

---

# Comportement de murs en pisé sous poussée progressive : études expérimentales et numériques

R. El-Nabouch<sup>1</sup>, Q.-B. Bui<sup>1</sup>, N. Prime<sup>1</sup>, P. Perrotin<sup>1</sup>, O. Plé<sup>1</sup>, C. Poinard<sup>1</sup>, T. Goldin<sup>1</sup>, J.-P. Plassiard<sup>1</sup>, M. Jaffré<sup>1</sup>, L. Teytu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Savoie Mont Blanc, LOCIE, CNRS UMR 5271, 73376 Le Bourget du Lac Cedex,

mail : [quoc-bao.bui@univ-smb.fr](mailto:quoc-bao.bui@univ-smb.fr)

---

*RÉSUMÉ.* Les constructions en terre crue, comme le pisé, connaissent ces dernières années un regain d'intérêt de par leur faible énergie grise, la possibilité de recyclage du matériau, et leur intérêt en terme de confort hygrothermique. Dans l'objectif de mieux caractériser le comportement et la résistance de ces structures sous sollicitation sismique une première approche est présentée ici dans laquelle 4 murs en pisé, à échelle 1/2, sont expérimentalement soumis à une poussée progressive en tête. Les résultats permettent d'appréhender à la fois le comportement du mur jusqu'à la rupture, de connaître le chargement maximum admissible et d'observer une bonne tenue des structures après la rupture. La modélisation numérique étant nécessaire pour aller vers une analyse de structures plus complexes, un premier modèle est mené ici, en utilisant le modèle de Drucker-Prager et en déterminant au mieux les paramètres par des essais mécaniques. Les résultats montrent que le comportement en poussée progressive peut être reproduit de manière acceptable, surtout lorsque la variation de l'angle de frottement et de la cohésion est prise en compte au sein des couches de pisé.

*ABSTRACT.* Earth based constructions, as rammed earth constructions, are recently taking an increasing interest because of their low embodied energy, the possibility of the recycling of the material and their hygroscopic properties that offers comfort advantage. In order to better characterize the behavior of these structures as well as their resistance under seismic solicitations, the pushover method was adopted in the present work. Four walls, at half-scale, were experimentally submitted to horizontal pushover tests. Experiments showed the crack propagation, the maximum admissible load and the non-brittle behavior of the structure after failure. Numerical modeling is necessary to analyze more complex structures. Therefore, the pushover experiments were modeled by using the Drucker-Prager criterion. The parameters were mainly determined from mechanical tests, especially the friction angle and the cohesion. Results of the simulations showed that the behavior of the walls under a pushover test can be reproduced with a good confidence, when the layer effects of the rammed earth walls have been taken into account.

*MOTS-CLÉS :* pisé, poussée progressive, performance parasismique, développement durable.

*KEY WORDS:* rammed-earth, push-over, seismic performance, sustainable development.

---

## 1. Introduction

Dans le contexte mondial de limitation du réchauffement climatique à moins de 2°C en dessous des températures préindustrielles, un enjeu majeur dans le développement est la réduction rapide des émissions de gaz à effet de serre, par le biais notamment d'une baisse de consommation énergétique. Or le secteur du bâtiment est l'un des plus énergivores avec, d'une part, une consommation courante liée à l'habitat qui représente environ 40% des dépenses énergétiques pour les pays européens et d'autre part, une énergie grise de construction très importante. Par ailleurs, la construction classique à base de béton fait face à une pénurie croissante de sable et granulats, dont la demande explose mondialement (plus de 15 milliards de tonnes par an) en causant des situations à risque pour les populations (trafics, érosion accélérés des côtes, etc.). De ce fait, il devient nécessaire de se tourner vers des choix constructifs alternatifs permettant d'assurer un développement durable des sociétés en limitant l'énergie grise de construction, en garantissant de bonnes performances énergétiques et en permettant au maximum le recyclage des matières premières de construction.

