

MODELISATION DE LA FISSURATION HYDRIQUE DES SOLS ARGILEUX PAR LA METHODE DE FISSURE COHESIVE

NUMERICAL MODELING OF DESICCATION CRACKING OF CLAYEY SOIL BY COHESIVE FRACTURE METHOD

Thi Dong VO^{1,2}, Ahmad POUYA², Sahar HEMMATI¹, Anh Minh TANG²

¹ IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France

² Ecole des Ponts, Marne-la-Vallée, France

RÉSUMÉ – L'objectif principal de ce travail est de présenter un ensemble de modèles constitutifs et une modélisation numérique qui permet de comprendre les résultats d'observation de l'évolution de la succion et de la déformation, ainsi que l'initiation et la propagation du réseau des fissures hydriques sous l'effet de séchage. La modélisation numérique utilise la méthode d'éléments finis et la loi de la fissure cohésive. Une simulation d'un échantillon de sol avec des comparaisons avec des données expérimentales permet d'évaluer les performances du modèle proposé.

ABSTRACT – The main objective of this research is to study by numerical simulation the evolution of suction and strain fields, the initiation and propagation of cracks under the effect of drying. A finite element method will be used with the cohesive fracture model for crack propagation. A simulation of a soil sample with comparisons to experimental data allows evaluating the proposed model.

1. Introduction

La fissuration due à la dessiccation est un phénomène très courant dans les sols, particulièrement dans les sols argileux. Sous l'effet de la variation des conditions climatiques, l'eau dans le sol peut s'évaporer. Cette diminution de la teneur en eau est accompagnée par une augmentation de la succion et de la contrainte effective qui cause le retrait du sol. Si ce retrait est restreint (par les conditions aux limites, la concentration de la contrainte ou l'hétérogénéité dans la structure du sol...), il génèrera une contrainte en traction. Dès que cette contrainte atteint la résistance à la traction du sol, le réseau des fissures pourra être formé. A cause du couplage hydromécanique dans le processus de formation et de propagation des fissures hydriques, plusieurs propriétés du sol sont influencées par ce processus. Du côté hydraulique, la présence du réseau des fissures change la perméabilité du sol, augmente l'infiltration des fluides et influence la courbe de rétention d'eau. Concernant les paramètres mécaniques, les fissures changent la compressibilité et la résistance du sol. C'est une des raisons importantes d'instabilités des ouvrages en sol comme des barrages ou des remblais.

La formation et la propagation des fissures par la dessiccation sont étudiées par de nombreux travaux de recherches. La méthode expérimentale (Peron et al. 2009; Lau 1987; Tang et al. 2011) a pour objectifs principaux d'étudier la formation et la propagation du réseau des fissures sous les conditions de température et d'humidité relative contrôlés et d'observer l'influence des paramètres comme le type du sol, l'épaisseur de l'échantillon et les conditions aux limites sur la morphologie du réseau des fissures créé. Dans les calculs numériques, la propagation est expliquée généralement par la Mécanique Élastique Linéaire des Fractures (H.Morris et al. 1991; Konrad et Ayad 1997). D'autres simulations numériques visant à simuler l'apparition d'un réseau des fissures hydrique

sous dessiccation ont été effectuées par la méthode des éléments discrètes (Amarasiri et al. 2010; Stirling 2014) ou des méthodes utilisant des éléments d'interfaces (Sánchez et al. 2014; Asahina et al. 2014; Amarasiri et Kodikara 2013).

Le couplage hydromécanique dans l'initiation et la propagation des fissures pose toujours de grandes difficultés de simulation numérique et il est de ce fait très simplifié dans la plupart des études. Dans cet article, nous proposerons une approche pour simuler le couplage hydromécanique du processus de dessiccation avec la formation des fissures en utilisant le modèle d'élasticité-endommagement des fissures cohésives (Pouya et Bemani 2015). La simulation numérique est réalisée en utilisant le code aux éléments finis Porofis (Pouya 2015) qui est conçu pour les matériaux POreux FISsurés. Le couplage hydromécanique est réalisé dans ce code par un processus itératif passant du problème hydraulique à la mécanique et vice versa. L'objectif principal de ce travail est de montrer la capacité du modèle proposé pour simuler le processus de dessiccation, ainsi que l'initiation des fissures. Une simulation d'un échantillon de sol comprenant quatre joints cohésifs a pour objectif d'observer l'évolution des paramètres du sol comme le degré de saturation et le tassement ainsi que la formation des fissures lors du séchage.

