

RETRAIT ET FISSURATION DES SOLS ARGILEUX SUITE AUX EFFETS DE LA SECHERESSE

SHRINKAGE AND CRACKING OF CLAY SOILS DUE TO DROUGHT EFFECTS

Mohamed Amine ES-SOUFI^{1,2}, Nadia SAIYOURI¹, Arnaud LAFOURCADE², Jacqueline SALIBA³

¹ Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M), CNRS, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence, France

² GEOTEC, Bureau d'études géotechniques, 19 rue de la Gravette, 33320 Eysines, France

³ College of Engineering and Technology, American University of the Middle East, Egaila 54200, Kuwait

RÉSUMÉ – L'article aborde l'impact de la sécheresse sur la fissuration des sols sous chaussée. Il analyse les mécanismes de retrait et fissuration de trois argiles différentes. Des essais de retrait linéaire et de suivi de fissuration induite par le séchage sont effectués, accompagnés d'analyses microscopiques et minéralogiques.

ABSTRACT – The article addresses the impact of drought on the cracking of soils beneath pavements. It analyzes the shrinkage and cracking mechanisms of three different types of clay. Linear shrinkage tests and monitoring of cracking induced by drying are conducted, accompanied by microscopic and mineralogical analyses

1. Introduction

Le retrait-gonflement des sols argileux constitue un défi complexe dans le domaine de l'ingénierie des infrastructures routières, mettant en évidence la nécessité d'une compréhension approfondie des mécanismes sous-jacents. Ce phénomène naturel résulte des variations de teneur en eau des sols argileux en réponse aux changements climatiques, et il exerce une influence significative sur la stabilité des chaussées. La sensibilité particulière des accotements, surtout à proximité de la végétation, aggrave cette problématique. Les sols argileux, exposés à des périodes de sécheresse prolongée, ont une propension à la rétraction et à la formation de fissures. À l'inverse, lors de l'absorption d'eau, les sols argileux ont tendance à se dilater, provoquant des élévations de chaussée et des déformations. Avec l'allongement des périodes de sécheresse, de plus en plus fréquentes et intenses, les routes deviennent plus vulnérables aux fissures résultant du retrait (Buhler and Cerato, 2007). Tel qu'expliqué par (Terzaghi et al., 1996), la perte d'eau induit un mécanisme de consolidation qui se visualise par le retrait du matériau. L'apparition de fissures pendant le séchage se produit lorsque les forces de traction qui s'opposent au retrait dépassent la résistance à la traction du sol. Ces fissures se déclenchent à la surface des sols, se propagent à la fois latéralement et vers le bas dans le corps du sol et se transforment en un réseau complexe de fissures, ce qui crée des zones fragiles dans le corps du sol avec une résistance mécanique réduite. Ces fissures s'atténuent avec la baisse de la teneur en

eau, ce qui ralentit la variation des paramètres géométriques du sol au stade postérieur de dessiccation. Plusieurs études ont tenté d'expliquer les phénomènes de fissuration par séchage (Amarasiri et al., 1997, 2011; Kodikara et al., 2000; Lecocq and Vandewalle, 2003; Mbemba, 2010; Peron et al., 2009).

La première partie de cet article se concentre sur la caractérisation physique et chimique de trois types de sols argileux étudiés : deux argiles de référence, la bentonite très gonflante et la kaolinite peu gonflante, ainsi qu'un sol argileux prélevé sur une route déjà fissurée. Dans la deuxième partie de l'article, des essais de retrait linéaire et de suivi de la fissuration induite par le séchage utilisant la méthode de corrélation d'images numériques sont réalisés pour évaluer la fissuration par dessiccation de ces trois types d'argiles. L'objectif est de comparer le sol de chantier aux deux argiles de référence et de mieux comprendre le mécanisme de retrait et de fissuration des sols argileux.

2. Caractérisation des sols d'étude

2.1. Identification du sol d'Esnandes

Le sol argileux étudié provient de la route départementale des marais RD105 située entre Esnandes et Charron (17). Des sondages (SC100 à SC105) entre 1 et 2,5 mètres ont été effectués et ont montré que ce sol est catégorisé dans la classe des argiles A4 actives (ES-SOUFI et al., 2023). En raison des limitations de quantité des échantillons en laboratoire, un mélange représentatif sera constitué pour former le sol type d'Esnandes, nommé désormais "Sol d'Esnandes". Ce mélange sera composé de 13% de SC100, 6% de SC102, 24% de SC103, 33% de SC104, et 24% de SC105.

