

FISSURATION D'UNE ARGILE SOUS TRACTION INDIRECTE PAR FLEXION : ANALYSE PAR CORRELATION D'IMAGES

CRACKING PHENOMENON OF CLAYS UNDER INDIRECT TENSILE TEST BY BENDING: DIGITAL IMAGE CORRELATION ANALYSIS

Lamine IGHIL AMEUR¹, Mahdia HATTAB²

¹ *Cerema Normandie-Centre, Blois, France*

² *Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique des Matériaux – LEM3 (UMR 7239), Université de Lorraine, Metz, France*

RÉSUMÉ – L'objectif de cette recherche est d'analyser, par une approche expérimentale, l'effet de la succion initiale et la fissuration d'une argile non saturée. A travers des essais de flexion sur des poutrelles d'argile, soumises à différents niveaux de succion (361 MPa, 110 MPa et 38 MPa), l'approche consistait à estimer la force de traction qui contrôle l'initiation des fissures et suivre leur propagation via la corrélation d'images numériques.

ABSTRACT – The aim of this research is to analyze, by an experimental approach, the initial suction effects and cracking phenomenon of unsaturated clayey soil samples. Under a series of bending tests on a clay submitted to different level of suction, the approach consisted first in estimating the tensile force which controls the initiation of cracks and follow-up their propagation process using digital image correlation method.

1. Introduction

Les propriétés mécaniques et hydrauliques des milieux argileux peuvent être considérablement affectées par la présence de fissures dans le sol. Le phénomène de dessiccation, qui accentue la succion dans le sol, semble être l'un des facteurs de la fissuration des argiles. Les fissures ont un impact important sur les paramètres physiques du sol et peuvent affecter sa stabilité. Durant un chemin de séchage, Wei et al. (2016) montrent que différents mécanismes peuvent provoquer l'initiation et la propagation de la fissuration. Ils ont démontré que la fissuration par traction (mode d'ouverture par extension) était l'un de ces mécanismes.

Plusieurs auteurs ont étudié les paramètres d'initiation et de propagation de la fissuration par traction en adoptant différentes approches notamment la traction par flexion (Bishop et Garga, 1969 ; Ajaz et Parry, 1975b ; Tang et Graham, 2000 ; Lakshmikantha et al., 2012). Par ailleurs, Ajaz et Parry (1975) ont utilisé les résultats de deux essais différents : l'essai de flexion sur poutre et l'essai de traction directe ont été réalisés sur deux argiles différentes (l'argile Gault et l'argile Balderhead). Les résultats montrent que la déformation de traction à la rupture augmente avec la teneur en eau. En fonction du pourcentage de la teneur en eau, les auteurs montrent que la déformation de traction à la rupture au niveau de la contrainte de traction maximale varie de 2 à 15 % pour les essais de flexion sur poutre, et de 1 à 5 % pour les essais de traction directe. Des observations similaires sur l'effet de la teneur en eau ont été obtenues sur une argilite soumise à différents niveaux de succion dans Wei et al. (2016b). L'investigation menée par Ighil Ameer (2016) tentait de caractériser une déformation critique à partir de laquelle l'amorçage de la fissuration se produit. Cela avait pour but d'identifier la résistance admissible du sol à la traction au-delà de laquelle il serait susceptible de se fissurer.

Cette recherche présente un nouvel appareil développé pour tester la force de traction indirecte par flexion sur des poutrelles d'argile. Une série d'essais de traction a été réalisée sur des poutrelles d'argile initialement soumises à différents niveaux de succion initiale. L'approche a d'abord consisté à étudier le comportement global en estimant la force de traction maximale F_{max} à l'origine de l'amorçage des fissures de traction. La force F_{max} est obtenue entre 2,5 N et 3,6 N, elle varie différemment selon le niveau de la succion initiale imposée.

Ensuite, à l'aide de la méthode de corrélation d'images numériques (CIN), la propagation des fissures a été suivie avec précision par le développement des déformations locales autour de la fissure et au niveau de la pointe de la fissure.

