
Modélisation numérique de structures en pisé : analyses et recommandations

R. El Nabouch¹, Q.-B.Bui^{1,*}, P.Perrotin¹, O.Plé¹, J.-P.Plassiard¹

¹ Université Savoie Mont Blanc, CNRS, LOCIE, F-73000 Chambéry, France

* Quoc-Bao.BUI@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ. *L'utilisation du pisé dans la construction s'avère aujourd'hui intéressante dans la nécessaire démarche de bâtir durable. Ce matériau, non transformé industriellement, est porteur d'une énergie grise proche de zéro. De plus, les constructions en pisé apportent un bon confort d'habitation grâce au comportement hygrothermique naturel des murs en terre. Ces remarques participent à un regain d'intérêt pour ce matériau comme le montrent les récentes recherches sur le sujet. Pourtant, des verrous scientifiques persistent dans ce domaine. Peu d'études concernent, en particulier, l'évaluation des performances mécaniques sous sollicitations dynamiques.*

Cet article présente, dans un premier temps, une revue d'études existantes. Dans un deuxième temps, des simulations numériques ont été menées à l'aide du code d'éléments finis (ASTER). La loi de comportement Drucker-Prager avec écrouissage a été retenue pour les simulations. La pertinence de ce modèle et les paramètres prépondérants ont également été mis en avant par comparaison avec des données expérimentales issues de la littérature.

ABSTRACT. *Rammed earth (RE) material presents actually attracting interests in the context of sustainable development. In addition to low embodied energy, rammed earth constructions present interesting living comfort thanks to the substantial thermal inertia and the natural "moisture regulator" of the RE walls. This is why several researches have been recently carried out to study this material. However, comparing to other conventional materials (e.g. concrete), there is not yet sufficient results in the literature which enable to perform advanced studies in the case of extreme loadings (e.g. earthquake).*

The paper presents firstly a review of the existing studies on RE, from the material characteristics to the structural behavior, from the experimental results to the numerical models. Secondly, numerical simulations using a finite element code (ASTER) are engaged. The Drucker-Prager elasto-plastic model is adopted. Experimental results, coming from the literature, are used to calibrate the numerical simulation. The variability of the parameters and the relevance of the used model will be discussed.

MOTS-CLÉS : *Le pisé, caractéristiques mécaniques, modélisation numérique, loi de Drucker-Prager.*

KEY WORDS: *Rammed earth, mechanical characteristics, numerical modeling, Drucker-Prager model.*

1 Introduction

Les bâtiments construits avec des matériaux locaux présentent aujourd'hui un intérêt dans la logique d'un développement durable. En effet, généralement naturels, ces matériaux peuvent être utilisés sans effets négatifs sur l'environnement. Les matières premières sont extraites directement sur le site de la construction (ou près du site), comme le sol ou les pierres. Par la suite, ils sont transformés en matériaux de construction avec une très faible consommation d'énergie de fabrication.

Plusieurs intérêts résident dans l'utilisation des matériaux locaux. Ils concernent, l'écologie, la durabilité, le confort et les aspects socio-économiques. En premier lieu, l'utilisation de tels matériaux permet de réduire l'énergie provenant de l'extraction, du transport, et de la fabrication. Par conséquent ils génèrent une énergie grise proche de zéro. Deuxièmement, l'utilisation de ces matériaux favorise l'emploi local. Ils présentent donc un intérêt socio-économique évident.

L'un de ces matériaux, utilisé en construction depuis des siècles et qui fait partie de notre patrimoine historique, est le pisé - objet de cette présente recherche. L'objectif principal de cet article est d'apporter des connaissances précises sur le comportement et les caractéristiques mécaniques de ce type de matériau. La première partie de cet article sera principalement dédiée à l'analyse d'études antérieures menées sur le matériau pisé. Certaines directives et recommandations relatives à ce matériau et à son utilisation dans la construction seront également présentées.

Dans une deuxième partie des simulations numériques menées sur des murets en pisé et des éprouvettes de pisé seront présentées. Le code de calcul aux éléments finis ASTER a été utilisé. Des essais de compression axiale et de compression diagonale ont été modélisés. La loi de comportement retenue pour ces simulations est la loi Drucker Prager. Par la suite, le rôle et l'importance des différents paramètres mécaniques seront discutés.