2. Equations constitutives

Dans cette partie, nous allons rappeler les équations principales du problème hydraulique et mécanique résolues dans le modèle. Pour plus de détails sur les modèles constitutifs, nous renvoyons aux travaux de Pouya et al. (2015) et Pouya et Bemani (2015).

2.1. Ecoulement hydraulique dans la matrice poreuse et dans la fissure

2.1.1. Ecoulement dans la matrice poreuse

L'écoulement dans la matrice est régi par la loi de Darcy et la conservation de la masse. Le changement du degré de saturation et de la porosité lors du séchage a été relié à la variation de la pression interstitielle par la courbe de rétention d'eau proposé par Van Genuchten et par le modèle poroélastique. Dans le code Porofis, la succion est comprise comme une pression de fluide négative. Par ailleurs, la diminution de la perméabilité de la matrice pourra être calculée à partir du degré de saturation à tous les instants. L'équation finale qui permet de déterminer l'écoulement dans la matrice poreuse avec une hypothèse du fluide incompressible est la suivante :

$$\operatorname{div}(k\nabla p) = C_M \frac{\partial p}{\partial t} + r \quad (1)$$

Avec $C_M = S \left(\frac{1}{N} + \frac{\phi \cdot dS / dp}{S} \right)$; $r = Sb \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}$, p la succion (MPa), $k = k_m / \mu$ où k_m est la perméabilité intrinsèque de la matrice (m^2) ; μ la viscosité dynamique du fluide (Pa.s) ; b le coefficient de Biot et N le module de Biot. Ces paramètres sont reliés au module de compressibilité du matériau K , le module de compressibilité des grains K_s et la porosité ϕ_0 par la relation : $b = 1 - K / K_s$ $1 / N = (b - \phi_0) / K_s$

2.1.2. Ecoulement dans la fissure

Dans le modèle, la conductivité transversale de la fissure est supposée infinie, ce qui implique que la pression est identique sur les deux côtés de la fissure et peut être représentée par une seule valeur de p variant le long de la fissure. L'écoulement dans la fissure est régi par la loi cubique : la conductivité hydraulique est une fonction de l'épaisseur e de la fissure et de la viscosité μ du fluide par la loi de Poiseuille :

$c = e^3 / 12\mu$. Dans le code Porofis, un modèle complet de l'écoulement hydraulique dans la fissure prenant en compte l'échange du fluide entre la fissure et la matrice et entre les fissures (en cas d'intersection des fissures) a été implémenté. L'équation finale qui permet de déterminer l'écoulement dans la fissure en supposant l'incompressibilité du fluide est la suivante:

$$\partial_s (c \partial_s p) = \|v\| \cdot \underline{n} + r^f \quad (2)$$

Avec $r^f = \frac{\partial e}{\partial t}$ dont s représente l'abscisse curviligne le long de la fissure, \underline{n} la vecteur unitaire normale et $\|v\| = \|v^+ - v^-\|$ la discontinuité de vitesse entre les deux lèvres de la fissure au point considéré qui est calculée automatiquement dans le code.

2.2. Comportement mécanique

Dans ce travail, le sol est supposé d'avoir un comportement élastique linéaire représenté par la relation suivante, avec C le tenseur d'élasticité.

$$\sigma = C : \varepsilon - b(Sp)\delta \quad (3)$$

La variation de la porosité est calculée en utilisant le model poroélastique linéaire :

$$d\phi = bd\varepsilon_v + \frac{dp}{N} \quad (4)$$

La loi d'élasticité-endommagement de fissure cohésive (Pouya et Bemani 2015) est utilisée pour modéliser le comportement mécanique des joints cohésifs. Précisément, les joints cohésifs sont mises en place explicitement et sont représentées numériquement par des éléments joints d'épaisseur nulle avec une petite conductivité hydraulique et une très grande raideur à l'état initial. La raideur et la conductivité hydraulique initiale des joints dépendent de l'espacement entre eux pour rassurer que la présence de ces joints cohésifs n'a pas d'influences sur la rigidité et la perméabilité équivalente du massif. Dans ce modèle, une variable d'endommagement D a été ajoutée. La variation de cette variable représente le processus d'endommagement à travers la diminution de la raideur des joints et le critère de résistance. Sous l'effet de l'évaporation, une contrainte en traction se développe et dès que cette contrainte atteint la résistance du sol, la fissure s'apparaît.