La construction en pisé, technique ancienne selon laquelle de la terre crue est mise en place par couches successives entre des banches semble pouvoir répondre à cette problématique. Bien qu'abandonné en France depuis le développement de l'utilisation du béton, ce procédé connaît ainsi un regain d'intérêt (voir construction récente en fig. 1). En effet, son coût en énergie grise est faible au cours de son cycle de vie et le matériau est entièrement et simplement recyclable [MOR 01]. De plus, les structures en pisé présentent l'avantage d'une bonne inertie thermique liée d'une part à une épaisseur généralement conséquente des murs monolithiques et d'autre part à l'hygroscopie du matériau terre où se condense et s'évapore successivement l'eau en fonction des variations de conditions extérieures [SOU 16].

Mais cette spécificité du matériau, notamment sa sensibilité à l'eau, ainsi que de sa structure en couches de l'ordre de 15 cm, implique de bien comprendre le comportement mécanique de l'ensemble de la construction pour pouvoir établir les limites de résistance mécanique de l'ouvrage sous différentes sollicitations. La performance de ces structures a déjà été analysée en terme de durabilité sous des conditions climatiques [BUI 09a] et de résistance en compression [MAN 08, BUI 09b, BUI 14]. Cependant la réponse sous sollicitation de type sismique reste à étudier, bien qu'une première étude portant sur la caractérisation du matériau d'un point de vue dynamique puisse être citée [BUI 11].

Quelle amplitude sismique un mur en pisé est-il capable de supporter sans se rompre ? La structure en couche horizontales amoindrit-elle la résistance ? Sous quelle forme la rupture a-t-elle lieu ? Est-on capable de modéliser numériquement un tel comportement à l'échelle d'un bâtiment ? C'est à ces questions que ces travaux proposent de répondre grâce à une approche expérimentale de poussée progressive sur un mur en pisé à échelle semi-réelle et à une première modélisation d'un mur par éléments finis.

Ces travaux s'inscrivent également dans une logique de réhabilitation du bâti existant, les structures en terre étant le mode constructif le plus répandu au niveau mondial (la moitié de la population vit dans un habitat en terre [GUI 08]).



**Figure 1.** *Maison en pisé construite par N. Meunier, France*

## 2. Analyse expérimentale

L'objectif de cette première partie est principalement de déterminer le comportement d'un mur en pisé, à échelle semi réelle, sous une poussée progressive horizontale, cette direction de sollicitation étant caractéristique

du chargement sismique. Il s'agit d'une méthode statique non-linéaire performante qui a été introduite dans l'Eurocode 8 [EUR 05].

## 2.1. Réponse d'un mur sous poussée progressive

### 2.1.1. Matériau et méthode

La terre a été fournie par un artisan piseur et mouillée à sa teneur en eau optimum ( $w_{opt}$  autour de 12%) correspondant à l'énergie de compactage utilisée. Quatre murs en pisé ont été construits successivement en laboratoire (les numéros 1 à 4 correspondent à l'ordre de réalisation) selon 2 géométries :

- 2 murs (n°2 et 3) avec :  $H=1.5$  m (hauteur),  $L=1.5$  m (longueur) et  $e=0.25$  m (épaisseur)
- 2 murs (n°1 et 4) avec :  $H= 1$  m,  $L=1.5$  m et  $e=0.25$  m.

Les dimensions ont été choisies telles qu'elles soient représentatives de murs à l'échelle  $\frac{1}{2}$  de bâtiment à 1 niveau (hauteur autour 3 m et épaisseur de 50 cm). L'influence de l'élancement  $H/L$  vise à être testée par le choix de ces 2 géométries. Chacun de ces murs est construit au-dessus d'une poutre en béton  $H=0.25$ m,  $e=0,25$ m et  $L= 1,8$ m. La mise en place est faite par des couches de terre d'une hauteur moyenne de 15cm, damées grâce à une dameuse pneumatique. Les banches sont ensuite retirées et les murs laissés à sécher pendant 2 mois en laboratoire ( $20^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR}=60\%$ ). La teneur en eau des murs au moment des tests était de 3%. Une deuxième poutre en béton surmonte chaque mur, une couche de mortier de chaux étant disposée entre le mur et la poutre pour améliorer la liaison terre-béton (fig. 2).