2.2. Caractérisation physique des argiles testées

La bentonite fournie par LAFAYE se distingue par des valeurs élevées de plasticité ($I_p = 44\%$), indiquant sa capacité à réagir de manière significative aux variations de teneur en eau. Le sol d'Esnandes présente des caractéristiques de plasticité légèrement élevées ($I_p = 33\%$), bien qu'inférieures à celles de la bentonite. En revanche, la kaolinite fournie par SOKA affiche des valeurs plus modérées ($I_p = 27\%$), suggérant une plasticité moindre. Les valeurs VBS élevées de la bentonite et du sol d'Esnandes (10,2 et 6,4 g/100g) confirme leur forte plasticité (tableau 1).

Tableau 1. Limites d'Atterberg, VBS et pH des argiles testées

	W_L (%)	W_p (%)	I_p (%)	VBS	pH
Bentonite	84 ± 2	40 ± 1	44 ± 1	$10,2 \pm 0,1$	$8,1 \pm 0,04$
Kaolinite	59 ± 1	32 ± 2	27 ± 2	$1,0 \pm 0,3$	$6,3 \pm 0,1$
Esnandes	$76 \pm 0,2$	43 ± 1	33 ± 1	$6,4 \pm 0,4$	$8,9 \pm 0,04$



2.3. Caractérisation chimique des argiles testées

L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) montre que la kaolinite exhibe une disposition feuilletée ordonnée, tandis que la bentonite forme une matrice tridimensionnelle complexe. Le sol d'Esnandes présente une structure de grains agglomérés, indiquant une organisation hétérogène. D'après l'analyse spectroscopique

à dispersion d'énergie (EDS), la kaolinite montre un rapport Si/Al d'environ 1, la bentonite et le sol d'Esnandes affichent un rapport Si/Al d'environ 2 avec des pourcentages plus élevés de Mg, K, et Fe. Les résultats de diffraction des rayons X (DRX) indiquent une forte présence d'illite et de montmorillonite dans la bentonite, soulignant sa capacité à absorber l'eau. Le sol d'Esnandes présente également ces minéraux, avec une teneur légèrement inférieure. La présence de graphite dans le sol d'Esnandes confirme la matière organique. La kaolinite est dominée par le minéral non-gonflant « kaolinite ».

3. Essais de retrait linéaire (NF P 94-060-2)

3.1. Protocole expérimental

L'essai de retrait linéaire (NF P 94-060-2) vise à observer la variation de hauteur d'une éprouvette soumise au séchage à l'air libre. Cette variation de hauteur est mesurée à l'aide d'un capteur de 0,01 mm de précision dans une bague de 50 mm de diamètre et de 20 mm de hauteur, où des échantillons d'argiles en poudre, initialement à une teneur en eau de 60% et une densité sèche de 1 g/cm³, reproduisant les caractéristiques des sols sous-chaussée d'Esnandes, sont placés dans des conditions de température et d'humidité respectives de 20 ± 2°C et 50 ± 5%. Le suivi de la variation de hauteur permet de tracer les courbes de retrait, offrant un aperçu de la cinétique de retrait et de séchage des argiles, ainsi que la détermination de leur limite de retrait qui est la teneur en eau en dessous de laquelle l'assèchement se fait sans variation de volume (figure 1 (a)).



Figure 1. (a) Appareil de mesure du retrait linéaire, (b) mesure des dimensions de l'échantillon par un pied à coulisse

Simultanément, une deuxième série de mélanges identiques est réalisée dans les mêmes conditions, cette fois-ci sans capteur de déplacement, et le retrait linéaire ainsi que le retrait volumique sont mesurés à l'aide d'un pied à coulisse de précision à 1/100 mm (figure 1 (b)). Pour garantir la variabilité et la précision des résultats, deux échantillons sont préparés pour chaque type d'argile, avec la mesure de quatre diamètres et trois hauteurs par échantillon. Les valeurs moyennes sont ensuite calculées pour obtenir une estimation représentative de la hauteur finale après séchage et du retrait volumique.

