

INFLUENCE DES FISSURES SUR LA DISTRIBUTION DE LA SUCCION DANS LE PROFIL D'UN SOL ARGILEUX: APPROCHE COMPARÉE PAR MODÉLISATION DU COUPLAGE THERMO-HYDRIQUE

D. Tabbal^{1,2,3}, I. Shahrour¹, F. Hage Chehade² et M. Sadek¹

¹Laboratoire de génie civil et de géo-environnement, université Lille1, France

²Centre de modélisation, école doctorale des sciences et de technologie, université libanaise,
Beyrouth, Liban

³Ashikaga institute of technology, department of civil engineering, Ashikaga Tochigi, Japan
diala_tabbal@hotmail.com

RÉSUMÉ

En période de sécheresse, les sols argileux, riches en particules fines, sont susceptibles de présenter des fissures à la surface du sol. La fissuration du sol argileux due à la sécheresse est un phénomène d'une importance certaine en géotechnique environnementale. En de nombreuses circonstances, les fissures de dessiccation entraînent des dommages dans divers types de structures. Pour illustrer l'effet de la fissuration, un modèle numérique bidimensionnel de l'interaction sol-atmosphère a été développé en prenant en compte le couplage thermo-hydrique d'un milieu argileux non saturé. Ce modèle est utilisé pour étudier le développement et l'évolution de la succion induite par l'échange sol-atmosphère. Les simulations traitent d'abord le cas d'un sol intact. Puis, l'étude est élargie pour étudier le cas d'un sol fissuré. Les principaux résultats révèlent une influence importante non négligeable de la présence de la fissure sur l'état hydrique du sol. Les résultats ont montré une évolution de succion très importante par rapport à celle du sol intact. La fissure accélère le transfert d'eau suite à une évaporation supplémentaire avec une concentration de fortes suctions d'abord en tête de l'échantillon puis suivie d'une succion accentuée à la verticale et l'horizontale.

Mots-clés: sol argileux, fissures, interaction sol-atmosphère, modèle numérique, succion

ABSTRACT

Soil shrinks as it desiccates, and the magnitude of shrinkage can be large for clay soils, rich in fine particles. Soil drying leads to cracks formation, causing a phenomenon of high significance in environmental geotechnics. To illustrate the effect of cracking, a numerical model of soil-atmosphere interaction has been developed taking into account the thermo-fluid coupling of an unsaturated clay soil. The model is used to simulate the evolution of suction during the drying process. The study simulates firstly the model of an intact soil. Then, the study is extended to investigate the case of a cracked soil. The main results showed a significant influence of the presence of crack on the suction profile. In cracked soil, further

loss of moisture occurs as direct evaporation from crack followed by an increase of the suction in the soil. High suction is initially concentrated on the head of the crack then extended to both vertical and horizontal sideways directions.

Keywords: cracks, clay, soil-atmosphere interaction, finite element model, suction

INTRODUCTION

Le réchauffement climatique est aujourd'hui un fait admis par tous à l'échelle mondiale. On note déjà, à l'échelle du globe, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan. Nous connaissons des vagues de chaleur et des périodes de sécheresse de plus en plus longues à cause du réchauffement climatique (Cojean *et al.*, 2009; Vidal & Soubeyroux, 2008). Cette sécheresse de type météorologique est liée à un manque de précipitations pour une période prolongée.

Des changements ont affecté plusieurs aspects de l'atmosphère et de la surface, modifiant le bilan énergétique global de la Terre. Ces changements augmenteront au fur et à mesure de la hausse de la température mondiale.

Le rapport du GIEC en 2007 (IPCC, 2007) confirme cette tendance et la responsabilité de l'activité humaine dans ce processus, notamment *via* le déstockage du CO₂. Selon les modèles et les scénarios, les projections évaluées font apparaître une hausse de la température moyenne à la surface du globe de 0,15 à 0,3 °C par décennie entre 1990 et 2005. Le document ajoute que, s'agissant de l'hémisphère nord, la moyenne des températures entre 1982 et 2012 est probablement la plus élevée des 1400 dernières années et qu'on s'attend à une augmentation de la fréquence des périodes de sécheresse au cours des prochaines décennies.

