

Étude de l'impact de l'hygrométrie sur la fissuration d'un sol gonflant

Impact of the hygrometry on the swelling soil cracking

Auvray R., Rosin-Paumier S., Abdallah A., Masrouri F.
LEMTA (CNRS, UMR 7563), Université de Lorraine, France.

RÉSUMÉ : Les sols gonflants soumis à des cycles de séchage et d'humidification sont susceptibles de se fissurer dès le premier cycle de dessiccation. Ces fissures introduisent des modifications du comportement mécanique du matériau. L'objet de cette étude est la présentation d'un dispositif complet de quantification de l'impact des sollicitations hydriques sur les phénomènes de fissuration. Pour cela, plusieurs éprouvettes de sol possédant des caractéristiques et des dimensions identiques ont été soumises à des hygrométries et des succions contrôlées. Les résultats obtenus dans un intervalle de succion allant de 8,5 à 113 MPa, montrent qu'il est important d'évaluer non seulement l'intensité des fissures mais également la surface de retrait radiale du sol, afin d'interpréter correctement les corrélations entre les fissures et les différents paramètres de compactage et de séchage.

Mots clés : sol gonflant, fissure, succion, analyse d'images.

ABSTRACT: Desiccation cracks appear on swelling soils submitted to drying/wetting cycles. These cracks could dramatically modify the mechanical behavior of the materials. This study presents a new device to quantify the impact of the hydric variations on the cracking phenomenon. A series of clayey silt specimen with the same initial compaction parameters was submitted to controlled suction and hygrometry conditions. The results obtained for imposed succions comprised between 8.5 to 113 MPa, showed the importance of the measurement of not only the crack area, but also the radial shrinkage area for a better understanding of the correlations between crack area and the compaction and desiccation parameters.

Key-Words: Swelling Soil, Crack, Suction, Image Processing.

1. INTRODUCTION

Les sols gonflants soumis à des cycles de séchage et d'humidification sont susceptibles de se fissurer. Ce phénomène peut entraîner une augmentation de la perméabilité (infiltration, écoulement préférentiel,...) particulièrement redouté dans des structures du génie civil et du stockage des déchets (Philer *et al.*, 1995, Drumm *et al.*, 1997, Malawitz 1998, Albrecht *et al.*, 2001; Yuen *et al.*, 1998, Rayhani, *et al.*, 2007, Sadek *et al.*, 2007). Par ailleurs, les fissures influencent les paramètres mécaniques des matériaux. L'intensité de la fissuration et la forme du réseau de fissure divergent en fonction de nombreux paramètres tels que la teneur en eau, la densité, la surface du sol exposée ou la teneur en argile. Quelques études ont eu pour objet l'étude de l'impact des conditions de séchage et des cycles de séchage/humidification sur le réseau de fissures. Cependant, elles sont souvent caractérisées par des séchages et des humidifications intenses faisant intervenir plusieurs paramètres à la fois tels que la température, l'hygrométrie, la quantité d'eau rajoutée lors des humidifications, rendant difficile les conclusions sur l'impact d'un paramètre en particulier (Miller *et al.*, 1998, Tang *et al.*, 2008 et 2010). Rodriguez *et al.*, (2005) et Lloret *et al.*, (1998) ont présenté des dispositifs permettant d'imposer une hygrométrie et une température constante à des éprouvettes tout en suivant leurs variations de teneur en eau ainsi que leur état de fissuration. Ces expériences ont permis d'étudier qualitativement les relations existantes entre la fissuration et les conditions de compactage et de séchage des éprouvettes.

Dans ce travail un dispositif couplé à une méthode d'analyse d'images a été développé afin de quantifier l'aire des fissures et le retrait des éprouvettes de sol soumises à des sollicitations hydriques. Ce dispositif permet d'étudier l'impact des conditions de compactage et des sollicitations hydriques sur la fissuration d'éprouvettes de sol gonflant.

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

Le sol utilisé dans cette étude est un mélange limon-argile en proportion massique 40 % de limon de Xeuilley et 60 % de

bentonite FVO dont les propriétés sont données dans le tableau 1. La courbe de rétention est obtenue par la méthode osmotique pour les succions entre 0 et 8,5 MPa et par la méthode des solutions salines pour les succions supérieures à 8,5 MPa (Figure 1). Le matériau a une teneur en eau à l'optimum Proctor de 26 % avec une densité sèche maximale de 1,47.