2 Histoire du pisé

Avec d'autres formes de construction en terre, le pisé a une histoire longue et continue dans de nombreuses régions du monde. Disponible et recyclable, ce matériau présente un comportement thermique intéressant. [AVR 08] estime que plus de la moitié de la population mondiale vit dans des constructions en terre. Un grand nombre de ces constructions se trouvent en France, en Allemagne, en Espagne, en Afrique du Nord, en Australie, en Amérique du Nord et du Sud et en Asie (Chine, Japon ...).

Malgré les avantages de ce matériau de construction, certains pays où la population vit encore dans des bâtiments en terre présentent des risques sismiques importants. Ayant des performances mécaniques modérées, une meilleure connaissance de son comportement dans la construction est nécessaire.



Figure 1. Une construction en pisé à l'école Mablong en Afrique du Sud (www.specifile.co.za/) (a); Maison traditionnelle en pisé en Auvergne en France (b).

2.1 Le matériau pisé

Les murs en pisé sont fabriqués par compactage d'un sol entre des coffrages en bois ou en acier. Le liant principal est l'argile qui confère au matériau sa cohésion. La terre est compactée en couches successives d'environ 15 cm à l'aide d'une dame manuelle ou pneumatique. La hauteur de chaque couche après le compactage est d'environ 10 cm. L'épaisseur moyenne des murs en pisé en Europe est de 50 cm. La Figure 1(a) montre un chantier de construction en pisé à l'école Mablong en Afrique du Sud.

Deux types de pisé peut être distingués: pisé non-stabilisé et pisé stabilisé. Le pisé non-stabilisé est fabriqué sans ajout de liants hydrauliques (Figure 1(b)). Le liant unique dans ce cas là est l'argile. Le pisé stabilisé est additionné d'un liant hydraulique (chaux ou ciment) pour augmenter sa durabilité et ses performances mécaniques. La dame manuelle traditionnelle est aujourd'hui remplacée par la dame pneumatique qui augmente la rapidité de fabrication et la densité du matériau. En raison de la conservation et de la réhabilitation du patrimoine historique, ce matériau fait l'objet actuellement de nombreuses recherches scientifiques.

3 Normes des construction en terre.

Certains pays ont déjà leurs normes de construction en terre. Pourtant, dans la plupart des cas, ces normes sont établies en se basant sur les normes existantes des matériaux industriels comme le béton, à cause du manque d'études scientifiques spécifiques sur le sujet. Par conséquent, la validité de ce «transfert de normes» dans certains cas est questionable. Cette section fournit des exemples de directives et de codes que l'on retrouve dans certains pays du monde.

De nombreux pays ont adoptés des conceptions structurelles particulières et des recommandations pour le renforcement des bâtiments en pisé. En plus des exigences pour le coffrage et pour les méthodes de construction, des essais de traitement du matériau pisé ont été proposés. L'Australie, la Nouvelle-Zélande et le Mexique ont des règlements spécifiques sur les constructions en terre. Par exemple, le Manuel de construction en terre de l'Australie [WAL 02] énonce les principes sur la conception et les valeurs des paramètres mécaniques à prendre en compte pour le pisé. La Nouvelle-Zélande présente les règlements les plus avancés dans ce domaine. Certaines de ces valeurs pour le pisé sont résumées dans le Tableau 1. Les résultats sont très dispersés. Ils dépendent essentiellement de la nature des matériaux et de leur mise en œuvre.

Tableau 1. Valeurs de calcul recommandées pour le pisé.

Référence	Résistance à la compression (MPa)	Résistance en cisaillement (MPa)	Module de Young (MPa)
New Zealand code [NZS 98]	0,5	0,035	150
Australian Handbook [WAL 02]	0,4 à 0,6	0	500
New Mexico code [TIB 01]	2,07	-	-

4 Résultats bibliographiques

Avec un regain d'intérêt pour ce matériau, plusieurs études ont été réalisées récemment pour analyser les caractéristiques mécaniques du pisé.