Les modèles prédisent que la température moyenne annuelle du globe s'élèvera de 0,2 °C par décennie au cours des vingt prochaines années, pour atteindre 1,1 °C à 6,4 °C d'ici 2100. Ce serait la plus forte hausse de température depuis 10 000 ans (IPCC, 2007).

Les observations effectuées sur tous les continents montrent que toute la planète est concernée par ce phénomène. En Europe, de graves sécheresses sont survenues au cours des dernières décennies engendrant des dommages très importants sur des milliers de constructions (Commission européenne, 2007).

En France, plus de 8000 communes françaises sont touchées durant l'été 2003 pour un coût d'environ un milliard d'euros (Caballero *et al.*, 2007; Moisselin *et al.*, 2002; Moisselin & Dubuisson, 2006). Dans les pays tropicaux en Afrique et aux Etats-Unis, la sécheresse est la plus coûteuse parmi les catastrophes naturelles (www.universcience.fr, 09/10/2003).

Le réchauffement mondial de la planète affecte aussi profondément les pays du Moyen-Orient. Au Liban, cela fait plusieurs années que la saison sèche commence plus tôt et dure plus longtemps. Selon les autorités météorologiques libanaises, l'impact est très important durant l'été 2014, et ce serait catastrophique si les mêmes conditions se reproduiraient l'année prochaine.

Quant à la géotechnique, l'effet de la sécheresse se traduit notamment par l'apparition des fissures de retrait à la surface du sol, spécialement les sols argileux sensibles aux variations hydriques. Une première analyse de ce phénomène montre que l'origine du problème vient de l'interaction sol-atmosphère qui engendre des variations de la teneur en eau ou de la succion du sol et provoque des variations du volume de ce dernier (Blight, 1997). Ainsi, bien comprendre le mécanisme d'interaction sol-atmosphère en présence des fissures est primordial dans l'analyse de l'effet de la sécheresse. La modélisation de ce phénomène est peu avancée. On ne trouve, dans la littérature, que quelques études numériques qui permettent l'évaluation de l'interaction sol-atmosphère (Zhang & Fredlund, 2003; Zhang *et al.*, 2011; Fredlund *et al.*, 2010). Cependant, aucune de ces études ne prend en compte l'interaction sol-atmosphère en présence des fissures.

Le travail présenté dans ce papier a pour but d'apporter une contribution du phénomène de fissuration et de sécheresse dans l'interaction sol-atmosphère. Une étude numérique est réalisée et présentée prenant en compte ce phénomène afin de prédire l'impact des fissures sur la distribution de la succion dans le sol.

DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

Modélisation numérique

Un modèle numérique a ainsi été développé pour simuler l'échange entre le sol et l'atmosphère. Ce modèle prend en compte le couplage thermo-hydrique d'un sol argileux non saturé soumis à sa surface à un épisode de sécheresse. Ce modèle a été implanté dans le code de calcul aux éléments finis 'ESNA' qui a été développé dans le laboratoire de génie civil et géo-environnement (LGCgE) en France pour l'analyse des transferts thermo-hydriques dans les sols non saturés (Al-Qadad, 2009).

Ce code est basé sur les travaux de Wilson (1990). Il prend en compte les transferts d'humidité (eau liquide et vapeur) et de chaleur couplés avec l'évaporation. Les deux transferts sont couplés à travers la pression de vapeur d'eau P_v . Il permet d'estimer les variations de la succion et de la teneur en eau, dans un sol argileux, induites par les conditions météorologiques.

