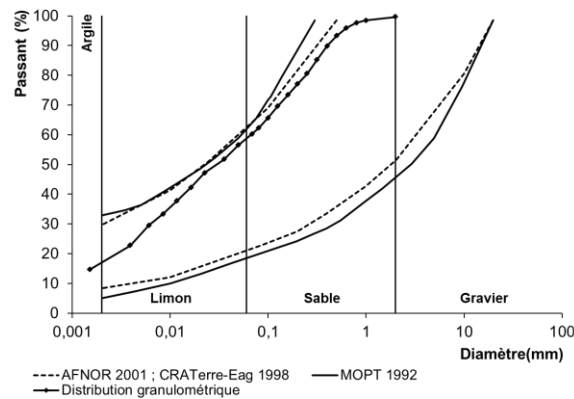


Figure 1. Distribution granulométriques et recommandations.

La figure 2 présente l'indice de plasticité en fonction de la limite de liquidité. Les recommandations y définissent des cartes de plasticité, domaines de validité des sols en vue d'une utilisation comme matériau de construction [AFNOR 2001, CRATerre-Eag 1998 et MOPT 1992]. En y portant les résultats des essais de plasticité menés sur le matériau d'étude, on en déduit sa classification comme argile inorganique de plasticité moyenne selon le système de classification unifiée des sols de l'USCS (Unified Soil Classification System). Ce matériau se situe bien dans une région admissible pour constituer des blocs de terre crue compressée. De plus, l'indice d'activité de l'argile, A_c , est ici égal à 0,79. Cette valeur permet de classer la fraction argileuse de ce matériau comme normalement active [SKE 1953], ce qui corrobore son analyse minéralogique puisque principalement composée d'illite et en faibles quantités de montmorillonite. En effet, les argiles illitiques sont organisées en triple feuillets et présentent un faible gonflement en présence d'eau. Pour cette raison, ce type d'argile est privilégié pour la construction en terre crue car elle confère des liaisons fortes entre les grains sans induire de variations volumiques lorsqu'exposée à l'eau [DIE 2002].

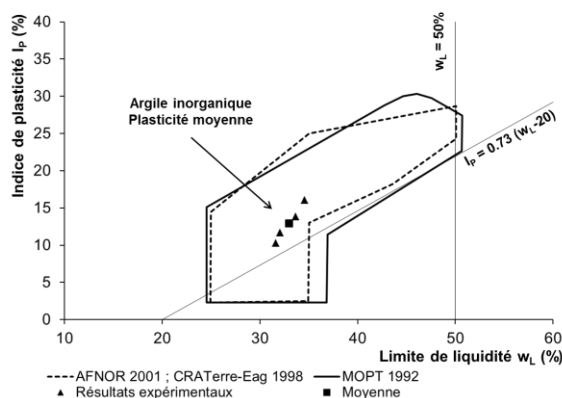


Figure 2. Valeurs expérimentales et carte de plasticité.

2.2. Méthode de compaction et préparation des échantillons

Les échantillons de terre crue ont été compactés à trois niveaux de pression différents : 25, 50 et 100 MPa. Le niveau le plus faible appliqué ici correspond au maximum des presses commerciales actuellement disponibles sur le marché et le niveau le plus élevé à la valeur limite de la presse d'essai utilisée. Avant compaction, 500 grammes de matériau sont mélangés à une quantité déterminée d'eau dans un malaxeur de type planétaire pendant 15 minutes. Cette durée est suffisante pour assurer une bonne homogénéité du mélange [KOU 2009]. L'échantillon humide est ensuite placé dans un milieu étanche pour empêcher toute perte d'eau pendant 24 heures. Cette étape permet la redistribution homogène de la teneur en eau. Pour finir, le matériau humide est introduit dans un moule cylindrique creux, et compacté en appliquant le niveau de pression fixé par une presse de capacité 250 kN. Une attention particulière doit être portée au dimensionnement de ce moule, et plus particulièrement au regard de deux contraintes :

Le moule doit être suffisamment solide pour résister aux pressions élevées exercées par le matériau lorsqu'il est comprimé à l'intérieur.