3.2. Résultats et discussions

Les résultats des essais de retrait linéaire révèlent des comportements distincts des argiles étudiées lors du processus de séchage (figure 2 (a)). La kaolinite, caractérisée par une limite de retrait élevée de 32%, présente une tendance à se stabiliser rapidement avec le séchage, illustrée par une faible déformation axiale maximale de 6,5%. À l'inverse, la bentonite, avec une limite de retrait de 12%, et le sol d'Esnandes, avec une limite de retrait de 25%, démontrent une plus grande propension à subir des variations significatives avec le séchage. Leur capacité à retenir davantage d'eau les expose à des changements de volume plus marqués, atteignant une déformation axiale maximale aux alentours de 26%. L'examen des courbes de séchage complète cette analyse en offrant une perspective sur le comportement hydrique de ces argiles. La cinétique de séchage montre un ralentissement après la limite de retrait (figure 2 (b)), la perte subséquente d'eau se fait ainsi à un rythme plus lent. Après 8 jours de séchage, la kaolinite a atteint une teneur en eau quasiment nulle, soulignant son aptitude à perdre rapidement de l'eau. En revanche, la bentonite maintient une teneur en eau de 9%, suggérant une rétention d'eau plus élevée même après une période prolongée de séchage. Le sol d'Esnandes se positionne entre les deux, avec une teneur en eau de 5% après la même période.

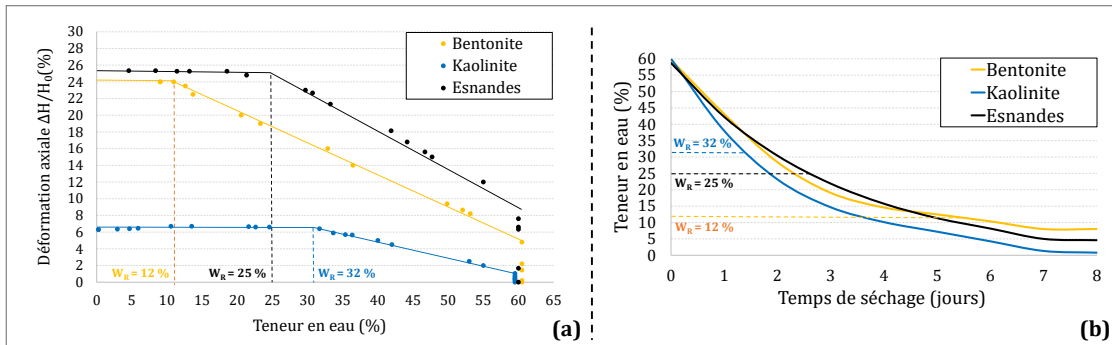


Figure 2. (a) Courbes de retrait des argiles étudiées, (b) courbes de séchage

La deuxième série d'essais, reproduisant les mêmes conditions que la première mais sans l'utilisation de capteurs (mesurant directement avec un pied à coulisse), confirme les valeurs du retrait linéaire obtenues précédemment et garantit la fiabilité des résultats des premiers essais (tableau 2). Cette deuxième campagne expérimentale offre une perspective complémentaire en incluant la mesure du retrait volumique, prenant en compte la déformation transversale. Les échantillons ont été uniformément préparés en suivant une procédure de compactage pour obtenir une densité sèche commune de 1 g/cm³. Cette démarche justifie la présence observée de porosité (figure 3 (b)).

Tableau 2. Dimensions des éprouvettes des argiles testées à l'état initial et final

	Diamètre (mm)						Hauteur (mm)				
	D _i	D _{f,1}	D _{f,2}	D _{f,3}	D _{f,4}	D _{f,moy}	H _i	H _{f,1}	H _{f,2}	H _{f,3}	H _{f,moy}
Bentonite	50	39,6	39,6	40,0	39,7	39,7 ± 0,2	20	16,6	17,1	16,9	16,8 ± 0,2
	50	39,5	39,7	40,1	40,0	39,8 ± 0,2	20	17,1	17,2	16,7	17,0 ± 0,2
Kaolinite	50	47,4	47,7	47,4	47,3	47,4 ± 0,1	20	18,5	17,9	18,1	18,2 ± 0,2
	50	47,2	47,2	47,6	47,7	47,4 ± 0,2	20	17,2	19,4	18,4	18,3 ± 0,8
Esnandes	50	42,2	42,0	41,8	41,9	41,9 ± 0,1	20	16,3	16,5	17,4	16,7 ± 0,4
	50	41,8	41,8	42,1	41,9	41,9 ± 0,1	20	17,3	17,2	16,5	17,0 ± 0,3