Ce phénomène est d'abord étudié pour un sol intact soumis aux conditions climatiques. Puis, l'étude est élargie à un sol fissuré. Une comparaison entre les résultats du sol intact et fissuré est effectuée afin de montrer l'effet de la présence des fissures sur la distribution de la succion dans le cas des sols fins.

Conditions climatiques

Les conditions climatiques varient en fonction de la situation sur le globe et de la période dans le temps. Les températures, les précipitations, l'influence maritime ou continentale, l'altitude, les vents, les courants marins, la période de l'année... permettent de définir des grandes zones climatiques.

Les régions à climat océanique comme la côte Atlantique de l'Europe, la côte Pacifique de l'Amérique du Nord se caractérisent par un hiver doux et un été frais (pas plus de 23 °C en moyenne) et des précipitations réparties tout au long de l'année.

L'Afrique, l'Australie et l'Arabie saoudite disposent d'un climat tropical sec ou climat aride avec deux saisons à températures contrastées: été de 36 °C à 46 °C, saison sèche et hiver de 10 °C à 15 °C, saison humide.

On distingue, à proximité du tropique, le climat méditerranéen avec des hivers doux et pluvieux, étés secs et chauds et, généralement, périodes prolongées de soleil de 23 °C à 33 °C (pays du Moyen-Orient, Afrique du Nord, Espagne, sud de la France, Italie, Californie...). Le Liban, situé au bord de la mer Méditerranée, possède un climat type méditerranéen. L'influence maritime se manifeste dans le climat du Liban par la forte humidité et les brises alternantes. C'est pendant l'été que les effets de cette forte humidité sont les plus perceptibles et les plus désagréables, en raison des températures élevées.

Les simulations numériques effectuées dans notre étude correspondent à un épisode de sécheresse de 30 jours. Les conditions à la surface étant constantes durant toute la période des simulations (jour et nuit), on a pris les valeurs moyennes présentées ci-dessous:

- rayonnement solaire de 800W/m²
- température de l'air de 20 °C
- humidité relative de 60%
- vitesse du vent (mesurée à 2m de hauteur) de 8 Km/h.

Les conditions atmosphériques utilisées sont assumées constantes pendant toute la période de simulations.

Propriétés de sol

Le sol utilisé dans notre étude est de type argileux, à particules fines, sensible donc au phénomène de séchage. Les sols argileux constituent un milieu imperméable et mal aéré. Ils ont un coefficient de perméabilité très faible. La courbe de perméabilité utilisée dans les simulations est donnée dans la Figure 1. Elle présente des valeurs d'ordre 10⁻¹³ et 10⁻¹⁴ pour les fortes valeurs de succion.

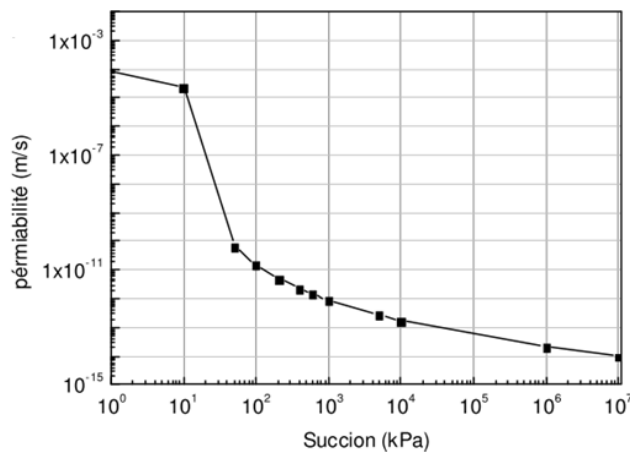


Figure 1. Courbe de perméabilité du sol argileux.