Tableau 1 : Paramètres caractéristiques des matériaux utilisés.

	Normes	Limon de Xeuilley	Bentonite	Mélange
w_L (%)	ASTM, 1998	36,8	117	82,2
w_p (%)	ASTM, 1998	27,6	41,2	29,5
I_p (%)	ASTM, 1998	9,2	75,8	52,6
VBS (g/100g)	ASTM, 2009	3,13	18,41	11,53
γ_s (kN/m ³)	ASTM, 2006	26,5	25,5	25,8

2.1. Préparation des éprouvettes et dispositif expérimental

Les éprouvettes de 20 mm d'épaisseur sont préparées par compactage statique dans un moule cylindrique de diamètre 102 mm au fond rainuré. Les rainures du moule sont destinées à empêcher le retrait au cours du séchage. Ces éprouvettes sont ensuite placées dans l'enceinte du dispositif (Figure 2). L'hygrométrie de l'enceinte est imposée par l'intermédiaire des solutions salines.

Le dispositif est placé dans une salle climatisée dont la température est de $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Ce dispositif permet la mesure continue de la masse, de la hauteur, et de la surface des

fissures déterminées par l'analyse des images obtenues tout au long de l'essai (Figure 2).

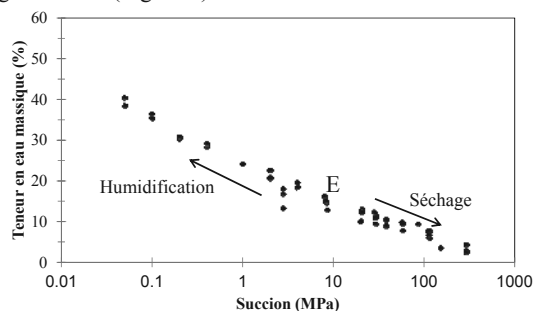


Figure 1 : Courbe de rétention du mélange (E : état initial).

La teneur en eau est déterminée par l'intermédiaire des mesures de masse obtenues par une balance toutes les 10 min. L'évolution de la hauteur de l'éprouvette est mesurée toutes les 8 heures, par un capteur laser de déplacement fixé sur une vitre glissante. Ce capteur peut être déplacé manuellement pour être au-dessus de l'éprouvette lors des mesures. Ces valeurs permettent de déterminer l'évolution de la déformation verticale $\Delta h/h_0$, h_0 étant la hauteur de l'éprouvette après compactage.

L'acquisition automatique des photos de la surface de l'éprouvette toutes les 30 min permet, par l'intermédiaire d'une méthode d'analyse d'images, d'évaluer l'aire des fissures et le rapport entre la surface des fissures et la surface de l'éprouvette CIF (Miller et al., 1998). Deux valeurs de CIF différentes, Cif^* et Cif_{tot} ont été définies pour cette étude (Eq. 1 et 2) :

$$Cif^* = \frac{\text{Aire des fissures}}{\text{Aire de la surface de l'éprouvette}} \quad (1)$$

$$Cif_{tot} = \frac{\text{Aire des fissures} + \text{Aire du retrait}}{\text{Aire de la surface initiale de l'éprouvette}} \quad (2)$$

Les mesures des différents paramètres sont effectuées jusqu'à l'obtention de l'équilibre de la masse de l'éprouvette qui est atteint lorsque la variation de la teneur en eau de l'éprouvette en 24 heures est inférieure à 0,05%.

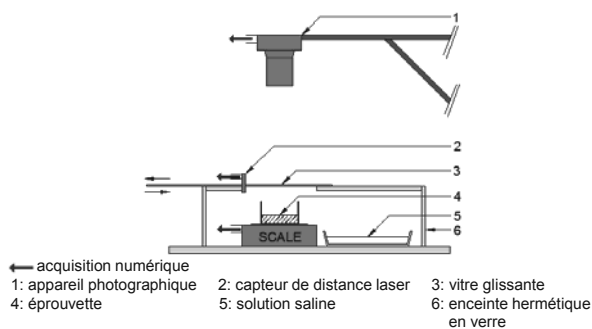


Figure 2 : Schéma du dispositif expérimental.