La kaolinite affiche une déformation volumique de 18%, indiquant une variation de volume modérée lors du processus de séchage. En revanche, le sol d'Esnandes présente une déformation volumique plus significative, atteignant 40%, soulignant une propension plus marquée à des changements de volume. La bentonite se distingue par la plus grande déformation volumique, avec une valeur de 47%, mettant en évidence une sensibilité accrue aux variations dimensionnelles (figure3 (a)).

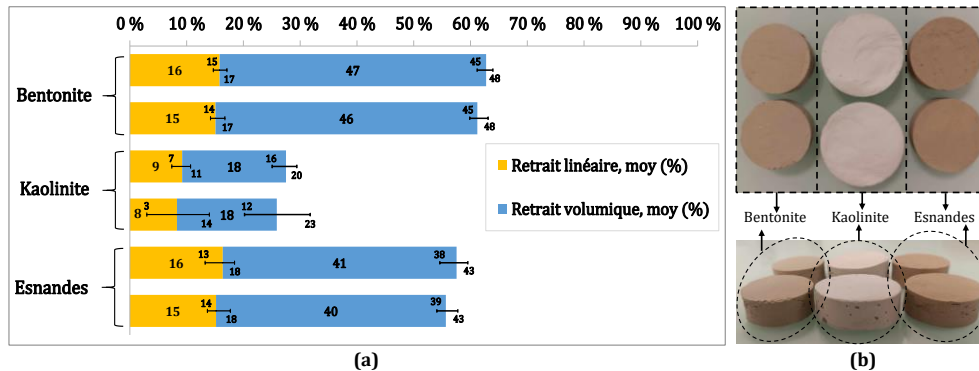


Figure 3. (a) Valeurs du retrait linéaire et volumique, (b) état final des éprouvettes

En conclusion, les essais ont révélé que la bentonite et le sol d'Esnandes présentent un retrait non négligeable entraînant des déformations significatives. En revanche, la kaolinite se caractérise par une stabilité relative, se manifestant par des déformations plus modérées pendant le processus de séchage.

4. Essais de suivi de fissuration induite par le séchage

4.1. Procédure de l'essai

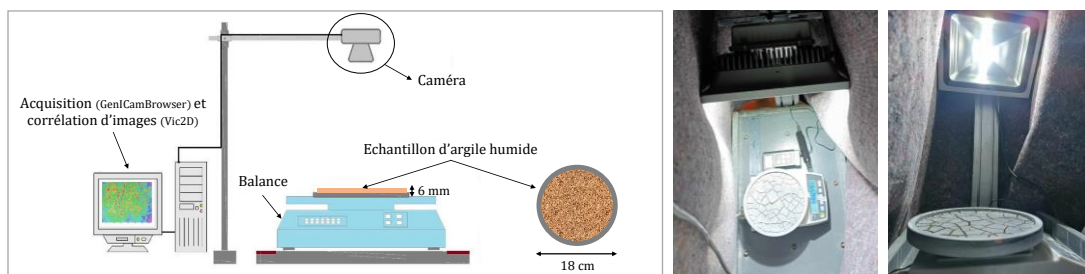


Figure 4. Dispositif expérimental de l'essai de suivi de fissuration induite par le séchage