Massif de sol intact (non fissuré)

Le modèle numérique a été utilisé pour étudier la réponse d'un massif de sol argileux d'un mètre d'épaisseur soumis aux conditions illustrées dans la Figure 2. Le maillage adopté comporte 700 éléments triangulaires à 3 nœuds dans une analyse bidimensionnelle. La dimension des mailles verticales est plus petite à proximité de la surface du sol afin de décrire plus finement les phénomènes au voisinage de la surface, c'est-à-dire là où les variations sont les plus élevées.

À l'état initial, le sol est saturé: ceci correspond à une succion nulle en tous les nœuds du maillage. La température est uniforme et imposée à 20 °C dans tout le massif du sol.

Les conditions aux limites sont déterminées à partir des données météorologiques moyennes adoptées. Les valeurs de la radiation solaire, de l'humidité relative et de la vitesse du vent ont été utilisées pour calculer l'évaporation potentielle. Cette valeur représente la valeur cible de flux d'eau qui doit être calculée par le modèle au niveau de la surface du sol. La base du massif est supposée imperméable. Le flux d'évaporation et de chaleur sont permis juste à la surface du massif comme le montre la Figure 2.

Application à un massif de sol fissuré

Les argiles ne sont pas dilatantes en séchage, elles se fissurent. Le massif du sol fissuré comporte des fissures espacées de 40 cm ayant une profondeur de 15 cm et une largeur de 2 cm. Seule la moitié du domaine est considérée par raison de symétrie de géométrie et de conditions aux limites. Le modèle comporte ainsi une fissure ayant 1 cm de largeur et 15 cm en profondeur.

Comme le cas du sol intact, les simulations sont effectuées avec un massif de sol ayant un mètre de profondeur soumis aux mêmes conditions météorologiques et mêmes conditions initiales. La géométrie du modèle est présentée dans la Figure 3. De même, le maillage est constitué des éléments triangulaires à 3 nœuds.

Afin de prendre en compte la présence des fissures, les conditions atmosphériques sont imposées sur la surface du sol et sur la surface des fissures.

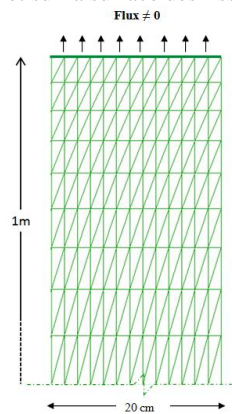


Figure 2. Géométrie et conditions aux limites du modèle utilisé pour le sol intact.

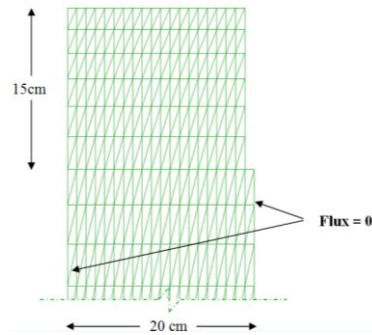


Figure 3. Géométrie et conditions aux limites du modèle utilisé pour le sol fissuré.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Distribution de la succion dans le profil du sol: cas du sol intact

Le développement de la succion dans le profil du sol intact est présenté dans la Figure 4 pour différents jours de simulation. L'examen des résultats montre que, dans le cas du sol intact, la distribution de la succion est uniforme durant les 30 jours de simulation. Cela peut être expliqué par l'homogénéité du massif du sol.

À noter que, l'échelle des couleurs dans les résultats présentés ci-dessous indique les variations de la succion dans le profil du sol et ceci est propre à chacun des deux cas (intact et fissuré), c.à.d. que ce n'est pas la même distribution des couleurs pour les deux cas.