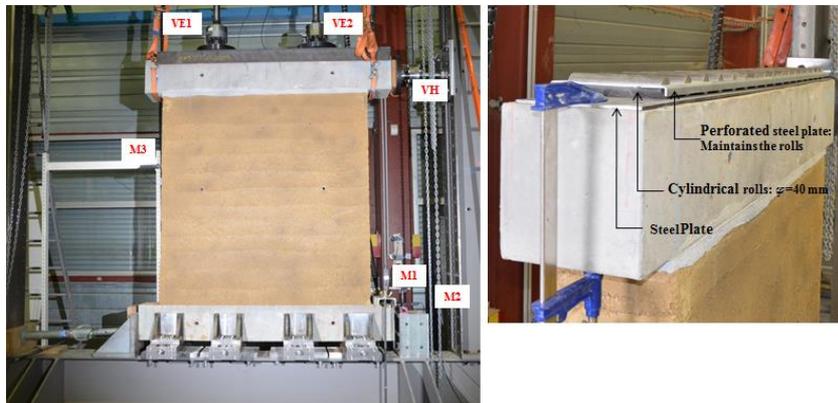


Figure 2. Vue d'un des murs et du système de chargement.

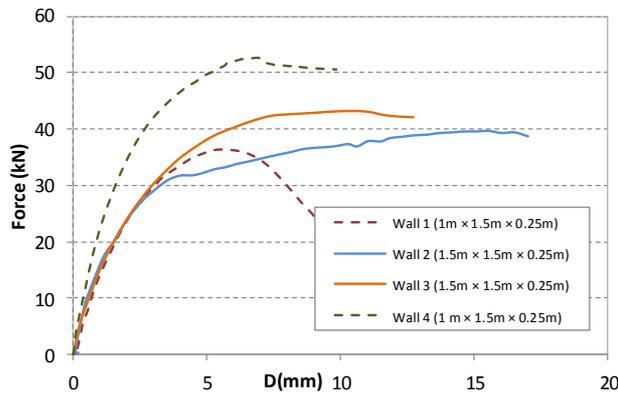
Le test consiste à appliquer, sous une charge verticale représentant la descente de charges des planchers et de la toiture, une poussée horizontale progressive en tête du mur. Celle-ci représente une action sismique dans le plan du mur. La charge verticale est appliquée dans un premier temps avec un taux de 1kN/s par 2 vérins hydrauliques (VE1 et VE2 sur la fig.2). Ceux-ci sont appliqués sur une poutre acier UPN séparée de la poutre béton au sommet du mur par un système de roulement (fig.2), ce qui autorise un déplacement horizontal de la poutre en béton pendant la poussée horizontale. La charge verticale de 60kN étant atteinte (équivalent à une contrainte verticale de 0.3MPa), elle est maintenue constante pendant qu'un vérin horizontal applique la poussée horizontale progressive sur la poutre béton en sommet de mur (VH sur la fig. 2). Un contrôle en déplacement est choisi avec une vitesse de 1mm/min appliquée jusqu'à la rupture. La poutre en béton en base du mur est mise en butée (en bas à gauche) pour éviter le glissement et maintenue par des tirants (en bas à droite) pour éviter le soulèvement de la poutre. Des capteurs de déplacement verticaux et horizontaux (M1 et M2 sur la fig.2) sont installés pour vérifier s'il y a un soulèvement de la poutre BA à la base. Le déplacement horizontal global est mesuré pendant l'essai par un capteur placé sur le mur (M3 sur la fig.2). En parallèle, l'une des faces du mur est filmée avec une caméra (précision : 16 MPixels) afin de suivre l'évolution du champ de déplacement en surface de la structure par corrélation d'images. Les bases théoriques de cette méthode ainsi que le logiciel utilisé sont présentés par Vacher et al. [VAC 99].

