

Effet de la pression capillaire sur les propriétés mécaniques d'un sol reconstitué

Elsa Anglade¹

¹ LMDC, INSA/UPS Génie Civil, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 04 France

RESUME Grâce à son intérêt écologique et sa grande disponibilité, un regain d'intérêt est accordé à la terre crue en tant que matériau de construction. En effet, la terre crue consomme peu de CO₂ pendant son transport et sa transformation tout en assurant un confort thermique et hydrique naturel dans l'habitat. Cependant, ses propriétés mécaniques sont liées à sa composition et varient grandement. Le but de cette étude est de proposer un modèle d'homogénéisation capable de prédire le comportement hydromécanique d'un sol reconstitué en fonction de sa composition et d'analyser les effets de la pression capillaire sur la résistance du matériau. Les paramètres du modèle sont déterminés à l'aide d'une campagne expérimentale menée sur un matériau modèle composé d'une argile pure (kaolinite), de sable et d'eau en quantités variables. Cette étude expérimentale fournit les propriétés mécaniques des mélanges permettant au modèle de mettre en évidence la compétition entre l'augmentation de la cohésion de la terre grâce aux pressions capillaires et la perte de résistance liée au retrait de l'argile empêché par le sable lors du séchage.

Mots-clés terre crue, matériau modèle, homogénéisation non-linéaire, hydromécanique

I. INTRODUCTION

La terre crue est un matériau qui est utilisé depuis de nombreuses années dans la construction et dont l'utilisation s'est développée ces dernières décennies. En effet, la terre étant un matériau consommant peu de CO₂ pendant son procédé de transformation ou son transport, elle permet de répondre aux critères écologiques actuels. De plus, ce matériau présente de nombreux avantages : il est disponible en très grandes quantités et permet d'assurer un confort thermique et hydrique naturel au sein d'une habitation (Anger et al., 2009).

Ce matériau comporte cependant quelques inconvénients dont notamment sa grande variabilité de composition en fonction de la terre utilisée. Pour cette raison, il est nécessaire de faire de nombreux essais afin de déterminer si une terre est acceptable pour la construction. L'objectif de cette étude est de proposer un modèle numérique basé sur des méthodes d'homogénéisation permettant de prédire certaines performances mécaniques de la terre crue en fonction de sa composition et d'étudier les effets de l'eau sur la résistance du matériau.

En effet, certains auteurs tels que (Bui et al., 2014; Champire et al., 2016) ont montré que la présence d'eau dans la terre influence grandement ses performances mécaniques. Au cours du séchage, les pressions capillaires dans les pores augmentent, ce qui fait augmenter la cohésion du matériau. Ainsi la résistance de la terre devrait augmenter lorsque la teneur en eau diminue. Cependant, lors du séchage, la présence des grains de sable empêche le retrait libre de l'argile, ce qui crée des concentrations de contrainte autour des grains de sable et entraîne une chute de la résistance du matériau.

Cette étude a pour objectif d'appréhender la compétition entre ces deux phénomènes à l'aide de deux approches : une campagne expérimentale sur un matériau modèle composé d'une argile pure, de sable fin et d'eau et le développement d'un modèle semi-analytique d'homogénéisation permettant de prédire le comportement du matériau modèle en fonction de sa composition.

II. CAMPAGNE EXPERIMENTALE

A. Matériaux et procédures

Matériaux

Dans cette étude, le matériau modèle utilisé est un sol reconstitué composé d'argile, de sable et d'eau en quantités variables.

L'argile, étant un matériau capable de passer d'un état de fluide visqueux à un état de solide cohésif en fonction de sa teneur en eau, permet d'assurer la cohésion de la terre crue lors de son séchage. Pour cette raison, il est nécessaire d'avoir une quantité minimale d'argile dans une terre pour qu'elle soit adéquate pour la construction. Certaines argiles, dites expansives, peuvent créer d'importantes variations de volume, gonflement ou retrait, en fonction de la teneur en eau de la terre, ce qui peut entraîner l'apparition de fissures macroscopiques. Pour limiter cette fissuration, l'argile utilisée dans cette campagne expérimentale est de la kaolinite pure.