2. Matériaux et programme expérimental

2.1. Propriétés des matériaux et préparation des poutrelles

Le sol argileux utilisé dans cette étude était la kaolinite K13, une argile industrielle commercialisée par Sibelco (Paris, France). Cette argile synthétique semble être similaire à la Kaolinite P300, plus connue. Les limites de liquidité w_L et de plasticité w_P sont respectivement d'environ 40% et 20%. La densité des grains solides est égale à $\gamma_s/\gamma_w = 2,65$. La particule de kaolinite élémentaire est constituée d'un ensemble de feuillets empilés (Hattab et al., 2014).

Pour préparer les échantillons, l'argile (étant initialement à l'état sec sous forme de poudre) a été progressivement saturée d'eau jusqu'à une teneur en eau environ deux fois la valeur de sa limite liquidité. Ensuite, la boue a été introduite dans un consolidomètre à double drainage et progressivement consolidée par compression unidimensionnelle sous une contrainte verticale de 120 kPa (Fig. 1a).

Une carotte d'argile préconsolidée a ensuite été extraite du consolidomètre, et découpée en poutrelles de 35 mm de longueur, 10 mm de hauteur et 10 mm de largeur (Fig. 1b). Ces poutrelles ont ensuite été soumises à trois niveaux différents de succion (361 MPa, 110 MPa et 38 MPa) dans un dessiccateur à vide utilisant des solutions salines (Fleureau et al., 1993).

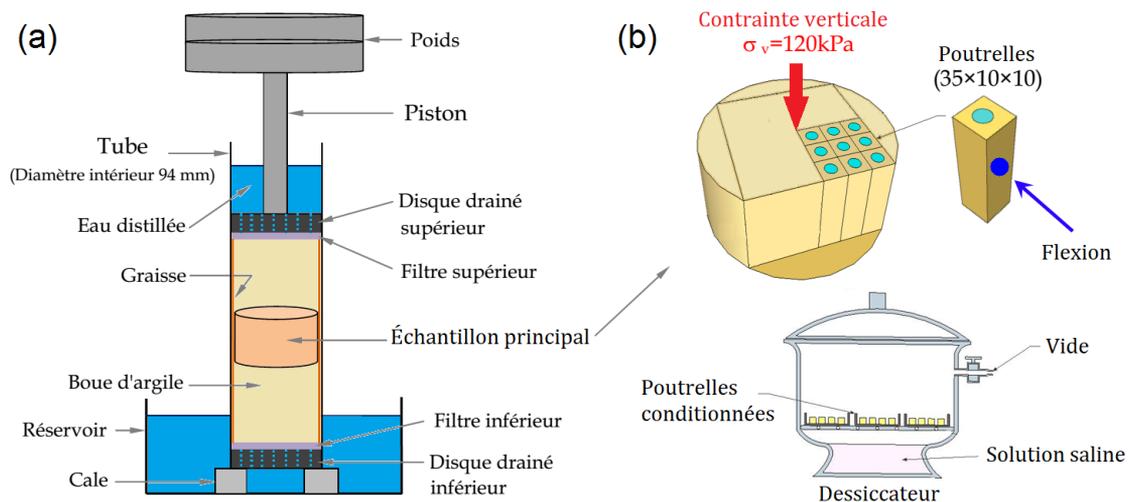


Figure 1. Mode opératoire de préparation des poutrelles : (a) consolidomètre, (b) découpe des poutrelles d'argile.

Pendant la phase de séchage jusqu'à l'équilibre, et pour chaque succion imposée, la teneur en eau des poutrelles a été mesurée sur d'autres petits échantillons similaires par la technique de double pesée. Cela est fait chaque jour en sortant les petits échantillons

du même dessiccateur pour la pesée. Les valeurs moyennes sont présentées sur la figure 2 en fonction du temps.