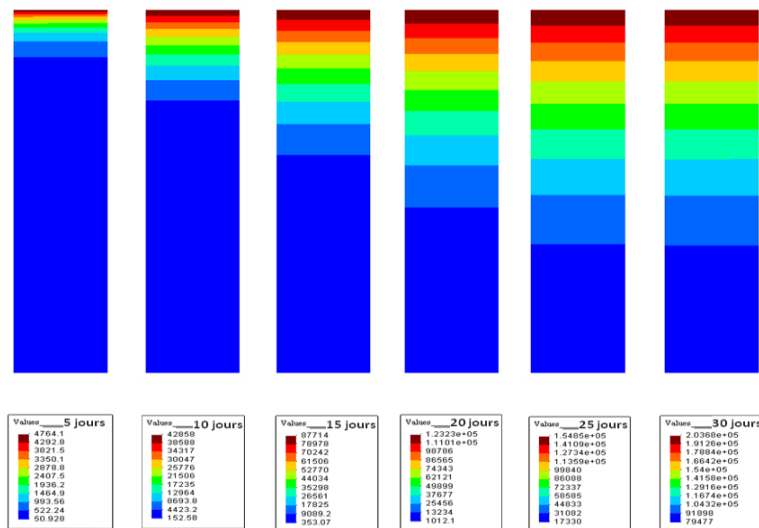


Figure 4. Développement de la succion dans le sol intact après 5,10, 15, 20, 25 et 30 jours de dessiccation.

Les valeurs de la succion sont d'abord faibles à la base du sol et augmentent avec l'épaisseur du sol jusqu'à une valeur maximale à la surface du sol; ce constat est justifié par le fait que l'évaporation se produit d'abord dans la couche superficielle du sol. Il en résulte alors une disponibilité d'eau réduite suivie par un accroissement de la succion.

Comme l'évaporation se poursuit, la zone de forte succion s'étend avec le temps et devient de plus en plus importante à cause de la chute de la teneur en eau dans cette zone. À la fin des simulations (après 30 jours), tout le massif de sol est concerné par le phénomène de sécheresse et la succion augmente dans tout le massif du sol.

Influence des fissures sur la distribution de la succion dans le profil du sol

L'impact des fissures sur la distribution de la succion dans le sol pour différents jours des simulations est présenté dans la Figure 5. Une comparaison entre les résultats du sol intact et ceux du sol fissuré montre que la présence des fissures affecte considérablement la distribution de la succion dans le sol. Des succions beaucoup plus élevées sont obtenues en présence des fissures dès les premiers jours de sécheresse. La fissure constitue en fait un espace supplémentaire qui accélère le transfert d'eau.

Les résultats révèlent la présence de deux zones de distribution de la succion dans le cas du sol fissuré: la première zone, située en profondeur, marque une distribution quasi-homogène de la succion. Dans cette zone, les fissures ne semblent pas avoir d'influence significative sur la distribution de la succion.

Contrairement au cas du sol intact, la deuxième zone montre un développement très important et non-uniforme de la succion. Cette zone de distribution non uniforme de la succion est concentrée en tête de l'échantillon au voisinage des fissures: il s'agit de la zone d'influence des fissures.

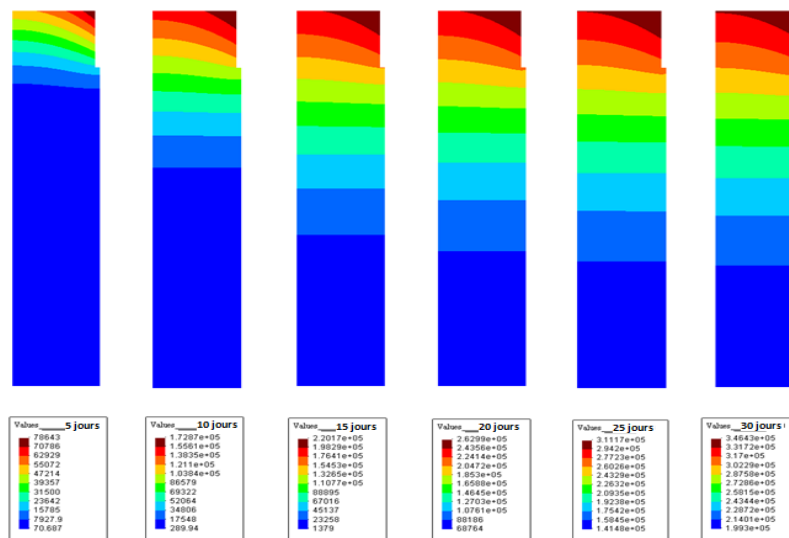


Figure 5. Développement de la succion dans le sol fissuré après 5, 10, 15, 20, 25 et 30 jours de dessiccation.