2.3. Couplage hydromécanique

Le couplage hydromécanique dans le code Porofis est effectué par un processus itératif passant du problème hydraulique au problème mécanique et vice versa. Le schéma général du calcul et du couplage hydromécanique est représenté sur la Figure 1 :

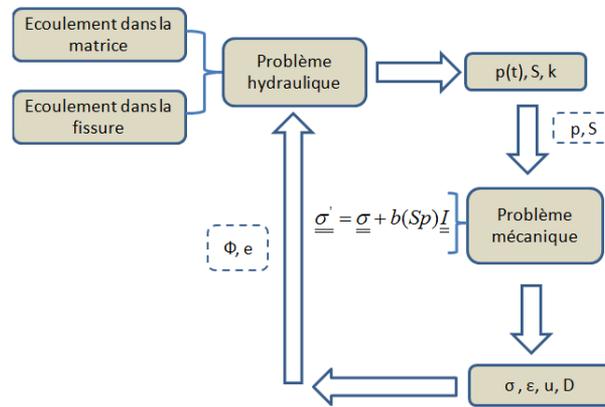


Figure 1 : Schéma de calcul avec le couplage hydromécanique

3. Simulation numérique

3.1. Observations expérimentales

Dans ce travail, le test de dessiccation reporté par Sanchez et al. (2013) est utilisé comme une donnée de base pour évaluer le modèle proposé. Dans ce test, une couche circulaire d'un limon (30% sable, 57% limon, 13% argile) de 100 mm de diamètre et de 13 mm de l'épaisseur préparée à l'état très molle a été laissée sous la condition contrôlée avec $19,5^\circ (\pm 0,3^0)$ de température et 37% ($\pm 4\%$) d'humidité relative. En utilisant la technique de scan laser 2D, toutes les caractéristiques du sol lors du séchage sont observées (le changement du volume, les tassements, la variation du degré de saturation...). Particulièrement, le développement du réseau des fissures lors du séchage (ouverture, profondeur) a été observé. L'évolution de la morphologie de l'échantillon au cours du temps a permis de distinguer deux phases lors de la dessiccation : dans le premier temps, le sol se tasse sans fissuration et après quelques temps pendant le séchage, la phase de fissuration commence, les fissures sont initiées et ensuite elles commencent à se propager. Les résultats principaux de ce test comme le tassement, le degré de saturation, ainsi que le développement du réseau des fissures seront utilisés comme la base d'évaluation du modèle proposé.

3.2. Détermination des paramètres et des caractéristiques du modèle

3.2.1. Détermination des paramètres du modèle

La courbe de rétention d'eau (Figure 2a) utilisée dans la modélisation a été décalée à partir d'une courbe expérimentale reportée par El Mountassir et al. (2011) et une valeur constante du module d'élasticité $E = 1 \text{ MPa}$ sera utilisée pour une succion inférieure de -0.2 MPa issue de la courbe œdométrique expérimentale faite par El Mountassir et al. (2014). Une simulation numérique est effectuée avec les paramètres suivants :

- Pour le sol : $E = 1 \text{ MPa}$; $\nu = 0,3$; $k_s = 10^{-8} \text{ m/s}$; $e_{initial} = 0,615$, $\alpha = 9,81 \text{ MPa}^{-1}$; $n = 1,60$; $m = 0,375$
- Pour les joints cohésifs : $K_{tt} = 1 \text{ MPa/mm}$; $K_{nn} = 1000 \text{ MPa/mm}$; $K_{tn} = K_{nt} = 0 \text{ MPa/mm}$; $\sigma_R = 0,1 \text{ MPa}$; $C = 0,06 \text{ MPa}$; $\varphi = 30^\circ$; $\beta = 1$; $e_0 = 10^{-4} \text{ mm}$
- Pour le fluide : $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 10^{-3} \text{ Pa/s}$