### 2.1.2. Résultats et analyse

La figure 3 présente pour les 4 murs l'évolution de la force horizontale appliquée en fonction du déplacement horizontal mesuré par corrélation d'image entre la première et la dernière image. Les déplacements

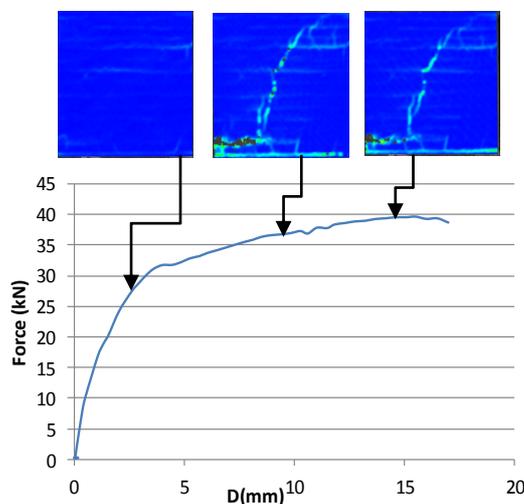
fournis par le capteur intégré dans vérin horizontal sont similaires mais moins précis dû aux jeux du piston et à la rigidité du système de chargement. Ce graphe (Fig. 3) fait apparaître pour les 4 murs un comportement non fragile post-rupture. Il est important de noter qu'aucun des murs ne s'est effondré après la rupture et notamment que tous ont pu être déplacés hors du portique de chargement sans dommage.

La rigidité initiale est similaire pour les murs n°2 et 3 (H=1.5m). Cependant, alors qu'une rigidité supérieure est attendue pour les murs n°1 et 4 (H=1m) du fait d'un bras de levier plus faible de la force horizontale, seul le mur n°4 vérifie ce comportement, le mur n°1 ayant une raideur similaire aux murs de 1.5 m. De même, les murs n° 2 et 3 (H=1.5m) présentent des réponses similaires en terme d'effort horizontal à la rupture et de comportement ductile post-pic, mais pour H=1m (c'est-à-dire pour un moment de flexion plus faible de sa section), seul le mur 4 présente un effort maximal supérieur, alors que la valeur maximale du mur 1 est équivalente à celles des murs de 1.5m de hauteur. Le mur n°1 ayant été le premier construit et testé, il est possible que les conditions de fabrication ou de test aient été moins bien maîtrisés que les autres murs. Ce résultat montre aussi l'influence des conditions de fabrication du pisé - qui n'est pas un matériau industriel - sur sa performance vis-à-vis des sollicitations horizontales.



**Figure 3.** Comportement des 4 murs sous poussée progressive

La figure 4 présente, pour le mur n°2 (H=1.5m), l'évolution du déplacement au sommet latéral droit du mur au cours de l'essai de poussée progressive, ainsi que l'évolution des fissures identifiées par la corrélation d'images. Les valeurs maximales de déplacement correspondant ici à de la fissuration, il apparaît 2 orientations privilégiées de fissures, pour ce mur ainsi que pour les 3 autres murs (résultats non présentés ici). La première est la diagonale du mur correspondant à la bielle de compression de la structure chargée. La deuxième est la direction horizontale à l'interface entre les couches damées. Cette fissuration montre une résistance légèrement moindre des interfaces. Cependant, la fissuration entre les couches apparaissant pour 85% du chargement maximal, cette résistance peut être considéré comme acceptable.



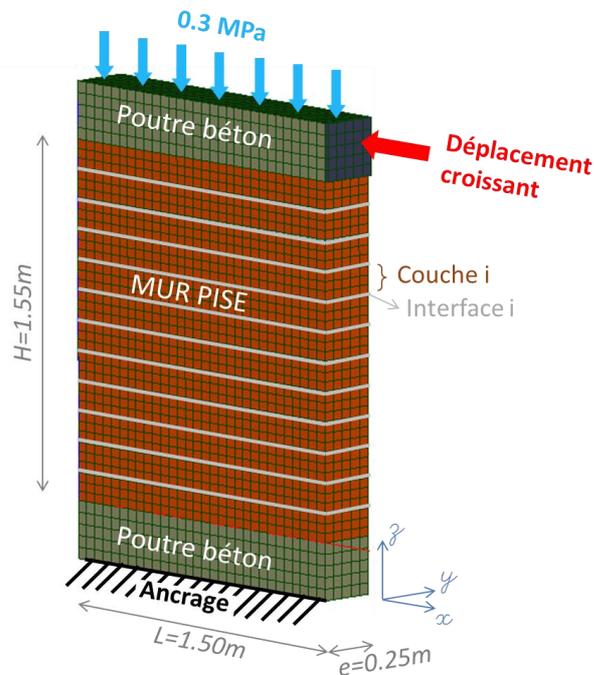
**Figure 4.** Courbe force horizontale – déplacement horizontale en tête du mur n°2.