2.2. Méthode d'analyse d'images

Afin de déterminer la surface des fissures au cours des expériences, nous avons développé et automatisé une méthode d'analyse d'images dans le logiciel *ImageJ* (Rasband 2006). La méthode d'analyse d'images utilisée, est basée sur les travaux de Lakshmikantha et al., (2009).

Chaque image est filtrée afin de révéler ses différences par rapport à l'image initiale de l'éprouvette correspondant à la surface de l'éprouvette avant séchage. Les intensités de niveaux de gris des éléments des fissures et celles du sol de l'image filtrée sont suffisamment différentes pour permettre une binarisation efficace de l'image par l'usage d'un seuil. Ainsi les pixels des éléments du sol (plus claires) sont transformés en pixels blancs, tandis que les pixels des fissures sont transformés en pixels noirs. Des combinaisons d'outil morphomathématiques et de filtres sont ensuite utilisées pour optimiser l'efficacité du seuillage.

Un algorithme a été développé afin de déterminer la valeur du retrait moyen à partir du calcul du nombre de pixel noir entourant la surface de sol.

L'aire des fissures à l'intérieur de la surface de l'éprouvette est alors obtenue grâce à l'outil « Analyze Particle » de *ImageJ*, qui permet le comptage des pixels noirs d'images binaires (Lakshmikantha et al., 2009).

La méthode a été validée de deux manières différentes par comparaison des résultats obtenus sur des images construites numériquement avec une surface de fissures connue, et sur des images d'éprouvettes fissurées dont la surface des fissures avait été déterminée par une méthode manuelle similaire à celle de Peng et al., (2006) (Figure 3). L'écart entre les valeurs obtenues par ces deux méthodes est de 2,5 % pour l'aire de retrait et de 5 % pour l'aire des fissures.

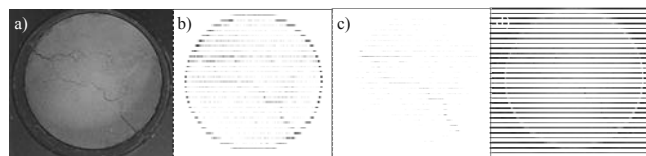


Figure 3 : Validation de la méthode, a) Image réelle fissurée, b et c) Images obtenues par la méthode d'analyse d'images pour la détermination du retrait et des fissures, d) détermination manuelle de l'aire des fissures et du retrait.

3. ESSAIS

Le tableau 2 montre les paramètres et les conditions de séchage des essais présentés dans cet article. La succion initiale des éprouvettes mesurée par la méthode du papier filtre (Fawcett et Collis-George, 1967, ASTM, 1994) est de l'ordre de 8,5 MPa. La succion imposée dans le dispositif d'essai est appliquée par une solution saline saturée (K_2CO_3). Cette succion correspond à 113 MPa ($w = 7\%$, voir figure 1), et impose un chemin de séchage hydrique aux éprouvettes. L'imposition de ce chemin de séchage induit, dès les premières heures (5 à 9h) de l'essai, l'apparition de fissures de dessiccation. L'équilibre hydrique est atteint au bout de 8 jours.

Tableau 2 : Caractéristiques des éprouvettes et les conditions de séchage.

n° essai	h (mm)	w (%)	Densité	Hygrométrie et succion imposées (%) - MPa
Essai A	20,0	15,30	1,270	44 - 113
Essai B	20,0	14,64	1,264	44 - 113
Essai C	19,9	14,40	1,280	44 - 113

4. RÉSULTATS

Dans cette partie, les évolutions de la teneur en eau, des déformations verticales et radiales des éprouvettes, ainsi que de la surface des fissures et du retrait des éprouvettes au cours du séchage sont mesurées et comparées.

4.1. Évolution de la teneur en eau pondérale

Les évolutions des teneurs en eau diffèrent au début du séchage à cause de faibles écarts de la teneur en eau initiale de compactage. Au bout d'un jour de dessiccation, les courbes se superposent. Ainsi, l'évolution de la teneur en eau pondérale est identique pour ces trois essais (Figure 4).