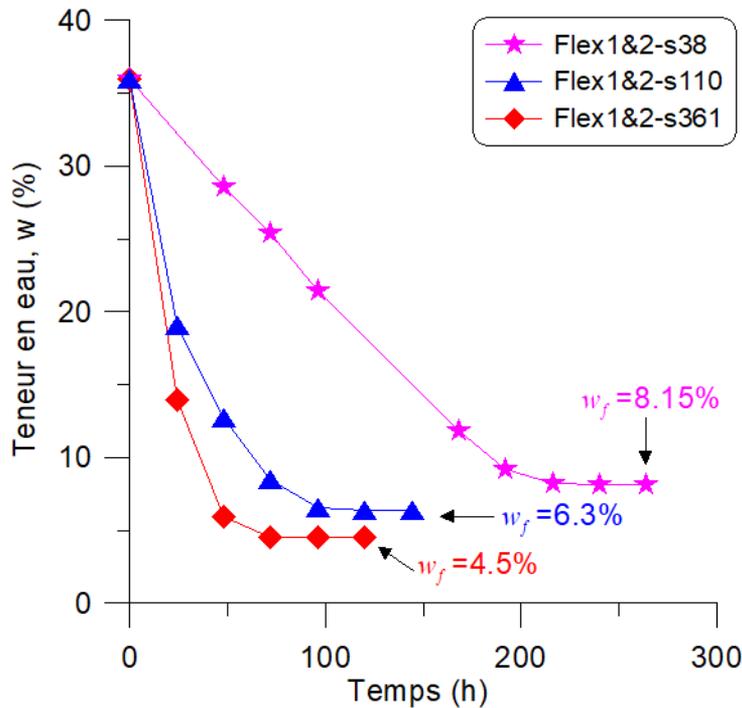


Figure 2. Variations de la teneur en eau en fonction du temps durant la phase de conditionnement des poutrelles dans le dessiccateur.

La cinétique du retrait est définie par le rapport de la différence de la teneur en eau divisée par celle du temps (dw/dt), et calculée entre le début du retrait et le début de la phase d'équilibre. Les résultats montrent que la cinétique du retrait des échantillons dépend du niveau de succion initiale. Elle était très rapide à un niveau de succion élevé (361 MPa) et moins importante pour la faible succion (38 MPa). Toutes les courbes ont ensuite été stabilisées à un état d'équilibre, à une teneur en eau donnée appelée w_f .

Les propriétés des poutrelles sont présentées dans le tableau 1. Pour chaque niveau de succion initiale, les essais de traction ont été effectués avec deux échantillons différents.

Tableau 1. Propriétés des poutrelles conditionnées pour les essais de flexion

Niveau de succion imposée		Faible (38 MPa)	Moyen (110 MPa)	Fort (361 MPa)
Nom d'essais	Essai 1	Flex1-s38	Flex1-s110	Flex1-s361
	Essai 2	Flex2-s38	Flex2-s110	Flex2-s361
Humidité relative (%)		75,6	44,7	6,9
Cinétique du retrait dw/dt (%/h)		0.14	0.40	0,61
Teneur en eau après l'équilibre (%)		8,15	6,30	4,50

2.2. Dispositif expérimental de flexion

Avant les essais de flexion, les poutrelles ont été retirées du dessiccateur à la fin du conditionnement sous différents niveaux de succion ont été immédiatement recouverts de paraffine pour éviter tout changement d'humidité relative.

L'appareil de flexion a été développé par Katti (2012) spécialement adapté aux essais de flexion sur poutrelles. Ensuite, l'appareil a été amélioré par la mise en place d'une

caméra permettant de réaliser l'analyse par la CIN. Le système se compose principalement d'un système de flexion sur poutrelles, d'une caméra, d'un comparateur et d'une table de contrôle équipée d'un capteur de force (Fig.3).