Miccoli et al. [MIC 14a] ont récemment fait une étude sur le comportement mécanique du pisé en comparant trois matériaux en terre : maçonnerie en blocs de terre comprimée, pisé et torchis. Pour étudier le comportement en cisaillement de ces murs, un test de compression et un test diagonal de compression ont été menés. Les résultats des tests de compression, sur des murets de 500 mm (largeur) × 500 mm (hauteur) × 110 mm (épaisseur), ont montrés que c'était le pisé qui avait la plus grande résistance en compression (de l'ordre de 3,4 à 4,0 MPa). Dans une autre étude, Bui et al., [BUI 14] donnent des résultats expérimentaux sur les résistances à la traction. Dans cette recherche la rupture a été menée sur des murets de 1000 x 1000 x 300 mm³ fabriqués en laboratoire. La relation entre la résistance à la traction et la résistance à la compression est de l'ordre de $f_t = 0,11 \times f_c$ où f_c est la résistance à la compression. Des essais de compression dans la direction parallèle et perpendiculaire des couches compactées ont également été réalisés.

En ce qui concerne le module d'Young, plusieurs études ont été réalisées montrant que le module d'Young du pisé stabilisé peut varier de 100 MPa (vieux murs dans l'étude de [BUI 15a]) à 500 MPa (nouveaux murs dans l'étude de [BUI 09a]). Cependant, pour le pisé stabilisé, [MIC 14a] a obtenu des valeurs plus élevées de l'ordre de 4143 MPa. Un résumé des propriétés des matériaux pour des matériaux en terre trouvées dans la littérature est présenté dans Tableau 2. Une grande dispersion est notée. Cela est dû à de nombreux facteurs comme les procédures d'essai, la fabrication, et le type de sol. Ces résultats rejoignent les valeurs règlementaires adoptés dans les règlements ([NZS 98], [WAL 02], [TIB 01]).

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques de pisé.

Dimensions (cm) des éprouvettes (largeur × épaisseur × hauteur)	Résistance à la compression (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (MPa)	Référence
20 × 20 × 40	1	0,17	500	[BUI 14]
Diamètre 10 × h = 20	2,46	-	160	[MAN 08]
10 × 10 × 10	0,5 à 1,3	-	-	[HAL 04]
50 × 11 × 50	3,73	-	4143	[MIC 14a]

5 Modélisation numérique

La plupart des études concernant la modélisation du pisé, dans la littérature, supposent des modèles très simplifiés qui adoptent des lois de comportement simplifiées. Certaines de ces études admettent une loi élastique linéaire isotrope [GOM 11] ou un comportement élastique parfaitement plastique pour décrire le comportement du pisé [NOW 11] et [JAQ 06]. Dans cet article, deux expériences différentes existantes dans la littérature sont modélisés en utilisant le code d'éléments finis (EF) Code Aster. Le premier modèle est un échantillon sous compression axiale et le second modèle est un mur testé en compression diagonale. Le pisé est considéré comme homogène et isotrope, le critère de Drucker-Prager est utilisé pour la modélisation.

5.1 La loi de Drucker-Prager

Le modèle de Drucker Prager est un modèle associé habituellement aux matériaux du sol ou aux géomatériaux. Comme la plupart des expériences montrent un comportement élasto-plastique [BUI 09b] pour le pisé, le modèle de Drucker-Prager est pertinent. Le critère de plasticité associée :

$$F(\sigma, p) = \sigma_{\text{eq}} + \alpha I_1 - R(p) = 0 \quad [1]$$

Où α est un coefficient donné, $I_1 = \text{Tr}(\sigma)$. R est une fonction de la déformation plastique cumulée p (fonction d'écroutissage) de type linéaire ou parabolique. L'écroutissage parabolique choisi pour notre modélisation, est définie par :

$$R(p) = \sigma_y \left(1 - \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma_{y\text{ultm}}}{\sigma_y}} \frac{p}{p_{\text{ultm}}} \right)^2 \right) \quad \text{si } p \in [0, p_{\text{ultm}}] \quad [2]$$

$$R(p) = \sigma_{y\text{ultm}} \quad \text{si } p > p_{\text{ultm}} \quad [3]$$

p_{ultm} désigne la déformation plastique cumulée ultime et $\sigma_{y\text{ultm}}$ désigne la contrainte ultime. Les autres paramètres retenus dans ce modèle sont :

$$\text{La contrainte plastique } \sigma_y = \frac{6c \cos(\varphi)}{3 - \sin(\varphi)} \text{ et le coefficient de dépendance en pression : } \alpha = \frac{2 \sin(\varphi)}{3 - \sin(\varphi)}$$