Le moule doit permettre à l'eau de s'écouler aussi facilement que possible du matériau lors de la charge. Ceci est primordial puisque le volume des pores est réduit lors du compactage, ils peuvent alors se saturer en eau avec pour conséquence un excès de pression interstitielle. Afin que la contrainte appliquée soit convertie en contrainte effective, les surpressions d'eau interstitielle doivent être dissipées au cours d'une phase de consolidation où l'eau s'écoule du matériau sous charge. La durée de cette phase de consolidation dépend de la perméabilité et de la rigidité du matériau compacté, mais aussi de la longueur des chemins de drainage.

Un moule a donc été spécialement développé pour cette étude. Il consiste en un cylindre creux d'acier inoxydable (diamètre extérieur 170 mm, diamètre intérieur 50 mm et hauteur de 200 mm). Les 60 mm d'épaisseur de ce moule lui permettent de résister à la pression latérale développée par le matériau au cours du compactage. Le matériau est compacté verticalement en partie haute et en partie basse au moyen de deux pistons cylindriques en aluminium. Cette compression à double piston réduit les frottements entre l'échantillon et le moule et ainsi augmente l'uniformité des niveaux de contrainte dans le matériau. Deux disques en aluminium perforés sont placés entre les surfaces de l'échantillon et les pistons pour améliorer le drainage de l'eau contenue dans les pores pendant la consolidation. De part et d'autre de ces disques, du papier filtre permet de retenir les fines particules entraînées par l'eau interstitielle. Enfin, les surfaces externes des pistons sont rainurées pour créer un chemin préférentiel d'évacuation de l'eau drainée vers l'extérieur du moule. La conception de ce moule favorise donc au maximum le drainage de l'eau interstitielle pendant le compactage pour accélérer le temps de consolidation.

La pression de compactage est appliquée à raison de 5 MPa.s^{-1} jusqu'à atteindre le niveau déterminé, puis la pression est maintenue constante et les déplacements verticaux enregistrés. La durée de consolidation augmente avec la teneur en eau et la pression de compactage. La consolidation est considérée achevée quand la vitesse de déplacement est inférieure à $0,01 \mu\text{m.s}^{-1}$. Cette vitesse est déterminée à partir de la pente de la partie linéaire finale de la courbe déplacement-temps, lorsque cette courbe s'apparente à une droite pendant au moins une heure (figure 3). Une étude détaillée des phases de consolidation et de leur durée en fonction de la teneur en eau et de la contrainte de compactage est à envisager. Toutefois, cette thématique ne fait pas partie des objectifs de cet article et sera abordée ultérieurement.

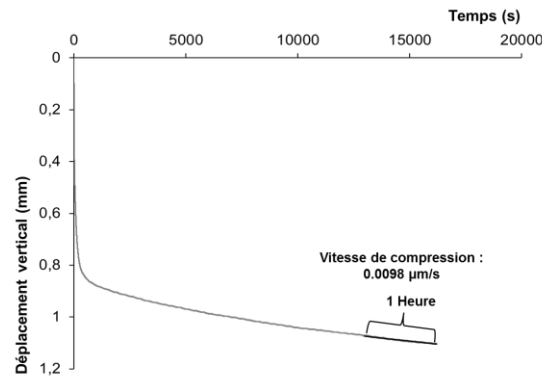


Figure 3. Déplacement vertical en fonction du temps.

La figure 4 représente la densité sèche en fonction de la teneur en eau des différents échantillons testés ainsi que la courbe d'interpolation pour chaque niveau de compactage (25, 50 et 100 MPa). Il est à souligner que ces courbes correspondent à des niveaux de compactage bien au-delà des valeurs habituelles obtenues par l'essai Proctor standard ou modifié [AFNOR 1999], non approprié pour compacter des sols à des niveaux assurant des propriétés mécaniques satisfaisantes du point de vue de la construction [MES 1999].