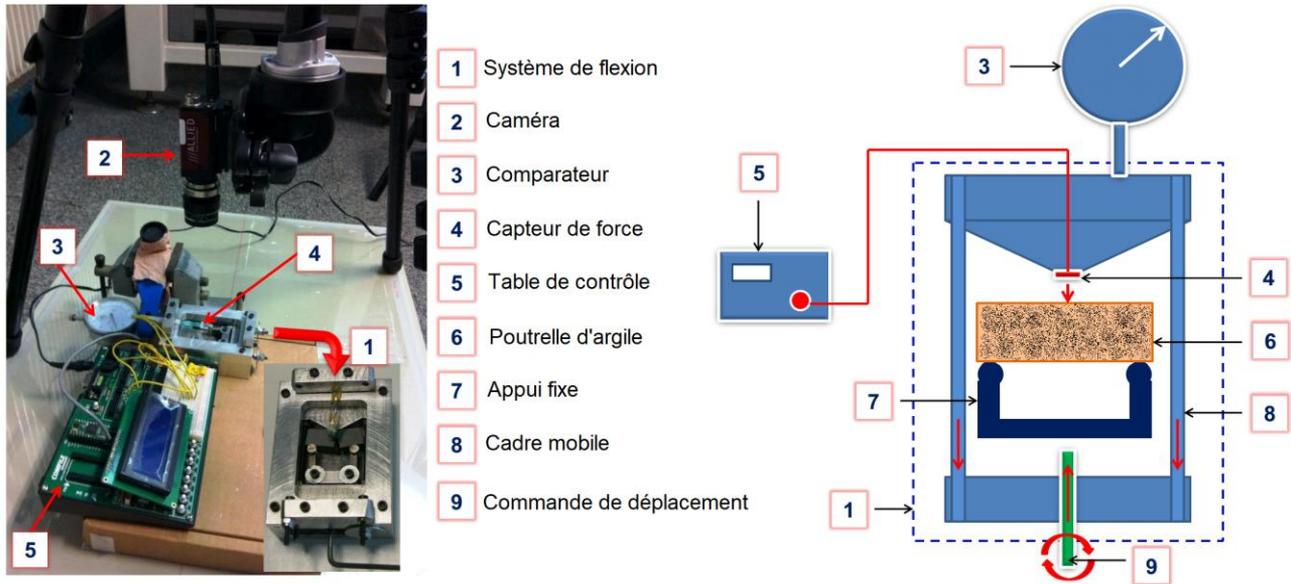


Figure 3. Dispositif expérimental de flexion sur poutrelles.

L'essai commence par le déplacement induit grâce à la translation libre unidimensionnelle du cadre mobile. Ce dernier est équipé d'un capteur de force en contact avec la poutrelle d'argile, qui permet d'enregistrer la force appliquée. Le déplacement imposé au cadre mobile a également été mesuré. La commande de déplacement a été contrôlée à une vitesse de 10^{-3} mm/min. Pour chaque valeur de force, des images ont été simultanément capturées par la caméra pour les analyses par la CIN.

3. Résultats et discussion

3.1. Comportement mécanique global

La figure 4 montre les résultats de la force de traction F en fonction du déplacement de tous les essais effectués. À un niveau de succion initiale donnée, les courbes montrent des tendances d'évolution cohérentes entre les deux essais. La force de traction nommée F_{max} correspond à la force de traction maximale enregistrée. Les résultats montrent l'influence de la succion initiale imposée sur le pic F_{max} qui augmente clairement avec l'augmentation de la succion. Après le pic, on observe une baisse plus marquée de la force de traction pour une succion plus élevée.