Où φ est l'angle de frottement et c la cohésion.

5.2 Calibration des modèles et résultats

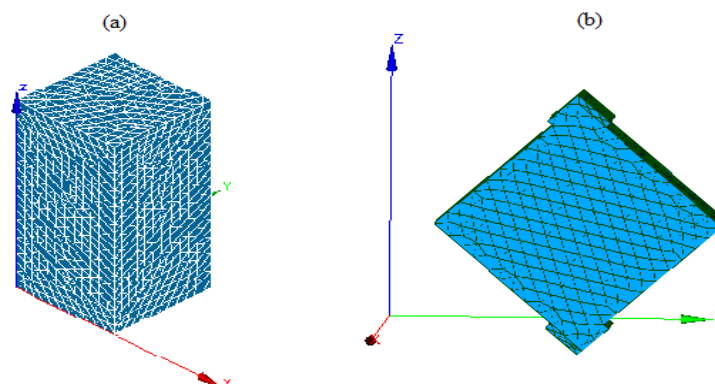


Figure 2. Modèle numérique : (a) compression axiale et (b) test diagonal de compression.

5.2.1 Essai de compression axiale :

La figure 2(a) montre le modèle numérique de l'échantillon testé sous compression axiale. Les résultats expérimentaux de [BUI 09b] sont utilisés pour calibrer le modèle numérique. Les dimensions moyennes des spécimens sont $(200 \times 200 \times 400) \text{ mm}^3$.

Dans cette partie l'influence de la cohésion et du frottement est étudié. Dans la modélisation de l'essai de compression, le module d'Young est supposée égal à 100 MPa et le coefficient de Poisson à 0,23 [BUI 13]. Pour notre étude, l'angle de frottement est compris entre $36,8^\circ$ et 45° . La Figure 3 montre les résultats obtenus à partir des tests et les simulations numériques correspondantes en termes de charge verticale et de déplacement vertical pour la compression axiale. L'angle de frottement et la cohésion affecte la charge ultime, lorsque ces deux paramètres augmentent, un effet plus important sur la charge ultime peut être observée. L'hypothèse d'un module d'Young égale à 100 MPa semble vérifiée car les rigidités initiales numériques et expérimentales sont très comparables. Cependant, les simulations numériques pour le test de compression, pour cet échantillon, montrent une transition moins progressive entre le comportement élastique et plastique. Les résultats pour les deux angles de frottements ($36,8^\circ$ et 45°) semblent adéquats pour l'obtention de la charge de compression ultime. Pour $36,8^\circ$, la cohésion est égale à 250 kPa ce qui est important pour ce type de matériau. La meilleure estimation est donnée pour 45° ce qui correspond à une valeur de cohésion, pour le pisé, entre 150 et 200 kPa. Ce résultat est en accord avec ceux de [BUI 14] qui a déterminé la cohésion à partir de la théorie de Morh-Coulomb et une cohésion égale à $0.14 \times f_c$ qui correspond à 140 kPa dans notre cas.