Au cours de cet essai, des photographies de la surface supérieure de l'échantillon sont capturées à différentes étapes pendant le processus de séchage. Des données géométriques détaillées concernant les fissures émergentes sont systématiquement enregistrées tout au long de l'expérience (figure 4). L'échantillon, à une teneur en eau initiale de 60% et une densité sèche de 1 g/cm³, est placé dans un récipient avec un diamètre de 180 mm et une hauteur de 6 mm dans des conditions de température et d'humidité respectives de 20 ± 2°C et 50 ± 5%. Ces dimensions ont été soigneusement sélectionnées pour générer des contraintes internes plus importantes lors du processus de séchage, favorisant ainsi la formation des fissures. La base du récipient est en téflon (lisse). Par la suite, une base rugueuse en PVC (raillée pour augmenter le frottement) sera utilisée, et les mêmes essais seront reproduits pour évaluer la différence. Un

mouchetis peu et très dense, nécessaire à la corrélation d'images numériques, est appliqué sur la surface supérieure de l'échantillon par une peinture aérosol. Au fil du processus de séchage, l'échantillon finit par se fissurer, formant des réseaux de fissures observés en deux dimensions (2D). L'approche de corrélation d'images numériques est utilisée pour obtenir une compréhension approfondie du mécanisme d'apparition et d'évolution des fissures pendant la dessiccation. Cette méthode combine l'observation classique de la morphologie des fissures avec la détermination précise des déformations et des déplacements locaux induits par le séchage.

4.2. Résultats et discussions

4.2.1. Analyse des fissures

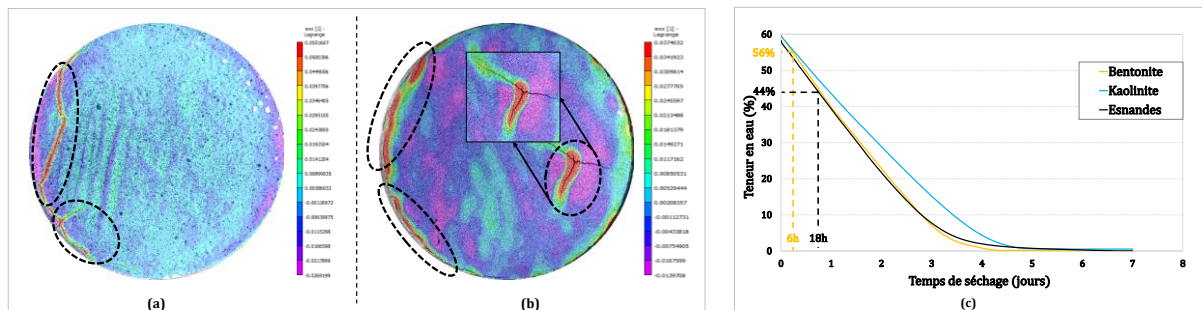


Figure 5. Champ de déformation au début de la fissuration de (a) la bentonite, (b) le sol d'Esnandes. (c) Courbes de séchage des argiles étudiées

Les premières fissures de la bentonite sont apparues après 6 heures de séchage (figure 5 (b)), lorsque la teneur en eau est descendue à 56%. Ces fissures observées sont principalement primaires, se formant plus près du bord du récipient plutôt qu'au centre. Cela pourrait être attribué à une variation de la vitesse de séchage entre le centre et les bords du récipient en raison de la circulation d'air différente à ces emplacements.

De plus, la présence de PVC au niveau du bord peut induire des contraintes locales supplémentaires, favorisant le début de la fissuration à cet endroit. Concernant le sol d'Esnandes, les premières fissures sont apparues un peu plus tard, soit après 18 heures de séchage, à une teneur en eau de 44% (figure 5 (a)). Comme pour la bentonite, les premières fissures ont également débuté près du bord du récipient. Cependant, une fissure un peu plus éloignée des bords est apparue en se développant rapidement en fissures secondaires. À la limite de plasticité, la bentonite a commencé à manifester un réseau de fissuration, marqué par des ouvertures de fissures initialement modestes. En revanche, le sol d'Esnandes n'a présenté qu'un début de fissuration, limité aux premières fissures primaires et secondaires qui évoluaient lentement. Au stade de la limite de retrait, les ouvertures de fissures de la bentonite ont augmenté en largeur et le sol d'Esnandes a développé un réseau de fissures, bien que les largeurs des fissures soient légèrement inférieures à celles observées pour la bentonite. A la fin du processus de séchage (figure 5 (c)), aucune différence significative n'a été observée par rapport à l'état à la limite de retrait pour les deux argiles. Les fissures et les ouvertures n'ont pas montré d'évolution substantielle, indiquant que les propriétés de fissuration atteignent une stabilité apparente à la limite de retrait.