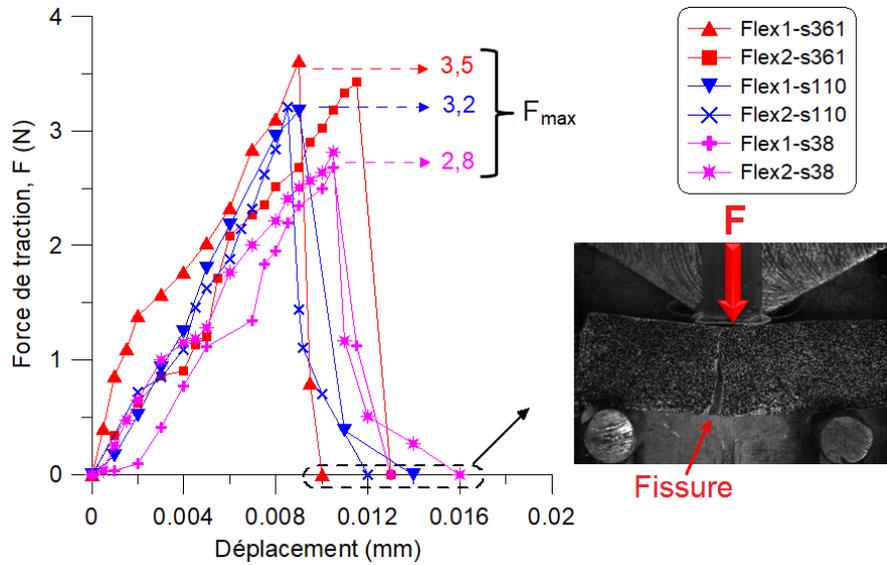


Figure 4. Force de traction en fonction du déplacement durant le chargement par flexion.

3.2. Identification du comportement local via la corrélation d'images

L'initiation et l'évolution de la déformation de traction peuvent être illustrées par les cartographies de déformation longitudinale ε_{xx} présentées à la figure 5. Nous choisissons ici de présenter les résultats donnés par la CIN sur les déformations locales pour le seul essai Flex1-s38.

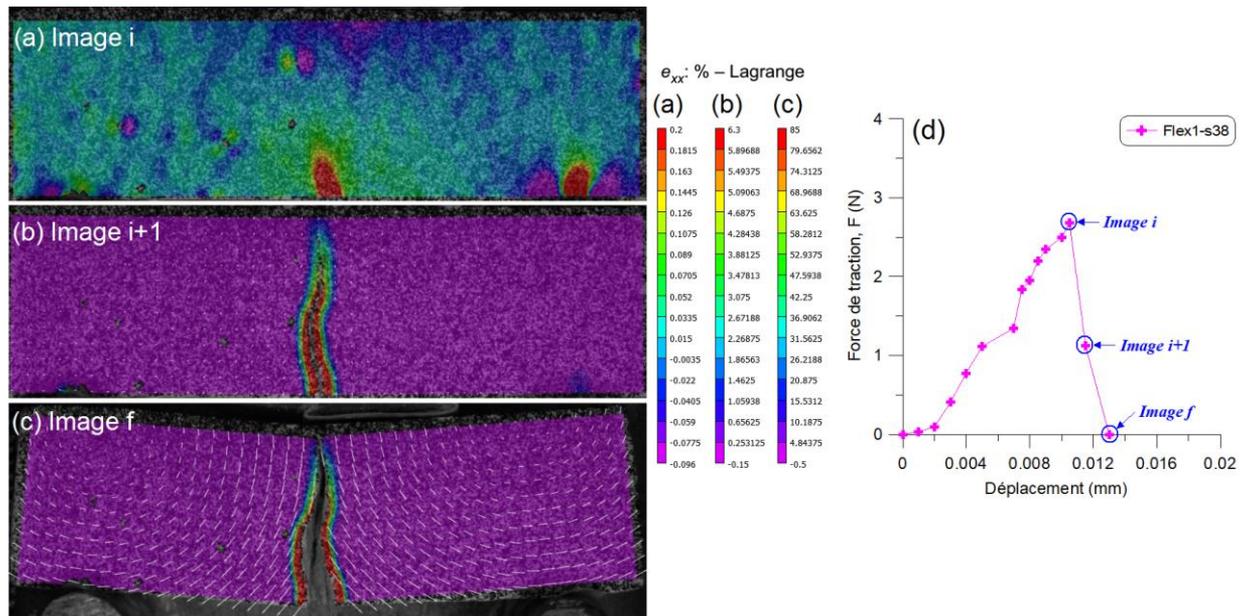


Figure 5. Déformation longitudinale locale aux niveaux (a) image i, (b) image i+1, (c) image f et leurs positions sur la courbe de force de traction (essai Flex1-s38).