### 3. Analyse numérique

L'objectif de cette partie est de réaliser un modèle numérique préliminaire d'un mur de pisé sous poussée progressive. Ce modèle, déjà validé pour les chargements verticaux [ELN 15] et une fois validé pour la poussée progressive pourra être appliqué pour un autre élément de structure voire même à l'échelle du bâtiment.

#### 3.1. Présentation du modèle

L'expérience de poussée progressive vise à être modélisée, grâce au Code\_Aster, pour le cas  $H=1,5m$ . La figure 5 rappelle la géométrie de la structure testée avec le mur en pisé et les 2 poutres béton, ainsi que les conditions de chargement (contrainte verticale de  $0.3MPa$  et poussée progressive en tête). Un encastrement est considéré à la base. Le mur est modélisé par 12 couches de pisé de  $12cm$  chacune et par une fine couche de matière d'un centimètre (prénommée par la suite 'interface') entre les différentes couches. Bien que l'introduction d'un gradient progressif des paramètres mécaniques soit la manière la plus réaliste de représenter la succession des couches de pisé, la modélisation de l'alternance entre ces 2 couches de propriétés différentes est la manière la plus simple de prendre en compte le caractère périodique du mur en pisé. L'épaisseur de la couche « interface » a été choisie après les observations de par la corrélation d'images les zones de « faiblesse » des couches pendant les essais de compression simple (pour déterminer la résistance à la compression). Cette modélisation, permet de pouvoir considérer chaque couche et chaque interface avec des paramètres différents.



**Figure 5.** Géométrie et conditions aux limites du modèle numérique.

Le comportement du béton est considéré élastique ; celui du pisé est considéré élasto-plastique avec une loi associée de type Drucker-Prager. En effet un modèle d'endommagement a été essayé dans une précédente étude [BUI 14] mais ne donnait pas des résultats tout à fait satisfaisants. Le critère de charge s'écrit (eq. [1]) :

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

avec  $I_1 = \text{tr}(\sigma)$ ,  $\sigma_{eq}$  le second invariant de contrainte et  $\alpha$  une fonction de l'angle de frottement  $\varphi$  telle que :

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad [2]$$

$R(p)$  est la valeur prise par le critère pour  $\text{tr}(\sigma)=0$ , en fonction de la déformation plastique cumulée  $p$ . La variation de  $R$  avec la plastification (de  $R(0) = \sigma_y$  à  $R(p_{ultime}) = \sigma_{y,ultime}$ ) représente l'écroutissage. Pour un écroutissage parabolique, choisi ici, cette fonction s'écrit :

$$\begin{cases} R(p) = \sigma_y \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{\frac{\sigma_{y,ultime}}{\sigma_y}} \right) \frac{p}{p_{ultime}} \right]^2 & \text{si } p \in [0; p_{ultime}] \\ R(p) = \sigma_{y,ultime} & \text{si } p > p_{ultime} \end{cases} \quad [3]$$