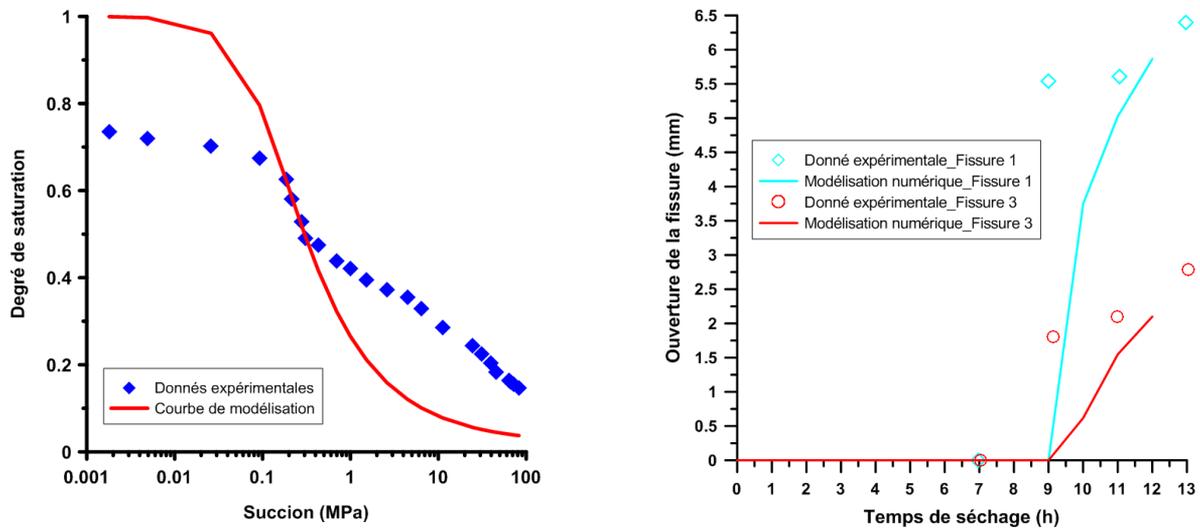


Figure 2: (a) Courbe de rétention d'eau et (b) Evolution d'ouverture des fissures 1 et 3 au cours de l'évaporation

3.2.2. Caractéristiques du modèle

La dimension de la simulation 2D est basée sur la géométrie de l'échantillon utilisée dans le test de Sanchez et al. (2013). Un échantillon rectangulaire de 100 mm de largeur et de 13 mm de l'épaisseur a été considéré dans cette étude. De plus, quatre joints cohésifs de longueur de 10 mm (de $Y = 3$ mm à $Y = 13$ mm), orientées verticalement aux positions observées dans l'échantillon expérimental ont été mises en place ($X = 5, 15, 50$ et 80 mm) et sont numéroté 1, 2, 3 et 4 de l'ordre de droite à gauche. Un schéma simple est présenté dans la Figure 3. Concernant les conditions aux limites : tous les déplacements horizontaux et verticaux sont bloqués sur les bords latéraux et sur la base de l'échantillon afin de présenter la cohésion parfaite entre le sol et la moule. La condition de l'environnement avec 20° de température et 40% d'humidité relative de l'air a été imposée sur la surface de l'échantillon à travers un taux d'évaporation qui n'est pas constant, mais diminuera à tous les instants comme une fonction de la succion à la surface de

l'échantillon par la formule proposée par Wilson (1990) :
$$AE = PE \times \left[\frac{\exp\left(\frac{gM}{RT} s\right) - h_a}{1 - h_a} \right]$$

Où : AE est le taux d'évaporation actuelle, PE le taux d'évaporation potentielle, g l'accélération de la pesanteur, M la masse moléculaire de l'eau, R le constant des gaz parfaits, T la température, h_a l'humidité relative de l'air et s la succion à la surface du sol.

3.4. Résultats

La Figure 4 présente la déformation de l'échantillon au cours de la dessiccation. En examinant cette figure, on peut distinguer clairement deux phases pendant le séchage. Dans les premiers temps d'évaporation (de $t = 0$ h à $t = 7$ h), le sol présente seulement une augmentation du tassement sans fissuration et tous les joints cohésifs restent fermés. Ensuite, à l'instant $t = 8$ h, la première fissure a été ouverte au côté gauche. L'ouverture de cette fissure est influencée par la condition aux limites. Les autres fissures sont apparues graduellement et leur ordre d'ouverture est similaire aux observations expérimentales.

L'évolution du tassement au milieu de la surface de l'échantillon (le point avec les coordonnées $X = 50$ mm, $Y = 13$ mm) a été observée au cours de l'évaporation. La Figure 5a présente la comparaison entre cette évolution en fonction du temps de séchage

correspondant à la simulation numérique et les données expérimentales. En effet, l'évolution du tassement en fonction du temps dépend à la perméabilité de la matrice. La petite différence entre les deux courbes sur cette figure peut être expliquée par l'utilisation d'une valeur de la perméabilité plus grande que les valeurs réelles. De plus, il faut rappeler que le comportement du sol a été supposé élastique linéaire avec un module d'Young constant. Cela est aussi la raison provoquant cette différence. Bien qu'il y ait un écart entre ces deux courbes, la forme du tassement est similaire pour les deux cas.