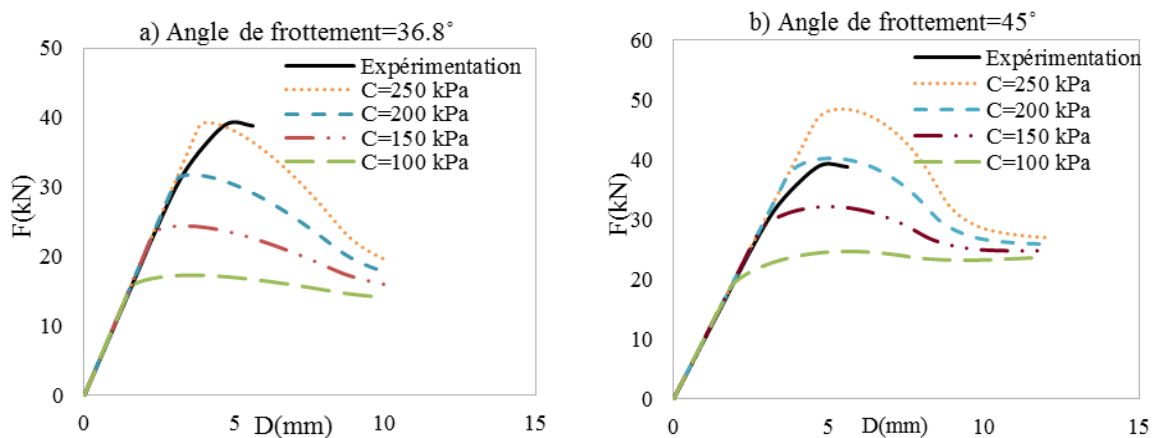


Figure 3. Comportement du modèle sous compression axiale pour un angle de frottement de $36,8^\circ$ (a) et de 45° (b).

5.2.2 Essai diagonale de compression

Les résultats des tests de compression diagonale obtenue dans [SIL 13] sont utilisés pour identifier les paramètres du modèle de Drucker-Prager. Le mur GSRE_7.5 ($550 \times 550 \times 200$) mm³ a été choisi. La figure 2(b) montre le modèle numérique pour l'essai de compression diagonale. Plusieurs maillages ont été essayés dans une étude préliminaire et ne montrent pas d'influences significatives sur les résultats. Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude étaient les suivants: résistance à la compression $f_c = 1,09 \text{ MPa}$, module d'Young $E = 2858 \text{ MPa}$, résistance au cisaillement $0,18 \text{ MPa}$ et module de cisaillement $G = 620 \text{ MPa}$. Ces valeurs sont supérieures aux valeurs que l'on obtient normalement pour le pisé, cela peut être dû au fait que le mur dans cette étude a été stabilisé par l'addition d'un liant géopolymérique. Cependant il convient de mentionner qu'il existe une enveloppe expérimentale des courbes de contrainte-effort de cisaillement ce qui signifie que certaines incertitudes existent pour la courbe choisie dans le processus expérimental.

La procédure de test est similaire à [AST 02]. Suite à la norme ASTM E519-02, la contrainte de cisaillement τ des spécimens est calculée de la façon suivante :

$$\tau = \frac{0.707 \times P}{A_n} \quad [4]$$

Où P est la charge appliquée et A_n la surface nette de l'échantillon. La déformation de cisaillement γ (distorsion) est obtenu par :

$$\gamma = \frac{\Delta v}{g_v} + \frac{\Delta h}{g_h} \quad [5]$$

Où Δv est le raccourcissement vertical du panneau, et Δh l'extension horizontale du panneau. g_v et g_h sont les longueurs initiales des jauges verticale et horizontale. La Figure 2(b) montre le modèle construit dans Aster. Afin d'évaluer l'influence des caractéristiques mécaniques, une étude paramétrique est effectuée. Dans cette partie de modélisation il est assumé de fixer la cohésion à une valeur précise et de faire varier l'angle de frottement. Admettant l'hypothèse de [BUI 14] que $c = 0,14 \times f_c$, une valeur de 150 kPa est obtenue, cette valeur de cohésion affecte la valeur ultime de contrainte de cisaillement en l'augmentant. Il est alors choisi de limiter cette valeur à 100 MPa, tandis que l'angle de frottement varie entre $36,8^\circ$ et 45° . La même étude est réalisée pour deux modules d'Young différents. Le premier module d'Young est égal à 2800 MPa. Il est obtenu à partir des essais de compression uniaxiale suivant [SIL 13]. Le deuxième module d'Young est égal à 1500 MPa. Il est obtenu en appliquant la théorie de l'élasticité à partir du module de cisaillement (620 MPa) obtenu expérimentalement sur le test diagonal de compression [SIL 13]. Sur les Figures 4 et 5, tous les modèles reproduisent la contrainte de cisaillement ultime à l'exception de la courbe qui correspond à un angle de frottement égale à 45° .