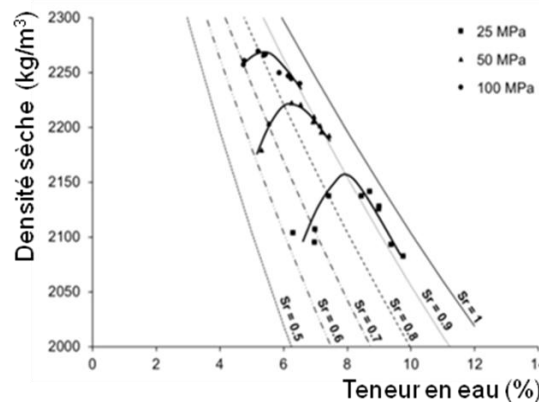


Figure 4. Courbes de compactage pour 25, 50 and 100 MPa.

Les échantillons compactés pour les plus fortes teneurs en eau (à droite de la courbe de compactage), sont caractérisés par des degrés de saturation supérieurs ou égaux à 90%. Dans ces échantillons, la plupart des pores ont été saturés au cours du compactage, comme confirmé par le drainage d'eau observé entre le piston et le moule à la fois en haut et en bas de l'échantillon - ce qui témoigne de plus de l'efficacité du double compactage. Toutefois, aucun drainage d'eau n'a été observé lors du compactage des échantillons les plus secs, dont le degré de saturation est faible, soit compris entre 60 et 80%. La figure 4 montre aussi que l'augmentation de la pression de compactage entraîne une augmentation du maximum de densité sèche pour la teneur en eau optimale. L'augmentation de densité avec la pression de compactage n'est pas linéaire : la variation de densité pour un changement de pression de 25 à 50 MPa est supérieure à celle observée quand la pression varie de 50 à 100 MPa. En d'autres termes, l'efficacité du compactage diminue à mesure que la pression augmente.

Après compactation, tous les échantillons sont placés dans une enceinte climatique (25°C, 62% H.R.). L'équilibre hydrique est atteint environ après 15 jours. Cette première étape d'équilibrage est nécessaire afin de prévenir de l'influence des conditions hydriques initiales sur les mesures des propriétés mécaniques [BEC 2012 ; BUI 2014].

3. Résultats

3.1. Détermination du module d'Young

Le module d'Young est mesuré lors de cinq cycles consécutifs de chargement/déchargement en compression uniaxiale ($0,005 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$), entre 1/9 et 1/3 de la résistance maximale en compression du matériau, déterminée

préalablement. Le comportement du matériau pendant les cycles de chargement/déchargement est de type élasto-plastique [KOU 2009], et présente une réponse totalement hystérétique. Les déformations irréversibles s'opèrent en phase de chargement alors qu'en phase de déchargement le comportement du matériau est essentiellement élastique quoique non-linéaire. Ainsi, la valeur du module d'Young pour chaque échantillon est déterminée comme la moyenne des pentes de déchargement des cinq cycles.

Les déformations axiales ont été mesurées par deux types de transducteurs différant de par leur ouverture, 10 et 50 mm, afin de vérifier l'homogénéité des déformations axiales sur la hauteur de l'échantillon. La figure 5 représente l'évolution du module d'Young en fonction de la densité sèche pour les échantillons préparés aux trois niveaux de compactage différents. La courbe de tendance y est représentée en noir et les deux lignes en pointillés limitent la zone de variation des valeurs autour de cette tendance.

D'après ces résultats, les échantillons compactés à 100 MPa sont en moyenne 50% plus rigides que ceux compactés à 25 MPa. De plus, la valeur du module d'Young augmente avec la densité sèche, et ce plus que linéairement. On peut s'attendre par conséquent à ce que le module d'Young continue à croître pour des densités sèches supérieures à $2270 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, valeur limite atteinte dans cette étude. Evidemment, il existe une limite à la densité sèche maximale qui peut être obtenue par compactage mécanique : elle correspond au cas où la porosité s'annule et la densité du matériau compacté devient égale à la masse volumique des grains solides, soit dans le cas présent environ $2660 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

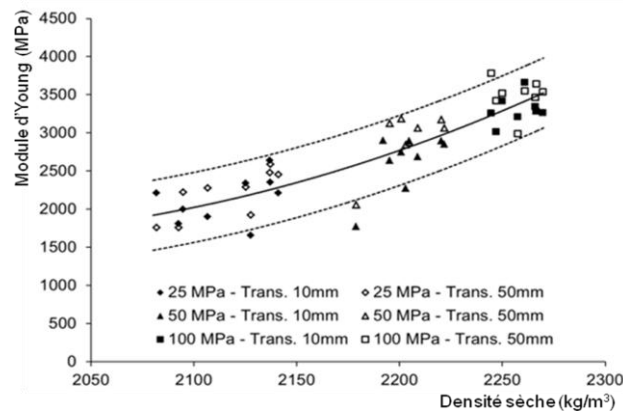


Figure 5. Variation du module d'Young en fonction de la densité sèche.