Dans le but de modéliser les grains de sable comme des inclusions sphériques de taille uniforme dans la suite de l'étude, le sable siliceux utilisé a une répartition granulométrique uniforme : la taille des grains varie entre 200 et 400 μm .

Préparation des échantillons

Trois mélanges d'argile et de sable ont été testés pour deux teneurs en eau différentes : la teneur en eau de fabrication des échantillons et la teneur en eau après séchage des échantillons dans une chambre climatique à 20°C et 50% d'humidité relative (HR). Le premier mélange contient uniquement de l'argile (0S) et il est utilisé pour déterminer les propriétés de la matrice argileuse seule, le deuxième mélange contient 30% de sable (30S) et le dernier contient 60% de sable (60S). Le tableau 1 résume les quantités d'argile et de sable de chaque mélange, ainsi que la teneur en eau de fabrication des éprouvettes.

Deux types d'échantillons ont été fabriqués par compaction de la terre humide dans un moule métallique avec une force de 20kN : un pavé droit de dimensions 15 x 15 x 5 cm^3 et un cylindre de hauteur 10 cm et de diamètre 5 cm. Les pavés ont été utilisés pour les essais de retrait, puis, après avoir été découpés à l'aide d'une scie diamantée, ils ont été utilisés pour les essais de traction. Les cylindres ont été utilisés pour les mesures de module d'Young et de coefficient de Poisson.

TABEAU 1. Propriétés générales des échantillons

	0S	30S	60S
Quantité d'argile (%)	100	70	40
Quantité de sable (%)	0	30	60
$\omega(\%)$	30	21	12
$\gamma_{fab} (g \cdot \text{cm}^{-3})$	1.80 \mp 0.01	1.96 \mp 0.01	2.14 \mp 0.01
$\gamma_{50\% HR} (g \cdot \text{cm}^{-3})$	1.50 \mp 0.02	1.72 \mp 0.03	1.92 \mp 0.01
$n(\%)$	43.7 \mp 0.7	36.6 \mp 0.9	30.6 \mp 0.9

Les poids volumiques des échantillons humides (γ_{fab}) et secs ($\gamma_{50\% HR}$) et la porosité (n) de chaque mélange ont été mesurés sur les éprouvettes cylindriques et sur les pavés. Les résultats étant similaires pour les deux formes d'échantillons, seuls les résultats provenant des éprouvettes cylindriques sont présentés dans le tableau 1.

Procédures expérimentales

Les isothermes de sorption de chaque mélange ont été déterminées à l'aide d'une DVS (Dynamic Vapor Sorption) pour des paliers d'humidité relative variant de 0 à 97%.

L'utilisation de la vidéo corrélation lors d'un essai cyclique de compression a permis de déterminer l'évolution des déformations axiales et radiales de l'éprouvette en fonction du chargement et d'en déduire le module d'Young et le coefficient de Poisson de chaque mélange.

La résistance à la traction du matériau permet de mieux appréhender l'impact du séchage sur la résistance du matériau, et en particulier la compétition entre l'augmentation de la cohésion du matériau due aux pressions capillaires et la baisse de résistance due à la concentration de contrainte engendrée par le retrait empêché de la matrice argileuse. Elle a été mesurée lors d'un essai de flexion trois points sur une presse hydraulique contrôlée en effort.