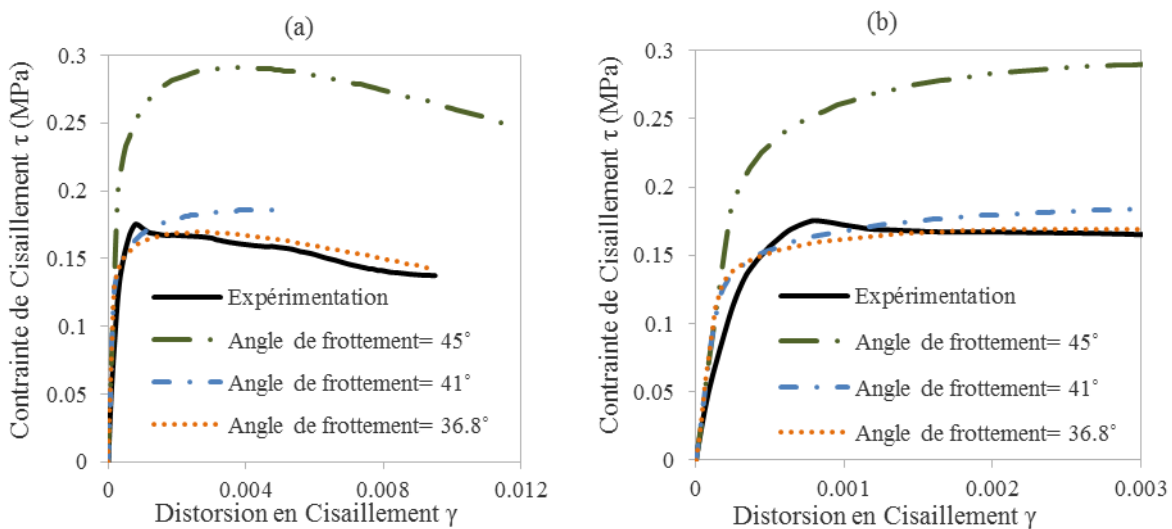


Figure 4. Résultats numériques et expérimentaux de l'essai de compression diagonale, pour $E=2800$ MPa (a); Zoom sur le comportement initial (b).

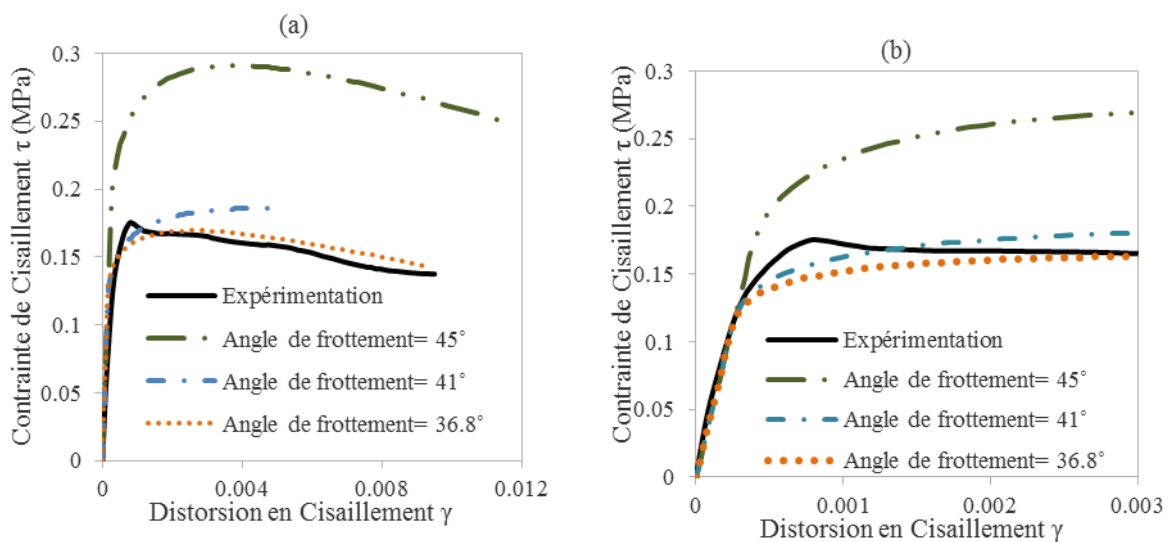


Figure 5. Résultats numériques et expérimentaux de l'essai de compression diagonale, pour $E=1500$ MPa (a); Zoom sur le comportement initial (b).