En effet, la fissuration accélère le phénomène d'évaporation à la surface du sol. La présence des fissures expose le sol en profondeur aux effets météorologiques et crée de nouvelles surfaces d'évaporation. Ainsi, l'évaporation ne se fait plus seulement à travers la surface du sol, mais aussi à travers les surfaces créées par la fissuration. Il en résulte alors des changements des propriétés du sol en cours d'assèchement notamment au niveau de sa capacité de rétention d'eau.

Avec le temps, on note une extension de la zone de fortes succions dans les directions verticale et horizontale avec une concentration très élevée de la succion en tête de la fissure en raison de l'évaporation bidimensionnelle qui se produit par les fronts de la fissure.

L'avantage de la modélisation effectuée sur les deux massifs du sol permet non seulement de suivre l'évolution de la succion avec et sans fissure mais encore de quantifier les résultats. La variation de la succion à la surface du massif et à 50 cm de profondeur pour les sols intacts et fissurés est alors présentée dans la Figure 6 ci-dessous.

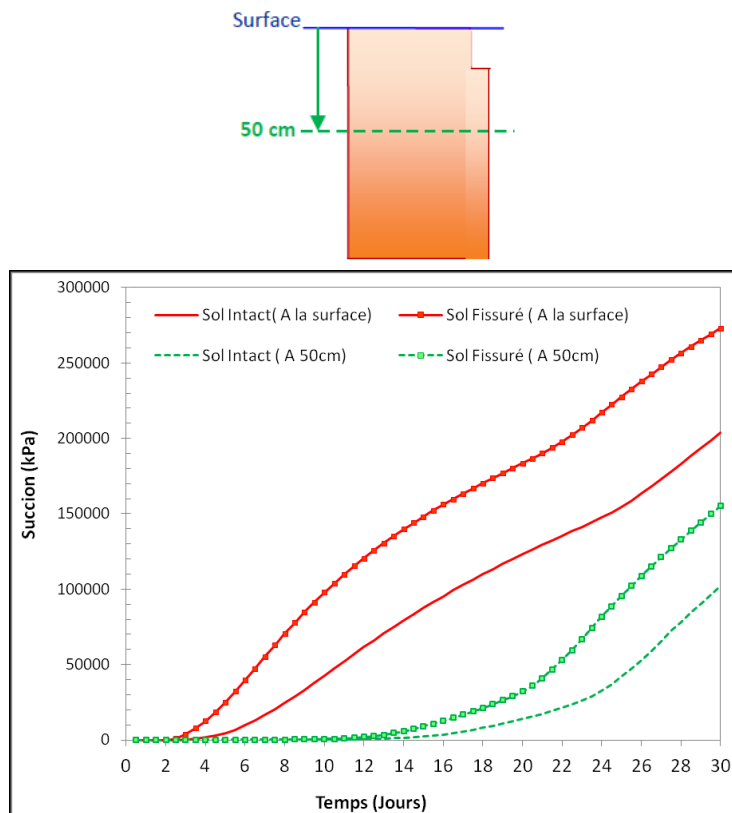


Figure 6. Influence des fissures sur la variation de la succion à la surface et à 50 cm de profondeur.

Une première analyse des résultats montre une influence visible de la fissure à la surface du sol à partir du 3^{ème} jour; alors qu'à 50 cm de profondeur, cette influence n'apparaît qu'à partir du 13^{ème} jour. Avant ces périodes, l'effet de la fissure est négligeable. La présence des fissures accélère la cinématique de perte d'eau surtout dans la couche superficielle et fait augmenter la succion. C'est ainsi qu'on voit la différence entre les deux périodes.