3.2. Résistance mécanique en compression

Un élanement insuffisant et le développement de frottements entre les plateaux de la presse et l'échantillon peuvent induire des erreurs dans l'évaluation de la résistance mécanique [MOR 2007 ; CIA 2012]. Dans cette étude, les échantillons cylindriques ont un diamètre de 50 mm : une hauteur de 100 mm est choisie afin d'atteindre un élanement de 2, considéré comme suffisant pour éviter toutes erreurs. Du Téflon en spray est pulvérisé sur les surfaces des échantillons en contact avec les plateaux de la presse pour prévenir de tous frottements. Lors de ces essais de compression uniaxiale, la presse est pilotée en déplacement. Pour fixer la vitesse de déplacement, des tests préliminaires ont été menés à des vitesses variant entre 0,01 [KOU 2009] et $0,001 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, vitesse minimale du dispositif. Il a été observé que, dans cette plage d'étude, la vitesse de déplacement n'affecte pas l'intensité du pic de compression mesuré mais la forme de la courbe contrainte/déformation [BUI 2014]. La figure 6 représente deux essais préliminaires menés à deux différentes vitesses ($0,01$ et $0,001 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) sur des échantillons préparés dans les mêmes conditions de teneur en eau et contrainte de compactage. En termes de résistance mécanique, la différence entre les deux essais est de 6%, de l'ordre de grandeur de la dispersion des résultats des essais : cette grandeur ne semble donc pas affectée par la vitesse de chargement. Il a été observé des instabilités, présentes sous forme de pics successifs sur la courbe de la figure 6, lors du chargement mais uniquement pour l'essai mené à $0,01 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Donc, pour des vitesses plus rapides, l'apparition de petites instabilités le long de la partie chargement de la courbe contrainte/déformation témoignent de la transition vers un comportement fragile. Ainsi, pour s'affranchir de ces instabilités, la vitesse de déplacement la plus faible ($0,001 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) a été appliquée pour cette campagne expérimentale.

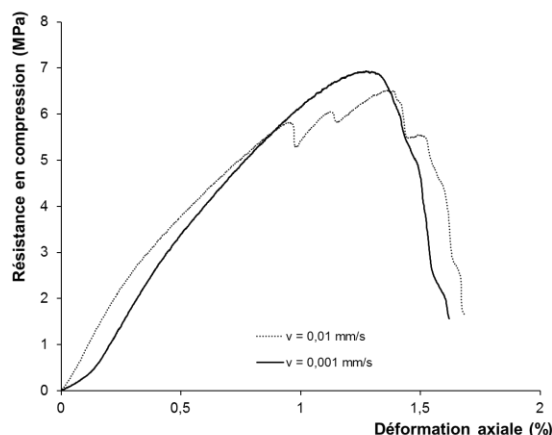


Figure 6. Effet de la vitesse de déplacement sur les essais de résistance en compression.

La figure 7 présente la résistance mécanique en compression des échantillons en fonction de leur densité sèche, pour les trois niveaux de compactage. La courbe de tendance par contrainte de compactage et le fuseau de variations des résultats y sont aussi représentés. De la même manière que pour le module d'Young, la résistance mécanique augmente plus que linéairement avec la densité. En moyenne, la résistance augmente de plus de 50% lorsque la pression de compactage passe de 25 à 100 MPa. Les valeurs de teneur en eau après compactage sont portées à côté de chaque point expérimental. Bien qu'une dépendance bien définie entre la pression de compactage et la densité sèche peut être déduite à partir des données, aucune relation directe et simple entre la pression et la teneur en eau ne peut être établie.