La Figure 6(a) présente les déformations principales maximales obtenues à partir d'un déplacement vertical imposé de 1 mm pour le modèle le plus adapté ($E = 1500$ MPa et un angle de frottement de 41°). Le modèle montre que les endommagements se concentrent dans le milieu du muret. Ce modèle permet de reproduire la zone de défaillance obtenu par l'expérience. Bien que le "pic de cisaillement" n'ait pas été reproduit par le modèle numérique, ce dernier est capable de reproduire la phase post-pic d'adoucissement du matériau. Il reproduit le comportement élasto-plastique du pisé dans ce cas.

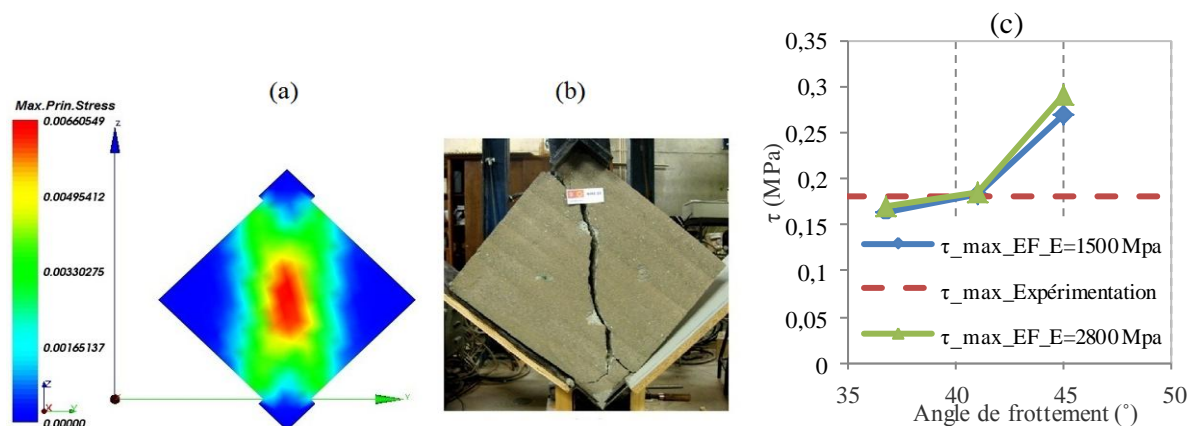


Figure 6. (a) Déformation maximale principale dans le modèle pour $E= 1500$ MPa; (b) Rupture de l'échantillon [SIL 13]; (c) Variation de la contrainte de cisaillement maximale en fonction de l'angle de frottement.

6 Conclusion

Le travail effectué dans cet article vise à présenter une étude bibliographique sur le pisé et à engager des discussions techniques sur la résistance du pisé et sur les paramètres importants. Un intérêt particulier est donné au mécanisme de rupture du matériau. Le comportement en compression du pisé est simulé en utilisant le critère de Drucker-Prager dans le code de calcul Aster. Les résultats numériques montrent un bon accord avec les résultats expérimentaux issus de la littérature. En ce qui concerne la simulation des essais de compression diagonale, les résultats de la courbe contrainte-déformation au cisaillement ont été comparés à celles obtenues expérimentalement.