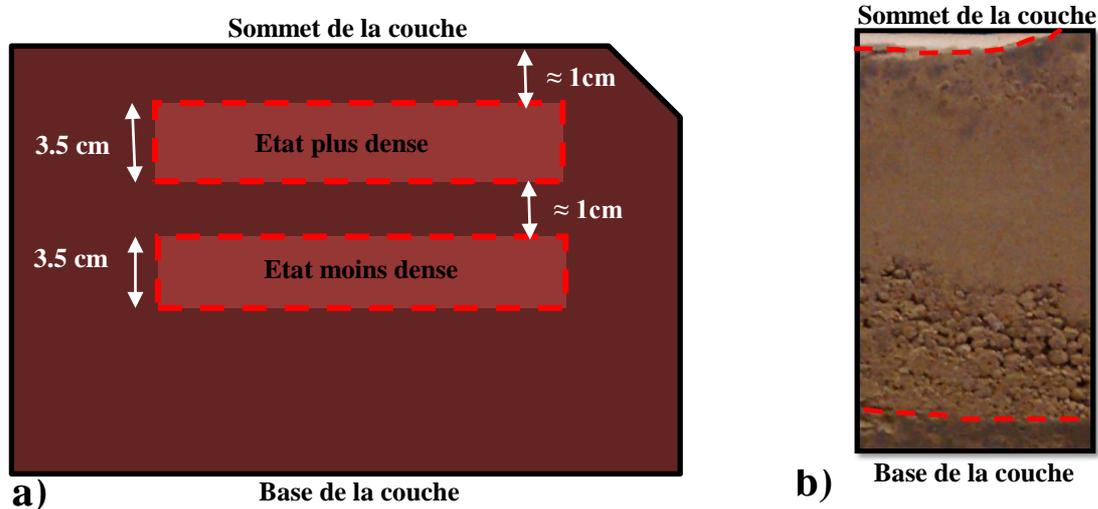
La variable  $\sigma_y$  s'écrit en fonction de  $\varphi$  et de la cohésion  $c$  sous la forme :

$$\sigma_y = 6c \cdot \cos \varphi / (3 - \sin \varphi) \quad [4]$$

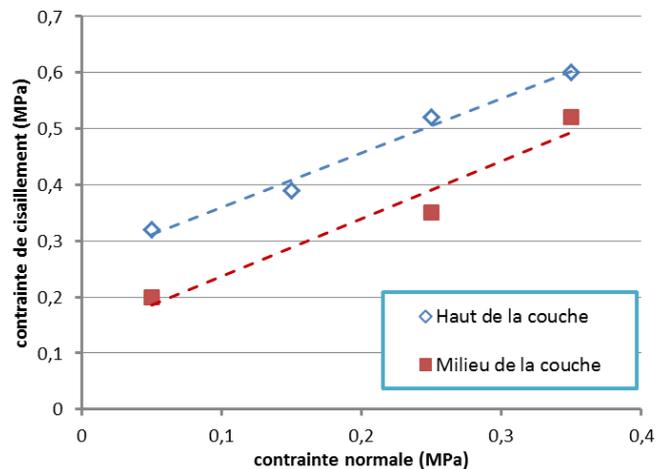
### 3.2. Choix des paramètres

Les paramètres élastiques  $E = 30 \text{ GPa}$  et  $\nu = 0.2$  sont retenus pour le béton.

Concernant le pisé, des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande ont été réalisés sur des échantillons provenant des structures testées en poussée. Ces blocs de terre de dimension  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 3,5 \text{ cm}$  ont été prélevés (coupés par une scie circulaire spécifique) au sein des couches damées selon deux positions : 5 échantillons ont été prélevés à  $1 \text{ cm}$  du sommet des couches, là où le tassement est visiblement plus important et 5 échantillons ont été prélevés à  $1 \text{ cm}$  en dessous, au milieu de la couche, là où la compaction semble intermédiaire (voir fig.6 a et b). Les échantillons en base de la couche n'ont pas pu être prélevés car ils sont trop friables.



**Figure 6.** Localisation des prélèvements au sein des couches de pisé pour les essais de cisaillement (a) et aspect d'une couche (b)