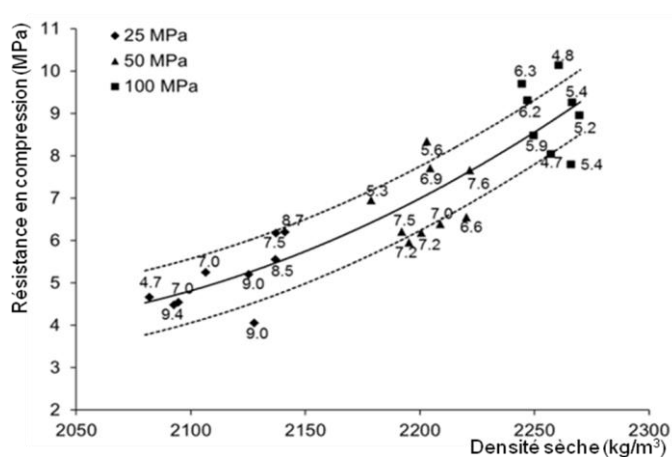


Figure 7. Variation de la résistance en compression en fonction de la densité sèche.

Tableau 2. Comparaison de résistance mécaniques de différents matériaux de construction.

Matériaux	Résistance mécanique en compression (MPa)	
	Min.	Max.
Terre crue compactée non stabilisée	4,1	10,2
Terre crue compactée stabilisée [Guettala 1997]	5,2	12,9
Briques de terre cuite standard pour maçonnerie [ASTM C270]	6,9	27,6

Dans le cas de la terre crue non stabilisée et compactée selon la méthode exposée dans cette étude, les valeurs minimale et maximale de résistance mécanique obtenues correspondent respectivement au niveau de pression de

compactage le plus faible et le plus important. Les caractéristiques mécaniques mesurées sur les échantillons de cette étude peuvent être comparées aux résistances mécaniques d'autres matériaux de construction (tableau 2), par exemple à base de terre compressée stabilisée (entre 5,2 et 12,9 MPa, [GUE 1997]). Cependant, le taux de stabilisation en ciment employé (10% de la masse) est tel que tous les bénéfices environnementaux à utiliser de la terre crue sont contrebalancés par les charges environnementales de cette addition [BUI 2014]. Dans le cas des briques de maçonnerie traditionnelles en terre cuite leur résistance varie sur une large plage, entre 6,9 et 27,6 MPa [ASTM C270], qui comprend la résistance du matériau non stabilisé compacté à la contrainte la plus élevée de cette étude. Ainsi, ce dernier matériau présente des propriétés en conformité avec les performances exigées pour les briques de maçonnerie [ASTM C270].

4. Conclusions

Dans le cadre de cette étude, un nouveau procédé de compactage a été élaboré pour la fabrication des échantillons de terre compactée. Les innovations principales apportées par ce procédé consistent en l'application d'une contrainte de compactage très élevée pendant une durée qui correspond à la dissipation des surpressions de l'eau interstitielle générées par le compactage lui-même. Trois niveaux de compactage (25, 50 et 100 MPa) ont été analysés afin d'étudier les effets de la contrainte de compactage sur les propriétés mécaniques. Les résultats ont montré que le procédé de compactage proposé améliore le comportement mécanique du matériau et en particulier, la rigidité et la résistance en compression augmentent avec une tendance plus que linéaire en fonction de la densité sèche. De plus, la résistance mécanique qui a été mesurée est comparable avec celle d'autres matériaux de construction, comme la terre crue stabilisée ou les briques en terre cuite pour la maçonnerie.

Le procédé de compactage proposé pourrait entraîner une réduction significative de la porosité du matériau en diminuant ainsi sa perméabilité : la sensibilité aux infiltrations de l'eau pourrait donc être diminuée. L'analyse de la porosité du matériau et l'influence sur sa longévité représentent les perspectives de cette étude. De plus, une analyse du cycle de vie complète de ces briques réalisées selon cette méthode est en cours afin de quantifier les impacts environnementaux du compactage à haute pression et de permettre de comparer ce produit avec les matériaux de construction (e.g. briques en terre crue stabilisée et briques en terre cuite).

5. Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer leurs remerciements à la Région Aquitaine et à l'Agglomération Côte Basque Adour pour leur soutien dans cette étude.

6. Bibliographie

- [AFNOR 1991] AFNOR. NF P 94-054; Sols: reconnaissance et essais – Détermination de la masse volumique des sols fin en laboratoire - Méthodes de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau. AFNOR, 1991.
- [AFNOR 1992] AFNOR. NF P 94-057. Sols: reconnaissance et essais – Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation. AFNOR, 1992.
- [AFNOR 1993] AFNOR. NF P 94-051; Sols: reconnaissance et essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau. AFNOR, 1993.
- [AFNOR 1995] AFNOR. XP P 94-041. Sols: reconnaissance et essais – Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide. AFNOR, 1995.
- [AFNOR 1999] AFNOR. NF P 94-093. Sols: reconnaissance et essais – Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié. AFNOR, 1999.
- [AFNOR 2001] AFNOR. XP P13-901; Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : Définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception. Saint-Denis La Plaine Cedex: AFNOR, 2001.
- [ASTM C270] American Society for Testing and Materials, ASTM. Standard Specification for Mortar for Unit Masonry.

- [ALL 2010] Allinson D., Hall M., Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK. *Energy and Buildings*, 2010, 42, 845-852.
- [BEC 2012] Beckett C. T. S., Augarde C. E., The effect of humidity and temperature on the compressive strength of rammed earth, In *Proceedings of 2nd European Conference on Unsaturated Soils*, 287-292, Naples, Italy, 20-22 June 2012, Springer, ISBN: 978-3-642-31342-4.
- [BUI 2014] Bui Q.-B., Morel, J. C., Hans S., Walker, P., Effects of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth, *Construction and Building materials*, 2014, 54, 163-169.
- [CIA 2012] Ciancio D., Gibbings J., Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples, *Construction and Building Materials*, 2012, 28, 294-304.
- [CRATerre-EAG 1998] CRATerre-EAG, CDI, Compressed earth blocks: Standards – Technology series No.11, Brussels: CDI, 1998.
- [DIE 2002] Dierks K., Ziegert C., Neue Untersuchungen zum Materialverhalten von Stampflehm. In Steingass, P. : *Moderner Lehm* 2002, Tagungsband, Fraunhofer IRB.
- [GUE 1997] Guettala A, Guenfoud M., Béton de terre stabilisée propriétés physico-mécanique et influence des types d'argiles, *Revue La Technique Moderne*, Paris, 1997, N°1-2, 21-26.
- [JAY 2007] Jayasinghe C., Kamaladasa N., Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls, *Construction and Building Materials*, 2007, 21, 1971-1976.
- [JIM 2007] Jiménez Delgado M.C., Cañas Guerrero I., The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review, *Construction and Building Materials*, 2007, 21, 237-251.
- [KOU 2009] Kouakou C.H., Morel J.C., Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder, *Applied Clay Science*, 2009, 44, 27-34.
- [MES 1999] Mesbah A., Morel J.C., Olivier A., Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents, *Materials and Structures/ Matériaux et Construction*, 1999, 32, 687-694.
- [Mopt 1992] MOPT. Bases Para el Diseño y Construcción con Tapial. Madrid, Spain: Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 1992.
- [MOR 2001] Morel J.C., Mesbah A., Oggero M., Walker P., Building houses local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction, *Building and Environment*, 2001, 36, 1119-1126.
- [MOR 2007] Morel J.C., Pkla A., Walker P., Compressive strength testing of compressed earth blocks, *Construction and Building Materials*, 2007, 21, 303-309.
- [PAC 2012] Pacheco-Torgal F., Jalali S., Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction, *Constructions and Building Materials*, 2012, 29, 512-519.
- [SKE 1953] Skempton A.W., The colloidal "Activity" of clays. *Proceedings of the 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1953, 1 57-60.
- [WAL 2000] Walker P., Strength and durability testing of earth blocks, In: *Proceedings of the 6th international seminar on structural masonry for developing countries*, Bangalore, India, 2000, 111-118