L'allure des courbes de la Figure 7 vient confirmer cette tendance. Ces courbes montrent la comparaison des résultats de la succion à l'échelle logarithmique dans le massif du sol (près de la fissure) en fonction du temps.

D'abord, au bout des 5 premiers jours, la succion à la surface du sol fissuré est pratiquement deux fois supérieure à celle du sol intact. Pour une profondeur au delà de 40 cm, les fissures ne semblent pas avoir d'influence significative. Ensuite, l'effet des fissures apparaît progressivement dans les zones plus profondes. En effet, les variations de la succion dans le massif du sol sont principalement liées à celles de la teneur en eau. Avec un sol plus sec, une énergie plus importante est nécessaire pour extraire l'eau. Ceci explique le développement important de la succion à la base du massif à partir du 20^{ème} jour.

Après 30 jours de sécheresse, la présence de la fissure induit une augmentation de la succion à la surface du sol et à 50 cm de la surface de 67% et 52% respectivement. Cette différence est significative mais pas trop énorme vue les fortes valeurs de succions dans les deux cas. L'allure des courbes correspondant au 30^{ème} jour est liée au fait que l'équilibre hydrique s'est établi à la fin de cet épisode. La teneur en eau résiduelle est atteinte dans tout le profil du sol intact ainsi que fissuré.

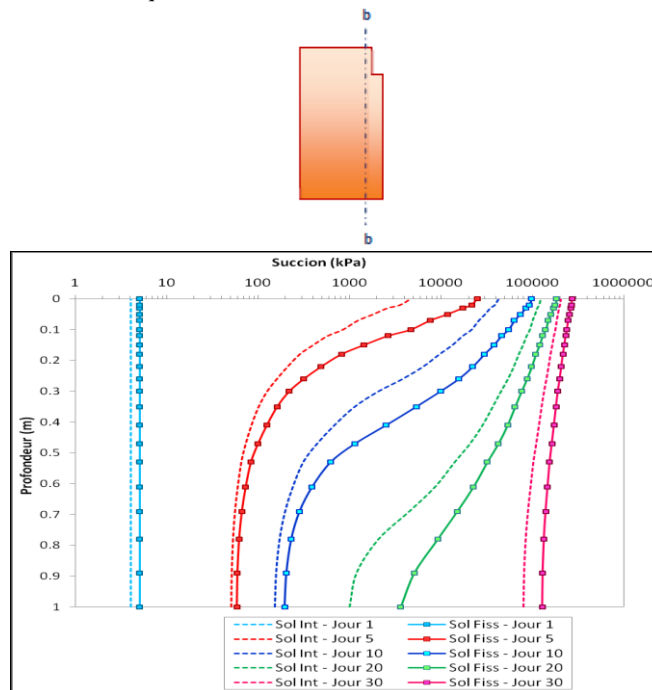


Figure 7. Influence de la fissure sur le développement de la succion dans le profil du sol.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats de ce travail soulignent l'impact de la présence des fissures sur le comportement hydrique des sols argileux. Une étude numérique a été menée afin de simuler l'influence des fissures de dessiccation sur les profils de succion induits par l'échange sol-atmosphère. Les simulations numériques sont d'abord réalisées pour le cas d'un sol intact. Puis, l'étude est étendue afin de considérer le cas d'un sol fissuré.

Les résultats de modélisation ont montré que la présence des fissures peut modifier sensiblement le flux d'eau et par conséquent le profil de succion. La fissuration accélère considérablement l'effet de l'évaporation engendrant ainsi un développement plus important de la succion et ceci dans tout le profil du sol.