Au niveau du pic $F_{max} = 140,6$ kPa, image de référence i (Fig.5a), le maximum et le minimum ε_{xx} sont égaux à $+0,2\%$ et $-0,096\%$, respectivement. La zone de tension de la poutrelle est représentée en rouge, où la moyenne ε_{xx} est égale à $+0,2\%$. Cette étape définit l'amorce de la fissure comme on peut le voir sur l'image.

Ensuite, lorsque la force de traction diminue, la CIN correspondante (image i+1 de la Fig.5b) montre la propagation de la fissure par traction, l'extension augmente jusqu'à $+6,3\%$. A la fin de l'essai, image de référence f (Fig.5c), on peut observer clairement les

directions des vecteurs de déplacement (vecteurs blancs) indiquant le mécanisme d'ouverture de la fissure.

3.3. Discussion : relation entre la force de traction maximale et la succion initiale

La relation entre la force de traction maximale F_{max} et la succion initiale est représentée sur la figure 6, à la fois en fonction du logarithme de la succion (figure 6a) et de la succion (figure 6b). Les résultats montrent comment la résistance à la traction augmente avec la succion initiale. La relation de la figure 6b n'est pas linéaire. La même tendance a également été démontrée, en termes de contraintes de traction, par Tang et Graham (2000) sur un mélange sable-bentonite, et par Wei et al. (2016b) sur l'argilite. La non-linéarité observée au niveau du comportement global est expliquée par certains auteurs, par exemple Taibi et al. (2008), comme le résultat de mécanismes locaux qui concernent principalement la fonction non-linéaire de la contrainte capillaire locale par rapport à la succion.

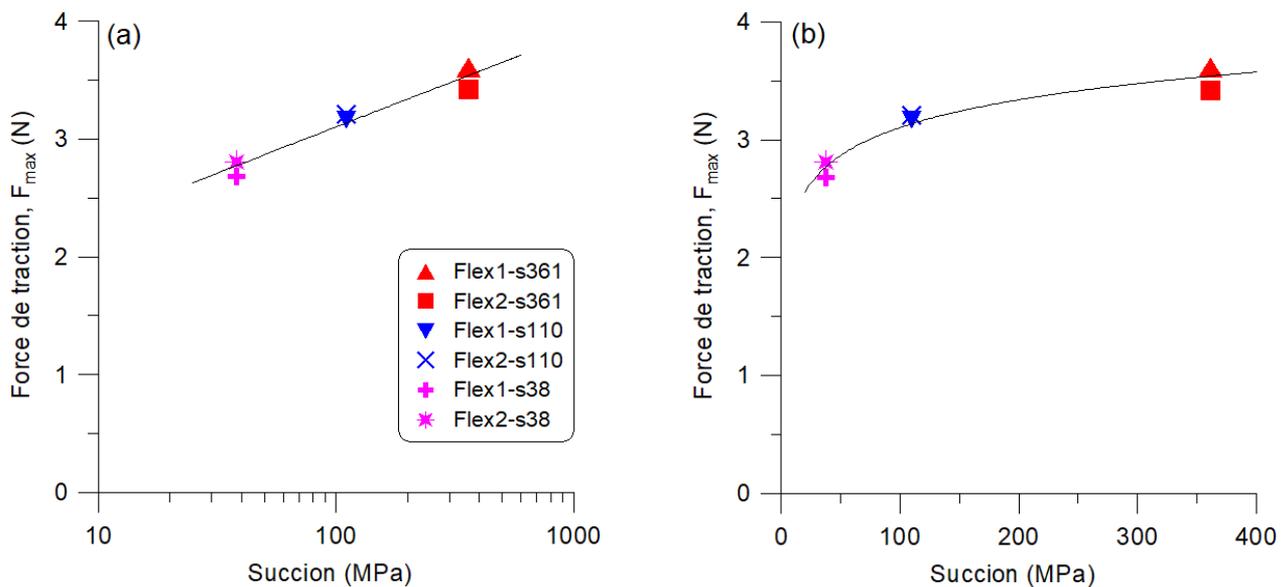


Figure 6. Force de traction maximale en fonction de la succion initiale.