Enfin la cohésion et l'angle de frottement ont été adaptés en comparant les résultats expérimentaux et numériques. Il est constaté que, pour la phase élastique, les courbes numériques et expérimentales montrent une bonne concordance. Au-delà de la phase élastique, l'étude révèle la limite du modèle dans la production d'une évolution moins progressive entre le comportement élastique et plastique. D'après les résultats obtenus dans cette étude et ceux d'autres études ([BUI 14], [BUI 15b], [MIC 14b]), la cohésion peut être prise entre $0,07$ et $0,1 \times f_c$. L'angle de frottement peut être pris aux environs de 40° . Les variations sont essentiellement dues aux processus de fabrication : teneur en eau, énergie de compactage et effet de confinement.

En se basant sur ces expériences, la loi de Drucker-Prager montre un comportement non linéaire similaire au comportement du pisé. Ce modèle sera utilisé pour la modélisation d'essais expérimentaux sur murets. Comme indiqué plus haut, d'autres tests sur le pisé seront menés pour réduire la variabilité des paramètres intrinsèques. La prochaine démarche expérimentale consistera à construire plusieurs murets avec différents rapports hauteur / largeur. Ces murets seront chargés en compression puis soumis à une force horizontale pour simuler une action sismique. A partir de ces résultats des évaluations de la performance mécanique des structures en pisé seront développés.

7 Bibliographie

[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.

[AST 02] ASTM E519-02, *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*. ASTM International, West Conshohocken, PA.2002.

- [BUI 09a] BUI Q. B., MOREL, J. C., HANS S., *et al.* « Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth », *Materials and structures*, 2009, vol. 42, n° 8, p. 1101-1116.
- [BUI 09b] BUI Q. B., MOREL J. C., « Assessing the anisotropy of rammed earth», *Construction and Building Materials*, 2009, vol. 23, n° 9, p. 3005-3011.
- [BUI 13] BUI Q. B., MOREL J. C., HANS S., WALKER,P., « Water effects on the mechanical characteristics of rammed earth buildings: a double-edged sword », *Construction and Building Materials.2013*.
- [BUI 14] BUI T.T., BUI Q.B., LIMAM A., *et al.*, «Failure of rammed earth walls: from observations to quantifications», *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 51, p. 295-302.
- [BUI 15a] BUI Q. B., MOREL J.C., « First exploratory study on the ageing of rammed earth material », *Materials*, (2015), 8, 1-15.
- [BUI 15b] BUI T.T., BUI Q.B., LIMAM A., Morel J.C., « Discrete element modeling of rammed earth walls», *ICREC 2015*, Février 2015, Perth, Australia.
- [GOM 11] GOMES M.I., LOPES M., DE BRITO J., « Seismic resistance of earth construction in Portugal», *Engineering Structures*, 2011, vol. 33, n° 3, p. 932-941.
- [HAL 04] HALL M.,DJERBIB Y., «Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency», *Construction and Building Materials*, 2004, vol. 18, no 4, p. 281-286.
- [MAN 08] MANIATIDIS V., WALKER P., «Structural capacity of rammed earth in compression», *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2008, vol. 20, n° 3, p. 230-238.
- [MIC 14a] 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.
- [MIC 14b] MICCOLI L., OLIVEIRA D. V., SILVA R.A., *et al.*, « Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modeling », *Materials and Structures*, 2014, p. 1-14.
- [NOW 11] NOWAMOOZ H., et CHAZALLON C., « Finite element modelling of a rammed earth wall», *Construction and Building Materials*, 2011, vol. 25, n° 4, p. 2112-212.
- [NZS 98] New Zealand Standard. Engineering Design of Earth Buildings. StandardNew Zealand, Wellington, New Zealand, 1998.
- [SIL 13] SILVA R. A., OLIVEIRA D. V., MIRANDA T., *et al.*, «Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal», *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 47, p. 181-19.
- [TIB 01] TIBBETS, J.M.; *Emphasis on rammed earth—The rational*. Interaméricas Adobe Builder, 2001, 9, 4-33.
- [JAQ 06] JAQUIN P.A., AUGARDE C. E., et GERRARD C. M., «Analysis of historic rammed earth construction», *Structural Analysis of Historical Constructions*, New Delhi, India, 2006, p. 1091-1098.
- [WAL 02] WALKER P., *Standards Australia The Australian Earth Building Handbook*. Sydney, Australia: Standards Australia, 2002.