La norme NF P94-060 permettant de mesurer le retrait de la terre crue nécessite un matériau avec une teneur en eau élevée (proche de la limite de liquidité du sol). Dans cette étude, l'objectif étant d'utiliser les résultats expérimentaux dans un modèle numérique, il est important que tous les tests soient réalisés sur des éprouvettes ayant la même matrice argileuse et le même procédé de fabrication. Par conséquent, l'utilisation de la norme pour mesurer le retrait n'est pas pertinente et un nouveau système de mesure a été créé. L'appareil de mesure illustré sur la figure 1 permet de mesurer la variation de longueur d'une des dimensions de l'éprouvette à l'aide de capteurs de déplacement mécaniques. L'ensemble de l'appareil est positionné sur une balance dans une chambre climatique à 20°C et 50% HR, ce qui permet de mesurer à la fois la perte de masse et le retrait dans la direction de mesure.

B. Résultats expérimentaux

Le tableau 2 présente la résistance à la traction, le module d'Young et le coefficient de Poisson pour chacun des mélanges à la teneur en eau de fabrication (f_{ab}) et à celle après séchage (50% HR). Ces résultats montrent que les quantités d'eau et de sable influencent grandement les propriétés mécaniques de la terre crue. En effet, la résistance à la traction d'un mélange augmente après son séchage, ce qui signifie que les pressions capillaires sont responsables d'une partie de la cohésion de la terre.

Par ailleurs, dans le cas des échantillons secs, la résistance à la traction diminue lorsque la quantité de sable augmente. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que la présence des grains de sable dans le matériau empêche le retrait libre de la matrice et crée des concentrations de contrainte. Ces concentrations de contraintes peuvent être responsables d'une perte de résistance du matériau.

TABLEAU 2. Résistance à la traction, Module d'Young et coefficient de Poisson

		0S	30S	60S
$R_{t\ f_{ab}}$	MPa	0.052 ± 0.003	0.060 ± 0.003	0.121 ± 0.022
$R_{t\ 50\% HR}$	MPa	0.40 ± 0.06	0.37 ± 0.08	0.23 ± 0.02
$E_{f_{ab}}$	MPa	35 ± 18	20 ± 8	18 ± 3
$E_{50\% HR}$	MPa	262 ± 32	832 ± 100	1191 ± 69
$\nu_{f_{ab}}$	-	0.24 ± 0.01	0.39 ± 0.12	0.46 ± 0.01
$\nu_{50\% HR}$	-	0.30 ± 0.02	0.34 ± 0.04	0.40 ± 0.02

La figure 1 illustre l'évolution du degré de saturation de chaque mélange et celle de la déformation macroscopique des éprouvettes au cours de l'essai de retrait. La teneur en eau relative représente le rapport entre la teneur en eau à un instant donné et la teneur en eau de fabrication. Les résultats issus du mélange ne contenant que de l'argile (0S) seront utilisés dans la suite afin de recréer le chargement

hydrique de la matrice argileuse et ceux des mélanges 30S et 60S permettront de valider les résultats issus de la modélisation.