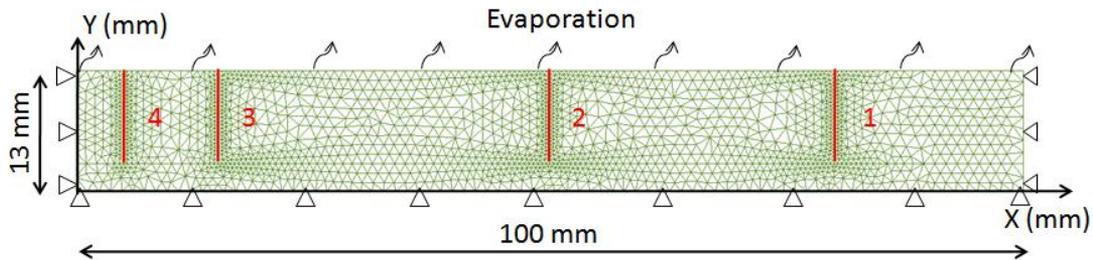


Figure 3 : Géométrie et conditions aux limites de la simulation numérique

La Figure 5b présente la diminution du degré de saturation et une comparaison entre la simulation numérique et les données expérimentales. Dans les temps considérés, cette diminution est presque linéaire pour les deux cas mais plus rapide pour la simulation numérique, ce qui peut être expliqué par une valeur de perméabilité plus grande considérée dans le calcul numérique.

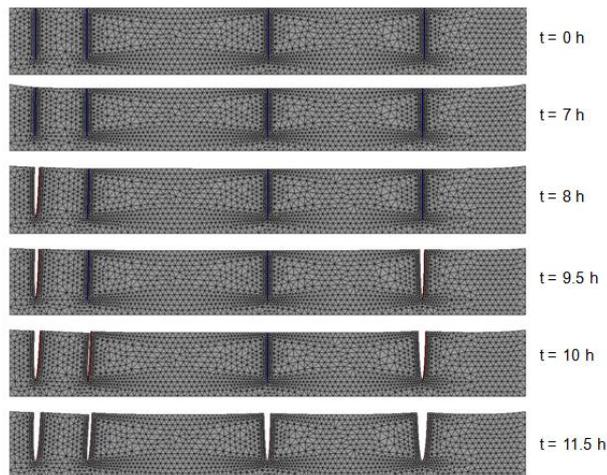


Figure 4 : Evolution de la déformation de l'échantillon au cours de l'évaporation

Dans le code Porofis, l'ouverture de la fissure est calculée comme la discontinuité de déplacement sur les deux lèvres de la fissure. L'ouverture des joints cohésifs 1 et 3 (Figure 3) ont été suivies et leur évolution dans la simulation numérique et dans les expériences sont présentées dans la Figure 2b. La limite entre les deux phases de la dessiccation est exprimée par le saut de l'ouverture. Dans les premières heures, l'ouverture de ces fissures est égale à zéro, correspondant la phase de tassement sans fissuration. Ensuite, il y a un saut de l'ouverture et ces ouvertures continuent d'augmenter avec le temps.