**Figure 7.** Comparaison des états à la rupture pour des échantillons en sommet et en base de couche

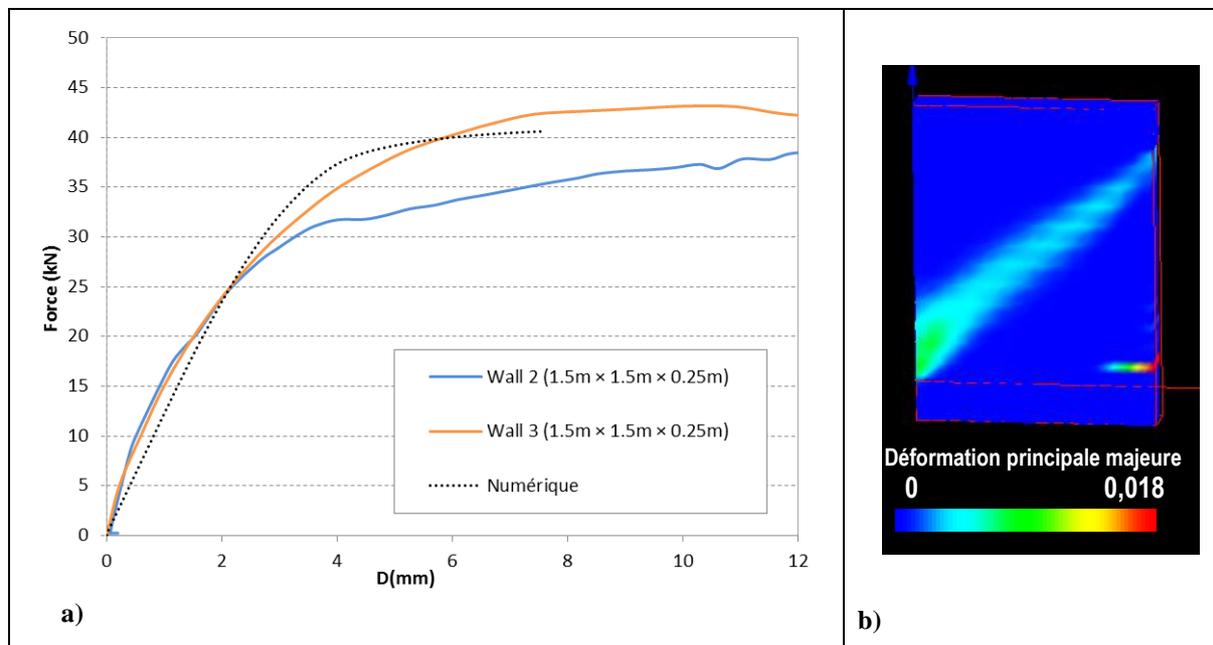
Les résultats en terme de contrainte à la rupture dans le plan de Mohr sont donnés à la figure 7 pour les 10 essais de cisaillement. On observe dans le graphe une relativement bonne répétabilité des essais avec une tendance selon laquelle la terre plus compactée en sommet de couche est aussi plus résistante. Pour un modèle de Mohr Coulomb, un angle de frottement de  $44,1^\circ$  et une cohésion de  $263 \text{ kPa}$  y sont obtenus, alors qu'en milieu de couche on détermine  $\varphi = 45,6^\circ$  et  $c = 135 \text{ kPa}$ . Il est intéressant de noter que l'angle de frottement est similaire pour

les deux parties (de l'ordre de  $45^\circ$ ), seule la cohésion change en fonction du compactage du matériau. Ces résultats confirment les résultats numériques présentés dans la littérature [BUI 15].

Les valeurs expérimentales en milieu de couche ont été considérées comme représentatives d'une couche pour le modèle. Les paramètres dans les interfaces, représentatives de la base des couches, ont été prise suivant les valeurs recommandées dans la littérature [BUI 15] :  $c=80\text{kPa}$  et  $\varphi=30^\circ$ . Enfin le module de Young  $E = 350\text{MPa}$  et le coefficient de Poisson  $\nu=0.22$  ont été déterminés à partir d'essais de compression simple.

### 3.3. Résultats numériques

La courbe effort-déplacement est présentée à la figure 8a, dans laquelle les résultats expérimentaux et numériques sont confrontés pour le cas  $H = 1,5\text{m}$ . Sur l'ensemble, une bonne corrélation est observée, en même temps pour le déplacement à l'entrée en plasticité et pour l'effort ultime. Par ailleurs le tracé des déformations principales majeures (fig.8b) reproduit qualitativement les endroits où les fissures se propagent pendant l'essai. Ainsi les effets d'extension dans la diagonale du mur et le long de la poutre béton en base ont été reproduits par le modèle. Ce modèle pourra encore être amélioré une fois que les tests sur l'interface des couches auront été réalisés.



**Figure 8.** (a) Comparaison des résultats numériques et expérimentaux en terme d'évolution force-déplacement. (b) Déformation principale majeure en fin de chargement (6,4mm de déplacement).