4. Conclusions

Dans cette étude, un dispositif expérimental de traction indirecte par flexion a été conçu en laboratoire, permettant d'analyser la fissuration de traction d'un matériau argileux. Cette recherche est axée à la fois sur les relations entre la force de traction maximale et la succion d'une part, et sur l'effet de la traction sur l'initiation et la propagation des fissures de d'autre part.

Dans l'analyse du comportement global, des valeurs moyennes de la force de traction maximale ont été calculées à chaque niveau de la succion initiale imposée. De plus, l'utilisation de la CIN a permis d'identifier le mécanisme du mode d'ouverture de la fissure par extension. En effet, il est observé que l'initiation de la fissure commence au pic de la force de traction, puis, se propage avec la diminution de celle-ci jusqu'à la rupture complète des poutrelles.

Les résultats montrent que la force de traction maximale augmente généralement avec la diminution de la teneur en eau, qui est liée à la succion initiale. Une relation où la force de traction maximale augmente de manière non linéaire avec l'augmentation de la succion est également mise en évidence.

Dans la problématique de désordres des fondations superficielles des maisons individuelles, affectées par la sécheresse et le phénomène du retrait-gonflement des sols argileux, l'identification de la résistance admissible du sol à la traction permettrait d'estimer la succion locale du sol à la rupture par fissuration de dessiccation. Cela peut considérablement contribuer dans la recherche de nouvelles solutions de confortement des maisons existantes et potentiellement dans les études géotechniques, désormais obligatoires, pour toute nouvelle construction ou achat d'un terrain constructible (arrêté du 22 juillet 2020 définissant le contenu des études géotechniques à réaliser dans les zones exposées au phénomène de mouvement de terrain différentiel consécutif à la sécheresse et à la réhydratation des sols).

5. Références bibliographiques

- Ajaz A., Parry R.H.G. (1975). Stress-strain behaviour of two compacted clays in tension and compression. *Geotechnique*, 25(3), 495–512.
- Ajaz A., Parry R.H.G. (1975b). Analysis of bending stresses in soil beams. *Geotechnique*, 25(3), 586–591.
- Bishop A.W. and Garga V.K. (1969). Drained tension tests on London Clay. *Géotechnique*, Vol. 19, pp. 309-313.
- Fleureau J.M., Kheirbek-Saoud S., Soemitro R., Taibi S. (1993). Behaviour of clayey soils on drying-wetting paths. *Can Geotech J.*, 30(2):287–296
- Hattab M., Hammad T., Fleureau J.M. (2014) Internal friction angle variation in a kaolin/montmorillonite clay mix and microstructural identification. *Géotechnique*, 65(1), 1–11.
- Ighil Ameer L. (2016). Étude expérimentale du phénomène de l'endommagement et de la fissuration d'une matrice poreuse, Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, Metz (France).
- Katti A. (2012). Etude expérimentale des fissurations dans les argilites de Bure et les argiles de synthèses soumises à des chargements statiques en flexion. Rapport de stage Master 2 MMSP, Université de Lorraine, Metz, France.
- Lakshmikantha M.R., Prat P.C., Ledesma A. (2012). Experimental evidences of size effect in soil cracking. *Can. Geotech. J.*, 49(3), 264–284.
- Taïbi S., Fleureau J.M., Hadiwardoyo S., Kheirbek-Saoud S. (2008). Small and large strain behaviour of an unsaturated compacted silt, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 12, N°3, p 203-228.
- Tang G.X. and Graham J. (2000). A method for testing tensile strength in unsaturated soils. *Geotech. Testing J.*, 23(3), 377–381.
- Wei X., Hattab M., Bompard P., Fleureau J.M. (2016). Highlighting some mechanisms of crack formation and propagation in clays on drying path. *Geotechnique*, 66(4), 287–300.
- Wei X., Duc M., Hattab M., Reuschlé T., Taibi S., Fleureau J.M. (2016b). Effect of decompression and suction on macroscopic and microscopic behavior of a clay rock. *Acta Geotech.*, 1–19, doi:10.1007/s11440-016-0454-8.