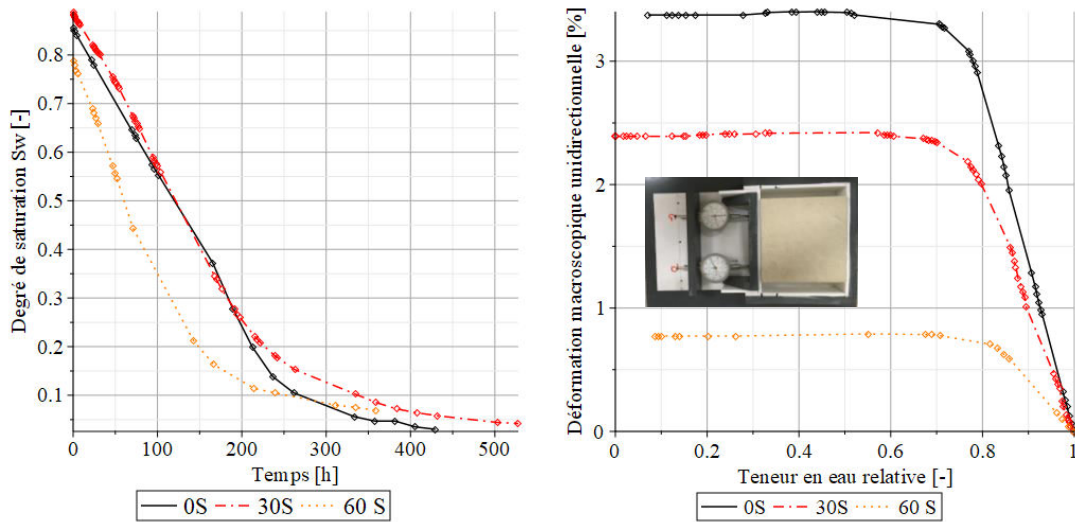


FIGURE 1. Evolution du degré de saturation (gauche) et de la déformation unidirectionnelle (droite) des trois mélanges (0S, 30S et 60S) au cours de l'essai de retrait

III. MODELE D'HOMOGENEISATION

L'objectif du modèle d'homogénéisation est d'établir analytiquement l'état de contrainte au voisinage des grains de sable afin d'y appliquer un critère de rupture du type de (Sellier et al., 2018). Ce critère permet de prendre en compte la concentration de contrainte aux bords des grains de sable et les effets de la pression capillaire dus au séchage lors de la détermination de la résistance à la traction du matériau.

A. Détermination analytique de l'état de contrainte aux bords des grains de sable

Pour modéliser le mélange de sable et d'argile, les grains de sable sont représentés comme des inclusions sphériques plongées dans une matrice argileuse infinie. Les champs de déplacement dans la matrice $\mathbf{u}^m(M)$ et dans les inclusions $\mathbf{u}^i(M)$ peuvent se décomposer en un champ élastique $\mathbf{u}^{je}(M)$ et un champ anélastique $\mathbf{u}^{ja}(M)$, où l'indice $j \in \{m, i\}$ représente respectivement la matrice et l'inclusion, tous deux cinématiquement et statiquement admissibles (Equation (1)).

$$\forall M \in \Omega, \quad \mathbf{u}^j(M) = \mathbf{u}^{je}(M) + \mathbf{u}^{ja}(M) \quad (1)$$

Le comportement élastique du modèle est décrit par les équations ci-dessous :

$$\forall M \in \Omega_j, \quad \boldsymbol{\epsilon}^{je} = \text{sym grad } \mathbf{u}^{je} \quad (2)$$

$$\forall M \in \Omega_j, \quad \boldsymbol{\sigma}^{jj} = \left(K^j - \frac{2}{3} G^j \right) \boldsymbol{\epsilon}^{je} + 2G^j \boldsymbol{\epsilon}^{je} \quad (3)$$

$$\forall M \in \Omega_j, \quad \text{div } \boldsymbol{\sigma}^j = \mathbf{0} \quad (4)$$

Où $\boldsymbol{\sigma}^{jj}$ est la contrainte effective, K^j le module de compressibilité et G^j est le module de cisaillement de la phase j .

Les conditions aux limites appliquées au modèle sont la continuité du déplacement à l'interface entre les inclusions et la matrice (5), la continuité du vecteur de contrainte à l'interface (6) et la déformation imposée sur les limites externes (7).

$$\forall M \in \partial\Omega_i, \quad \mathbf{u}^m(M) = \mathbf{u}^i(M) \quad (5)$$

$$\forall M \in \partial\Omega_i, \quad \sigma^m(M) \cdot n(M) = \sigma^l(M) \cdot n(M) \quad (6)$$

$$\forall M \in \partial\Omega_m, \quad \epsilon^m = \epsilon_{imp}^m \quad (7)$$

La solution de (Eshelby, 1957) qui suppose que les déformations sont homogènes dans l'inclusion a été utilisée pour déterminer les champs de déplacement élastique et anélastique dans les inclusions. Dans le cas du champ de déplacement élastique dans la matrice, la solution proposée par (Dewey, 1947) valable dans le cas d'un chargement isotrope a été modifiée afin de prendre en compte des chargements anisotropes et des variations locales de la déformation autour des inclusions.