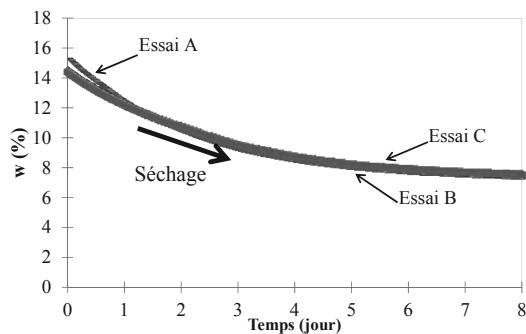


Figure 4 : Evolution des teneurs en eau en fonction du temps en séchage.

4.2. Impact de l'hygrométrie sur les déformations verticales et latérales

La figure 5 présente les évolutions des déformations verticales mesurées à l'aide du capteur laser au cours du séchage. Les amplitudes des déformations verticales sont très proches pour les trois essais. Les éprouvettes B, C et A présentent des déformations verticales à la fin du séchage respectivement de 1,75 %, 1,98% et 2,08 %. De plus, la cinétique de déformation est la même pour les essais A et C et légèrement plus lente pour l'essai B. Compte tenu des incertitudes de mesure on peut conclure que les déformations verticales sont quasi identiques.

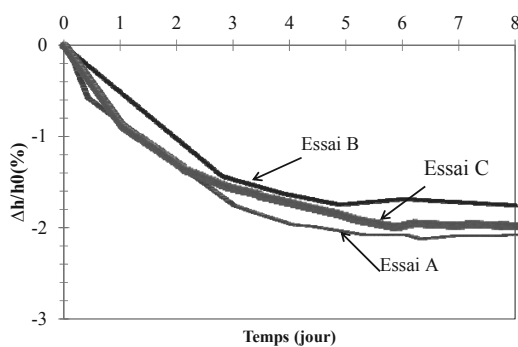


Figure 5 : Evolution des déformations verticales au cours du séchage.

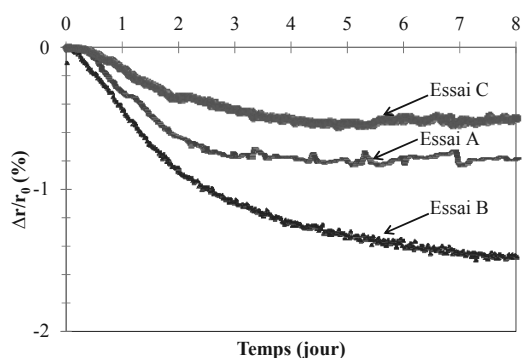


Figure 6 : Évolution des déformations latérales en fonction du mode de séchage.

L'évolution des déformations latérales au cours du séchage, présentée sur la figure 6, est déduite de l'évolution du retrait

moyen au cours de la dessiccation, obtenu grâce à la méthode d'analyse d'images. Bien que les cinétiques de séchage et les états initiaux soient proches, la cinétique et l'amplitude des déformations latérales diffèrent d'un essai à l'autre (Figure 7). En effet, les déformations latérales à la fin du séchage varient de 0,5% pour l'essai C à 1,5% pour l'essai B et la cinétique de déformation de l'essai B est 2,5 fois plus grande que celle de l'essai C. Afin d'interpréter ces différences, il est nécessaire de compléter ces résultats avec l'évolution du réseau de fissuration.

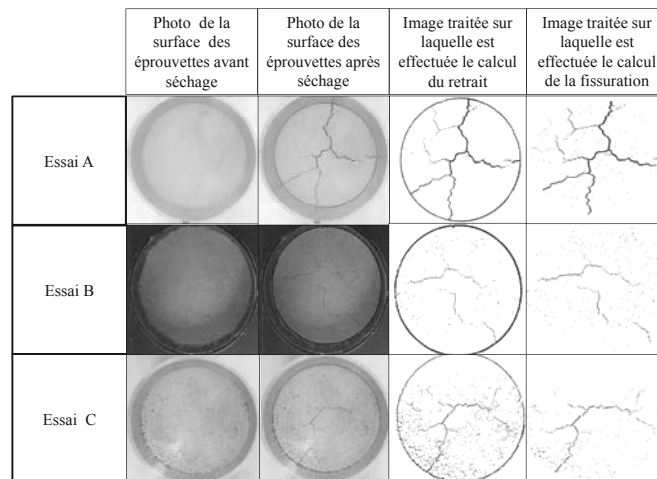


Figure 7 : Photo de l'état initial et après séchage de éprouvettes.