### 4. Conclusion

Notre étude s'est intéressée au comportement sous poussée progressive horizontale ('pushover') de 4 murs en pisé conçus à l'échelle  $\frac{1}{2}$ . En plus de souligner l'effet de la hauteur  $H$  des murs (qui diminue naturellement la rigidité), les résultats expérimentaux montrent l'effort maximum qui peut être développé à la rupture pour ces configurations (entre 35 et 55kN) et mettent en évidence la répartition et l'évolution des déformations dans le pisé. Ainsi on observe une fissuration principale au niveau de la bielle de compression, mais aussi une fissuration secondaire au niveau de chaque interface entre les couches, celle-ci apparaissant à 85% de la force ultime. Un comportement non-fragile a été observé.

Les premières ébauches de modélisation ont montré la possibilité, à partir du modèle Drucker-Prager et avec l'ajout des couches de type « interface », de reproduire le comportement sous sollicitations statiques horizontales, ce qui permettra donc d'avancer plus loin dans la compréhension du comportement sous diverses sollicitations (notamment sismiques) des structures en pisé. On soulignera l'importance de prendre en compte la variation de cohésion et d'angle de frottement au sein des couches damées. Cependant, si la détermination de  $c$  et  $\varphi$  sur les

échantillons prélevés présente un intérêt certain, l'utilisation d'une scie peut avoir affecté la microstructure du matériau. Pour pallier ce problème, une boîte de cisaillement de 50 cm x 50 cm x 45 cm de hauteur a été construite par les auteurs, grâce à laquelle de nouveaux résultats pourront être communiqués prochainement.

## 5. Bibliographie

- [BUI 09a] BUI Q.B., MOREL J.C., REDDY B.V.V., GHAYAD W., « Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering », *Building and Environment*, vol. 44, 2009, p. 912-919.
- [BUI 09b] BUI Q.B., MOREL J.C., HANS S., MEUNIER N., « Compression behaviour of nonindustrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth », *Materials and Structures*, vol. 42, 2009, p. 1101-1116.
- [BUI 11] BUI Q.B., HANS S., MOREL J.C., DO A.P. « First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings », *Engineering Structures*, vol. 33, 2011, p. 3690-3695.
- [BUI 14] BUI T.T., BUI Q.B., LIMAM A., MAXIMILIEN S., « Failure of rammed earth walls: from observations to quantifications », *Construction and Building Materials*, vol. 51, 2014, p. 295-302.
- [BUI 15] BUI T.T., BUI Q.B., LIMAM A., MOREL J.C., « Modeling rammed earth wall using discrete element method », *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 7/2015.
- [ELN 15] EL-NABOUCH R., BUI Q.B., PERROTIN P., PLÉ O., PLASSIARD J.P., « Numerical modeling of rammed earth constructions: analysis and recommendations », *1st International Conference on Bio-based Building Materials*, Clermont Ferrand (France), RILEM, June 21-24 2015, paper 57.
- [EUR 05] EUROCODE 8 - EN 1998-1:2004.: Design of structures for earthquake resistance, European Committee for Standardization (2005).
- [GUI 08] GUILLAUD H., AVRAMI E., HARDY M., « Terra Literature review: an overview of research in earthen architecture conserv », Los -Angeles, The Getty Conservation Institute, 2008.
- [MAN 08] MANIATIDIS V., WALKER P., « Structural capacity of rammed earth in compression », *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 20, 2008, p. 230-38.
- [MOR 01] MOREL J.C., MESBAH A., OGGERO M., WALKER P., « Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction », *Building and Environment*, vol. 36, 2001, p. 1119-26.
- [SOU 16] SOUDANI L., FABBRI A., MOREL J., WOLOSZYN M., CHABRIAC P.A., WONG H., GRILLET, A.C., « Assessment of the validity of some common assumptions in hygrothermal modelling of earth based materials ». *Energy and Buildings*, 1, 2016, p. 498-511.
- [VAC 99] VACHER P., DUMOULIN S., MORESTIN F., MGUIL-TOUCHAL S. « Bidimensional strain measurement using digital images », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 213, 1999, p. 811-17.

## Remerciements

Cette étude est financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet ANR PRIMATERRE (ANR-12-Villes et Bâtiments Durables).