Habituellement, les problèmes d'homogénéisation non-linéaire sont résolus en utilisant le module tangent au lieu du module élastique ou en choisissant un champ de déformation anélastique uniforme dans la matrice (Leblond et al., 1994; Maghous et al., 2009). Avec ce type de champ, il n'est pas possible de prendre en compte une variation locale de la déformation anélastique au voisinage des inclusions différente d'un champ affine à la solution d'Eshelby. Dans cette étude, le champ anélastique utilisé n'est pas affine au champ élastique d'Eshelby : il peut se décomposer en trois champs indépendants permettant d'appliquer respectivement une déformation constante dans toute la matrice (ϵ^{ac}), une déformation à l'infini ($\epsilon^{a\infty}$) et un écoulement aux bords des inclusions (ϵ^{aR}) (voir figure 2). L'écoulement aux bords des inclusions dans chacune des directions principales i peut se décomposer en un écoulement radial (ϵ_i^{ar}) et un écoulement orthoradial axisymétrique (ϵ_i^{ao}). Avec ce type de champ il est donc possible d'imposer un écoulement anélastique dans la matrice issu de critères différents aux bords des inclusions et à l'infini.

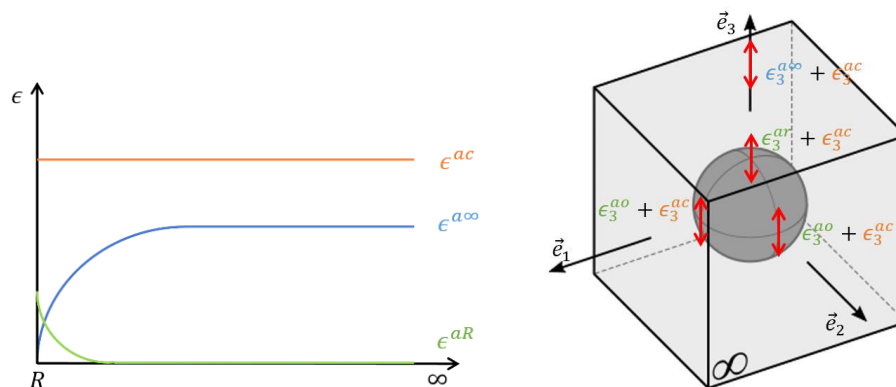


FIGURE 2. Représentation des trois champs anélastiques (gauche) et écoulement anélastique dans la direction \vec{e}_3 (droite)

B. Effets de la pression capillaire

La terre crue est un matériau poreux dont les pores sont remplis d'air et d'eau. Lorsque le matériau sèche, la pression capillaire due à la présence d'eau dans les pores augmente, ce qui entraîne à la fois une augmentation de la cohésion de la terre et le retrait de la matrice argileuse. Cette pression capillaire peut s'exprimer en fonction de l'humidité relative de la pièce grâce à la loi de Kelvin (équation 8). L'humidité relative étant liée au degré de saturation (S_w) d'un matériau via les isothermes de sorption, il est donc également possible d'exprimer la pression capillaire en fonction de S_w .

$$p_c = \frac{\rho_w RT}{M_v} \ln(RH) \quad (8)$$

Où M_v est la masse molaire de la vapeur d'eau (g/mol), ρ_w la masse volumique de l'eau (g/m³), R la constante des gaz parfaits (J/(mol.K)) et T la température (K).