4.3. Évolution de la fissuration

La figure 8 présente les évolutions du Cif^* (aire des fissures sur l'aire de la surface des éprouvettes) au cours du séchage pour chaque essai. L'éprouvette B qui présente la plus grande déformation latérale est celle dont la surface est la moins fissurée, tandis que l'éprouvette A avec des déformations latérales plus faibles présente 8 fois plus de fissures que les essais B et C.

Pour mettre en évidence la part de l'aire des fissures et du retrait radial au cours du séchage, le paramètre Cif_{tot} (aire des fissures + aire du retrait sur l'aire de la surface des éprouvettes) a été étudié pour ces trois éprouvettes (Figure 9).

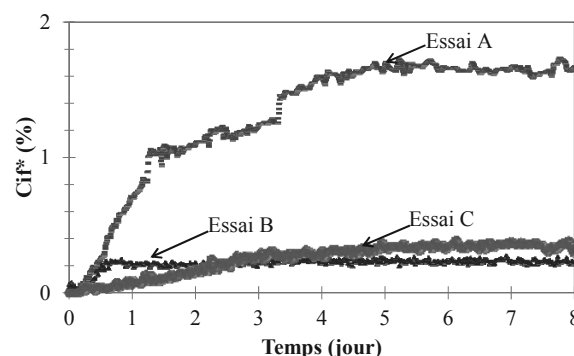


Figure 8 : Évolution du Cif^* en fonction des sollicitations hydriques.

Les essais A et B présentent des évolutions de Cif_{tot} similaires, les cinétiques d'évolution ainsi que les amplitudes sont identiques. L'évolution de Cif_{tot} de l'essai C est moins rapide et les valeurs à l'équilibre hydrique sont nettement inférieures à celles des essais A et B.

Les photos des surfaces des éprouvettes permettent de confirmer les tendances précédemment observées (Figure 7). En effet, la surface de l'essai B après séchage présente des fissures fines et un retrait important, la surface de l'essai A

présente des fissures larges et un retrait plus réduit, et l'essai C présente un retrait faible ainsi que des fissures fines.

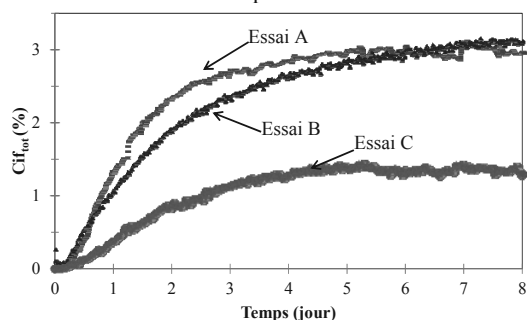


Figure 9 : Evolution de Cif_{tot} en fonction des modes de séchage.

Les différences de déformations latérales et d'aires des fissures observées entre les essais A et B, dans la mesure où leur cinétique de séchage, leurs déformations verticales ainsi que leur Cif_{tot} sont similaires peuvent être dues à des différences au niveau de l'interface entre l'éprouvette et les rainures du moule. En effet, une adhésion moins forte entre l'éprouvette et les rainures entraîne un retrait libre plus important et une fissuration plus faible, tout en conservant des déformations verticales, les valeurs de Cif_{tot} et des variations de teneur en eau pondérales similaires. Ainsi, l'adhésion entre l'éprouvette de l'essai B et les rainures pourrait être moins forte que pour l'essai A.

Les différences observées pour l'essai C sont plus difficilement interprétables dans la mesure où à la fois le retrait, le Cif^* et le Cif_{tot} sont différents des essais A et B. Ces différences pourraient être attribuées à la densité légèrement plus forte de l'éprouvette C par rapport aux éprouvettes A et B. En effet, Rodriguez et al (2007) ont également montré que la fissuration et le retrait diminuent lorsque la densité augmente. Des essais supplémentaires sont en cours pour mettre en évidence les paramètres importants intervenant lors d'un chemin de dessiccation.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis la mise en œuvre d'un dispositif expérimental complet permettant l'étude de la fissuration et du retrait des éprouvettes subissant des sollicitations hydriques contrôlées. Ce dispositif et la méthode du traitement d'images associée seront utilisés afin d'étudier la fissuration et la cicatrisation des éprouvettes de sols gonflants soumises à des cycles hydriques de séchage-humidification.