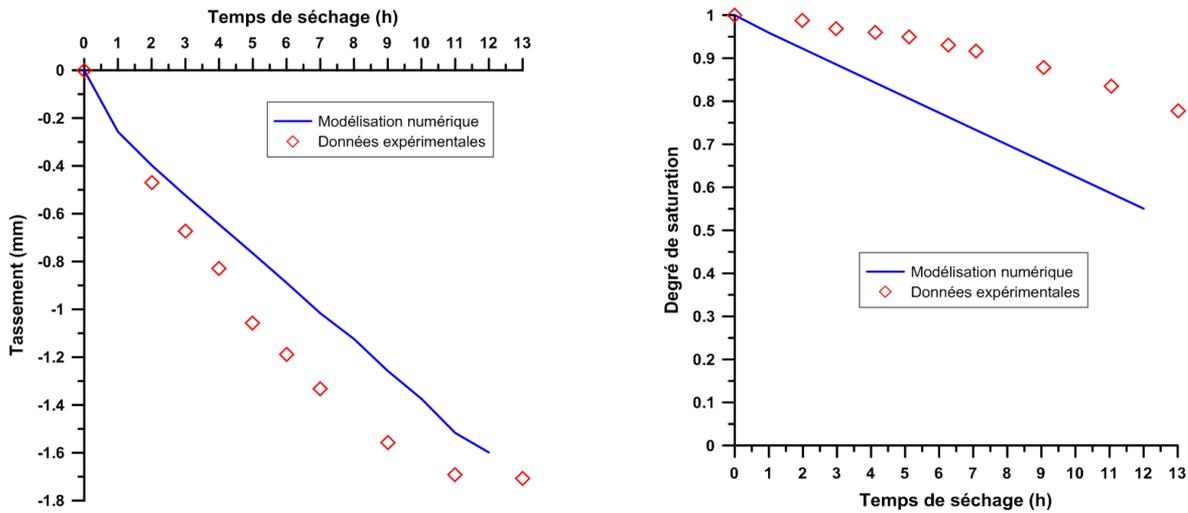


Figure 5 : (a) Evolution du tassement et (b) Evolution du degré de saturation en fonction du temps

4. Conclusions

Cet article a présenté une approche pour la simulation numérique de la fissuration lors de la dessiccation prenant en compte un faible couplage hydromécanique avec des calculs de l'écoulement et de la déformation dans la matrice et dans les fissures. La simulation numérique a été effectuée en utilisant le code aux éléments finis Porofis et en utilisant la loi de fissure cohésive (Pouya et Bemani 2015) pour représenter la propagation des fissures. La simulation numérique a permis de distinguer deux phases lors de l'évaporation : le tassement sans fissuration et l'initiation et ensuite la propagation des fissures. La simulation numérique a permis également d'observer l'évolution de la succion, du degré de saturation et du tassement ainsi que du champ de contrainte et de déformation au cours de l'évaporation. La comparaison entre les résultats de la simulation numérique et des données expérimentales a permis de valider le modèle proposé.

Malgré certains points faibles restant encore à améliorer, la simulation numérique a montré que la loi de fissure cohésive intégrée dans le code Porofis permet de modéliser la fissuration des sols argileux sous l'effet de séchage. L'étude de l'espacement entre les fissures et de leur profondeur est envisagée dans la suite de ce travail afin de mieux évaluer l'effet de cette fissuration sur la perméabilité des sols.

Référence

Amarasiri, A.L., K.Kodikara, J. et Costa, S., 2010. Numerical modelling of desiccation cracking. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35, pp.82–96.

Amarasiri, A.L. et Kodikara, J.K., 2013. Numerical Modeling of Desiccation Cracking Using the Cohesive Crack Method. *International Journal of Geomechanics*, 13, pp.213–221.

Asahina, D. et al., 2014. Hydro-mechanical model for wetting/drying and fracture development in geomaterials. *Computers & Geosciences*, 65, pp.13–23.

H.Morris, P., J.Graham et J.Williams, D., 1991. Cracking in drying soil. *Can.Geotech*, 29, pp.263–277.

- Konrad, J.-M. et Ayad, R., 1997. An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation. *Canadian Geotechnical Journal*, 34, pp.477–488.
- Lau, J.T.K., 1987. *Desiccation cracking of soils*.
- El Mountassir, G. et al., 2011. Behaviour of compacted silt used to construct flood embankment. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, 164(3), pp.195–210.
- El Mountassir, G., Sánchez, M. et Romero, E., 2014. An experimental study on the compaction and collapsible behaviour of a flood defence embankment fill. *Engineering Geology*, 179, pp.132–145.
- Peron, H. et al., 2009. Fundamentals of desiccation cracking of fine- grained soils : experimental characterisation and mechanisms identification. *Canadian Geotechnical Journal*, 46, pp.1177–1201.
- Pouya, A., 2015. A finite element method for modeling coupled flow and deformation in porous fractured media. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32.
- Pouya, A. et al., 2015. Modélisation numérique de la fissuration hydrique d'un sol non saturé. In *SEC2015*. pp. 1–10.
- Pouya, A. et Bemani, P., 2015. A damage-plasticity model for cohesive fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 73, pp.194–202.
- Sanchez, M. et al., 2013. Exploring desiccation cracks in soils using a 2D profile laser device. *Acta Geotechnica*, 8(6), pp.583–596.
- Sánchez, M., Manzoli, O.L. et Guimarães, L.J.N., 2014. Modeling 3-D desiccation soil crack networks using a mesh fragmentation technique. *Computers and Geotechnics*, 62, pp.27–39.
- Stirling, R.A., 2014. *Multiphase Modelling of Desiccation Cracking in Compacted Soil*.
- Tang, C.-S. et al., 2011. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Applied Clay Science*, 52, pp.69–77.
- Wilson, G.W., 1990. *Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems*.