Dans un premier temps, l'influence de la pression capillaire sur le retrait de la terre crue est étudiée. Dans la terre crue, le retrait linéique ($\epsilon_{retrait}^m$) lié à la perte d'eau peut être décomposé en deux parties :

le retrait lié à l'augmentation des pressions capillaires dans les pores les plus gros de la matrice argileuse et le retrait cristallin ou osmotique lié à des phénomènes physico-chimiques à l'échelle de la particule d'argile (Fabbri et al., 2017). Dans le cas des géomatériaux, il est d'usage de relier le retrait dû aux pressions capillaires au coefficient de Biot B , au degré de saturation et au module de compressibilité K^m selon la relation de (Coussy et al., 1998). Le retrait osmotique dépend grandement de l'argile présente dans la terre et de sa composition chimique. L'équation (9) en présente une approche simplifiée dans laquelle A est un paramètre déterminé à partir des résultats expérimentaux sur l'argile pure. Le module de compressibilité K^m dépend du module d'Young et du coefficient de Poisson (équation (10)) et le coefficient de Biot peut être approché par la relation (11). Le paramètre n^m représente la porosité de la matrice argileuse.

$$\epsilon_{\text{retrait}}^m = -\frac{BS_w p_c}{3K^m} - \frac{n^m(1 - S_w)}{3A} \quad (9)$$

$$K^m = \frac{E^m}{3(1 - 2\nu^m)} \quad (10)$$

$$B = \frac{2n^m}{1 + n^m} \quad (11)$$

Dans un deuxième temps, cette étude suppose que la pression capillaire est à l'origine de la cohésion du matériau, de façon à expliquer l'augmentation de la résistance à la traction lors du séchage. Il est par conséquent proposé de relier cette résistance R_t^m à la pression capillaire p_c , au degré de saturation S_w et au coefficient de Biot B selon l'équation (12) (Biot, 1955; Coussy et al., 1998).

$$R_t^m = BS_w p_c \quad (12)$$

Le critère de Rankine local proposé par (Sellier et al., 2018), (équation (13)) est utilisé pour déterminer la rupture du matériau. Ce critère permet de mettre en évidence la compétition entre l'augmentation de la cohésion lors du séchage due aux pressions capillaires et l'apparition d'une concentration de contrainte au bord des inclusions due au retrait empêché de la matrice argileuse pouvant entraîner une baisse de résistance.

$$f_{\text{fissuration}} = \sigma^{mo} - R_t^m \quad (13)$$

C. Comparaison entre le modèle et les résultats expérimentaux

Dans un premier temps, le modèle d'homogénéisation a été utilisé afin de prédire le retrait d'un mélange en fonction de sa teneur en sable. La pression capillaire de la matrice argileuse a été déterminée à partir de l'isotherme de sorption du mélange OS à l'aide de la formule de (van Genuchten, 1980) (équation (14)). Le chargement hydrique de la matrice a été recréé à partir de l'évolution du degré de saturation du mélange OS, et celui de l'inclusion est supposé nul.

$$p_c = M \left(\left(\frac{1}{S_w} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{1-m} \quad (14)$$

La figure 3 montre que le modèle d'homogénéisation développé dans cette étude, couplé à la relation de poro-mécanique (9) permettant d'exprimer le retrait conduit à prédire correctement l'évolution du retrait en fonction de la quantité de sable connaissant le comportement de séchage de l'argile seule.

Dans un deuxième temps, le modèle d'homogénéisation a été utilisé afin de prédire la résistance à la traction de la terre crue en fonction de la teneur en sable. Les essais de traction ont été faits sur un matériau humide (à la teneur en eau de fabrication) et sur un matériau sec (après avoir appliqué un chargement hydrique correspondant au séchage de la matrice argileuse).