Plusieurs éprouvettes présentant des conditions de compactage similaires ont été soumises à une même sollicitation hydrique. La cinétique de séchage ainsi que les déformations verticales observées sont similaires d'un essai à l'autre. Cependant, les déformations radiales ainsi que l'aire des fissures observées diffèrent, pointant ainsi la nécessité de mesurer et de confronter les évolutions de la teneur en eau, des déformations verticales et latérales, ainsi que du Cif^* et du Cif_{tot} afin d'interpréter correctement les résultats.

6. REFERENCES

- Albrecht, B., Benson, C., Member, 2001. Effect of desiccation on compacted natural clays. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering* 127 (1), 67-75.
- ASTM, D5298-94, 1994. Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. *Annual book of ASTM standards*. Vol. 04-09. 154-159.
- ASTM, D4318-98, 1998. Standard test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. In *annual Book of ASTM standards* 16 p.
- ASTM, D5550-06, 2006. Standard test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. In *annual Book of ASTM standards*, Vol. 04.08.
- ASTM, C837-09, 2009. Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay. In *annual Book of ASTM standards*, Vol. 15.02 2p.
- Drumm, E. C., Boles, D.R., Wilson, G., V., 1997. Desiccation cracks result in preferential flow. *Environmental Geotechnics* 15(2), 22-25.
- Fawcett R.C. Collis-George N., 1967. A filter- paper method for determining the moisture characteristics of soil. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*. Vol. 7. 162-167.
- Lakshmikantha, M., Prat, P., Ledesma, A., 2009. Image analysis for the quantification of a developing crack network on a drying soil. *Geotechnical Testing Journal* 32 (6), 505-515.
- Lloret, A., Ledesma, A., Rodriguez, R., Sanchez, M., Olivella, S., Suriol, J., 1998. Crack initiation in drying soils. *Proceedings of the Second International Conference on Unsaturated Soils*, Beijing China, International Academic Publisher, 497-502.
- Malawitz, K., 1998. Crack-healing in damaged compacted clay liners in waste deposits. In *Proceedings of the 3rd International Congress on Environmental Geotechnics*, Lisbon, Portugal, 7-11 September, 347-352.
- Miller, C.J., Mi, H., Yeiller, N., 1998. Experimental Analysis of Desiccation Crack Propagation in Clay Liners. *Journal of the American Water Resources Association* 34 (3), 677-686.
- Philer, M., Boles, D., Drumm, E., Wilson, G.V., 1995. Comparative response of two barrier soils to post compaction water content variations. *ASCE GSP* 46, 591-608.
- Peng, X., Horn, R., Peth, S., Smucker, A., 2006. Quantification of soil shrinkage in 2D by digital image processing of soil surface. *Soil & Tillage Research* 91, 173-180.
- Rasband, W.S., 2006. "ImageJ", National Institute of health, <http://rsb.info.nih.gov/ij>
- Rayhani, M.H.T., Yanful, E.K., Fakher, A., 2007. Desiccation-induced cracking and its effect on the hydraulic conductivity of clayey soils from Iran. *Revue Canadienne de Géotechnique* 44, 276-283.
- Rodriguez, R., Sánchez, M., Ledesma, A., Lloret, A., 2007. Experimental and numerical analysis of desiccation of a mining waste. *Canadian Geotechnical Journal* 44(6), 644-658.
- Sadek, S., Ghanimeh, S., El-Fadel, M., 2007. Predicted performance of clay-barrier landfill covers in arid and semi-arid environments. *Waste Management* 27, 572-583.
- Tang, C., Shi, B., Liu, C., Zhao, L., Wang, B., 2008. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Engineering Geology* 101, 204-217.
- Tang, C.S., Cui, Y.J., Tang, A.M., Shi, B., 2010. Experimental evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of Clayey soil. *Engineering Geology*, 114, 261-266.
- Yuen, K., Graham, J., Janzen, P., 1998. Weathering induced fissuring and hydraulic conductivity in natural plastic clay. *Canadian Geotechnical Journal* 35 (6), 1101-1108.