Quant à la distribution de la succion, celle-ci varie suite à l'apparition des fissures. Pour un sol intact, la distribution de la succion est homogène dans tout le massif du sol. Par contre, dans le sol fissuré, une distribution non uniforme de la succion est observée dans la partie superficielle du sol avec une concentration de fortes succions en tête de l'échantillon. Puis, au fur et à mesure, cette zone de fortes succions se propage horizontalement et verticalement. Au bout des premiers jours, seule la partie superficielle est influencée par la fissure; à la fin des simulations, tout le massif du sol se trouve impliqué par le phénomène de fissuration. Les fissures sont loin d'être négligeables dans l'étude du comportement des sols argileux.

À long terme, les résultats de cette modélisation peuvent être implantés dans un code analytique de calcul de déformations pour les sols fins sensibles aux variations hydriques.

En plus, cette étude nous permettra de se renseigner sur les conditions à éviter pour contrôler la fissuration des sols argileux; ce qui nous permettra de développer des recommandations pour la protection des sols en zone exposée au risque de sécheresse.

RÉFÉRENCES

- Al-Qadad, A. 2009. *Influence de la sécheresse sur les structures: modélisation de l'interaction sol-atmosphère-structure*. Ph.D. thesis, université des sciences et technologies de Lille, France.
- Blight, G.E. 1997. Interactions between the atmosphere and the earth. *Géotechnique*, 47(4): 715-767.
- Caballero, Y., Morel, S., Habets, F., Noilhan, J., Le Moigne, P., Lehenaff, A., Boone, A. 2007. Hydrological sensitivity of the Adour Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, 43(7): W07448.
- Cojean, R., Audiguier, M., Geremew, Z., Laribi, S., Thénevin, I., Cui, Y.J., Tang, A.M., Ta, A.N., Heck, J.-V., Taillefer, N., Deffontaines, B., Kaveh, F., Fruneau, B. 2009. *Aléa et risque sécheresse: analyse du comportement des sols argileux lors de cycles climatiques extrêmes*. Rapport Fondation MAIF, pp. 52.
- Commission européenne 2007. *Manque d'eau et sécheresse en Europe: la Commission se saisit de cette question vitale*. Bruxelles, available online on: http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/scarcity_en.htm

- Fredlund, D., Houston, S., Nguyen, Q., Fredlund, M. 2010. Moisture movement through cracked clay soil profiles. *Geotech. Geol. Eng.*, 28: 865- 888.
- IPCC-GIEC 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques: rapport de synthèse*. Un rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 114p.
- Moisselin, J.-M., Schneider, M., Canellas, C., Mestre, O. 2002. Les changements climatiques en France au XXe siècle. *La Météorologie*, 38: 45-56.
- Moisselin, J.-M., Dubuisson, B. 2006. Évolution des extrêmes de températures et de précipitation en France au XXe siècle. *La Météorologie*, 54: 33-42.
- Vidal, J.P., Soubeyroux, J.M. 2008. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol (Impact of climate change on droughts and soil moisture in France, in French). In: Magnan, J.P., Cojean, R., Cui, Y.J., Mestat, P. (eds.) SEC 2008 – *International Symposium Droughts and Constructions*, 1: 25-31. Laboratoire central des ponts et chaussées, Marne-la-Vallée, France.
- Wilson, G.W. 1990. *Soil evaporative fluxes for geotechnical engineering problems*. Ph.D thesis, university of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- Zhang, L.M. and Fredlund, D.G. 2003. Characteristics of water retention curves for an unsaturated fractured rock. In: *Proceedings of the 2nd Asian Conference on Unsaturated Soils, UNSATASIA2003*, Osaka, Japan, 15–17 April 2003, edited by D. Karrube, A. Iizuka, S. Kato, K. Kawai and K. Tateyama, pp. 425-429.
- Zhang, L.M., Li, J.H., Fredlund, D.G. 2011. Unsaturated conductivity function for unsaturated cracked soil. In: *Unsaturated Soils*, Antonio Gens (ed.), pp. 993-999.