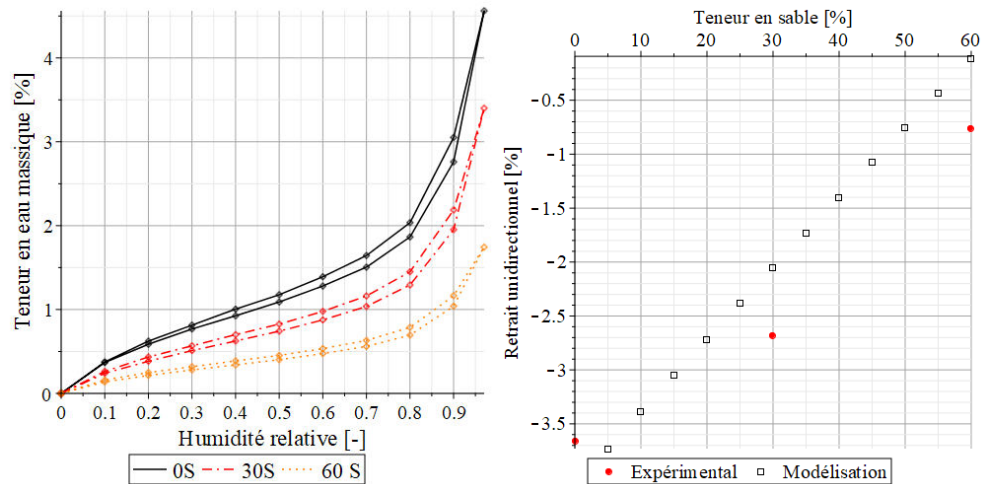


FIGURE 3. Isothermes de sorptions des trois mélanges (gauche) et comparaison entre les données expérimentales et le modèle numérique de la déformation macroscopique de retrait (droite)

La figure 4 présente les résultats issus de la modélisation numérique. La contrainte orthoradiale aux bords des inclusions après séchage augmente lorsque la quantité de sable augmente alors que la résistance du matériau sec diminue. Dans le cas des essais de traction réalisés sur le matériau avant le séchage, la contrainte orthoradiale est faible (0,101 MPa) et ne varie pas en fonction de la quantité de sable. De plus, la perte de résistance lorsque la teneur en sable augmente est beaucoup plus faible que dans le cas des matériaux secs. Ainsi, la concentration de contrainte induite par le retrait empêché de la matrice argileuse peut expliquer la perte de résistance de la terre crue lorsque la quantité de sable augmente.

Les résultats numériques obtenus en considérant que les pressions capillaires influencent la résistance du matériau sont proches de ceux obtenus lors de la campagne expérimentale pour les mélanges 30S et 60S. Ainsi, le gain de résistance de la terre crue après séchage peut être expliqué par l'augmentation des pressions capillaires partiellement contrebalancée par le retrait empêché dû aux grains de sable. L'erreur entre le modèle et le mélange 0S peut être expliquée par les défauts de fabrication dus à la consistance du matériau qui génèrent une perte de résistance. Ce modèle d'homogénéisation a donc permis de mettre en évidence la dualité entre le gain de résistance dû aux pressions capillaires et la perte de résistance liée au retrait empêché par le sable.

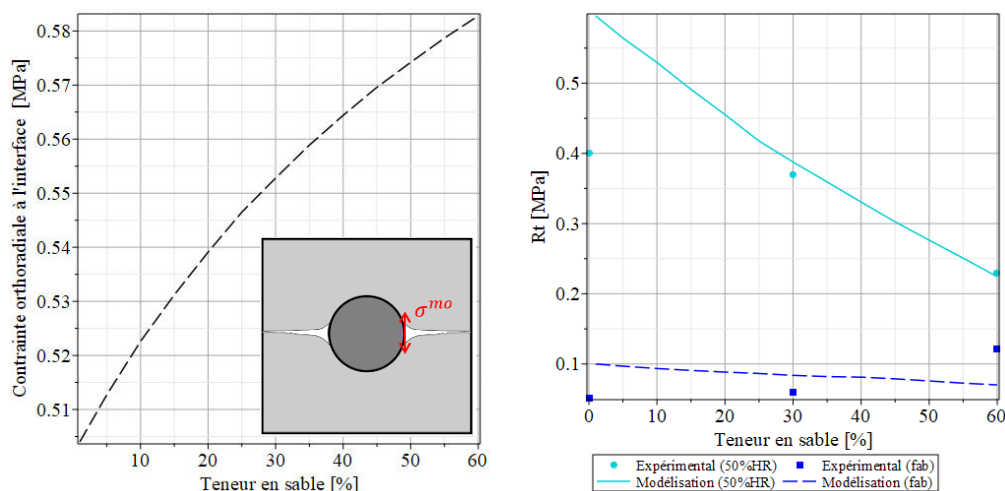


FIGURE 4. Evolution de la contrainte orthoradiale à l'interface après séchage (gauche) et de la résistance à la traction (droite) en fonction de la teneur en sable et de la teneur en eau

IV. CONCLUSION

Les résultats obtenus à l'aide d'un nouveau modèle d'homogénéisation non linéaire couplé avec la théorie de la poro-mécanique des milieux non saturés ont permis d'expliquer certaines propriétés de la terre crue. Bien que le modèle d'homogénéisation n'intègre la notion de fissuration pendant le séchage que sous la forme d'un critère de plasticité local en contrainte orthoradiale à la surface des grains de sable, les résultats obtenus par ce modèle sont relativement proches de ceux obtenus expérimentalement. Ainsi, les effets de la pression capillaire permettent d'expliquer deux phénomènes : le gain de résistance à la traction de la terre lors du séchage et la perte de résistance liée au retrait empêché de la matrice argileuse lorsque la quantité de sable augmente.

Afin d'améliorer le modèle actuel, il est possible de poursuivre la campagne expérimentale en testant les éprouvettes pour d'autres teneurs en eau. De plus, le couplage de la plasticité avec de l'endommagement devrait permettre d'améliorer la prédiction des performances de la terre crue à partir du comportement de la matrice argileuse. Les effets de l'eau sur la terre crue étant grandement liés au type d'argile présents dans le sol, une partition des effets de l'eau, en termes de pression osmotique et pression capillaire, devrait être conduite sur d'autres argiles afin de pouvoir appliquer ce type de modèle à d'autres sols, et de pouvoir ainsi prédire, ou optimiser, les performances mécaniques d'une terre en fonction de sa composition.

REFERENCES

- Anger, R., Fontaine, L., Joffroy, T., Eric, E.T., 2009. Construire en terre, une autre voie pour loger la planète. Grenoble.
- Biot, M.A., 1955. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. *J. Appl. Phys.* 26, 182–185.
- Bui, Q.B., Morel, J.C., Hans, S., Walker, P., 2014. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Constr. Build. Mater.* 54, 163–169.
- Champire, F., Fabbri, A., Morel, J.C., Wong, H., McGregor, F., 2016. Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. *Constr. Build. Mater.* 110, 70–78.
- Coussy, O., Dormieux, L., Detournay, E., 1998. From mixture theory to Biot's approach for porous media. *Int. J. Solids Struct.* 35, 4619–4635.
- Dewey, J.M., 1947. The Elastic Constants of Materials Loaded with Non-Rigid Fillers. *J. Appl. Phys.* 18, 578–581.
- Eshelby, J.D., 1957. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. *Proc. R. Soc. London* 376–396.
- Fabbri, A., Champiré, F., Soudani, L., McGregor, F., Wong, H., 2017. Poromechanics of Compacted Earth for Building Applications, in: *Poromechanics 2017 - Proceedings of the 6th Biot Conference on Poromechanics*. American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 664–671. <https://doi.org/10.1061/9780784480779.082>
- Leblond, J.B., Perrin, G., Suquet, P., 1994. Exact results and approximate models for porous viscoplastic solids. *Int. J. Plast* 10, 213–235. [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0749-6419(94)90001-9)
- Maghous, S., Dormieux, L., Barthélémy, J.F., 2009. Micromechanical approach to the strength properties of frictional geomaterials. *Eur. J. Mech* 28, 179–188.
- Sellier, A., Vidal, T., Verdier, J., Bucher, R., 2018. Un nouveau critère de fissuration pour les matériaux hétérogènes soumis à des sollicitations multi-physiques, in: *36èmes Rencontres de l'AUGC*. ENISE/LTDS, Saint Etienne.
- van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am* 44, 892–898.