4.2.2. Mesure de la densité de retrait global GSR par Image-J

Image-J est utilisé pour sélectionner et capturer la zone d'analyse, corriger l'éclairage en filtrant les bruits, et surtout transformer les images en 8 bits noir/blanc. Le traitement par ce logiciel permet ensuite de mesurer automatiquement la longueur, l'ouverture et la surface des fissures des échantillons. Ces mesures seront utilisées pour calculer la densité du retrait global GSR (Global Shrinkage Ratio). L'erreur estimée lors de la réalisation de ces mesures est d'environ 5%. Cette densité est exprimée en pourcentage selon la formule :

$$GSR = \frac{SI-SF}{SI} \times 100 \quad (1)$$

Tableau 3. Densité de retrait global GSR et ouverture des fissures des argiles testées

Surface de l'échantillon (mm ²)	Bentonite		Kaolinite		Esnandes	
	254,5	254,5	254,5	254,5	254,5	254,5
Surface rétrécie (mm ²)	81,4	81,3	17,4	8,9	36,8	37,0
Densité de retrait global GSR (%)	32,0	31,9	6,8	3,5	14,5	14,5
Ouverture des fissures (mm)	4,7 ± 1,1	4,7 ± 1,0	-	-	3,5 ± 0,9	3,7 ± 1,0

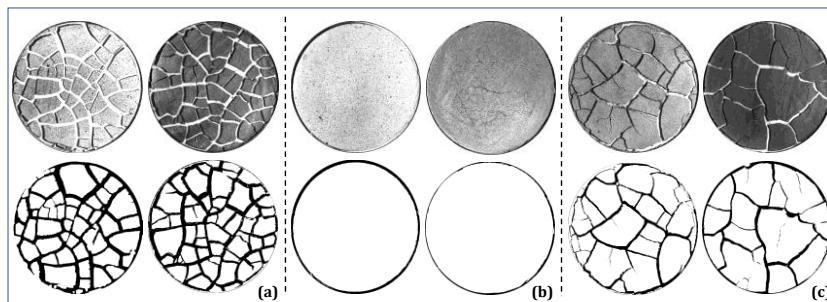


Figure 6. Images réelle et binaire après séchage de (a) la bentonite, (b) la kaolinite, et (c) le sol d'Esnandes

La kaolinite se distingue par sa résistance à la fissuration lors du séchage (figure 6 (b)). Bien qu'elle ait montré une faible rétraction surfacique de moins de 7%, aucun réseau de fissures notable n'a été observé. Cette stabilité apparente peut être attribuée à ses propriétés spécifiques, notamment sa structure cristalline et sa composition. En revanche, la bentonite a manifesté un comportement significativement différent (figure 6 (a)), présentant un réseau de fissures étendu qui a contribué à une densité de retrait global élevée de 32%. Cette capacité accrue à se fissurer peut-être associée à la nature gonflante de la bentonite en présence d'eau, provoquant des contraintes internes importantes lors du séchage. Le sol d'Esnandes, bien que plus résistant à la fissuration que la bentonite (figure 6 (c)), a montré une densité de retrait global de 14,5%, indiquant une certaine propension à la déformation en surface. En ce qui concerne l'ouverture des fissures qui représente la largeur apparente de ces dernières, la bentonite affiche une moyenne de 4,7 mm à la fin de séchage tandis que le sol d'Esnandes présente une ouverture moyenne de 3,6 mm. Ces observations suggèrent que le sol d'Esnandes et la bentonite partagent des similitudes dans leur comportement de retrait et de fissuration, bien que de manière moins prononcée pour le sol d'Esnandes.

5. Conclusions

Des essais de caractérisation physique et chimique ainsi que des essais de retrait linéaire et de suivi de la fissuration induite par le séchage en utilisant la méthode de

corrélation d'images numériques CIN ont été réalisés sur trois sols argileux comprenant deux argiles de référence une bentonite et une kaolinite, ainsi qu'un sol argileux prélevé sur la route départementale des marais RD105 située entre Esnandes et Charron (17). Les conclusions suivantes ont été tirées :

- La kaolinite se distingue par sa stabilité et sa résistance à la fissuration, tandis que la bentonite et le sol d'Esnandes montrent des déformations et des fissurations plus importantes.
- Le comportement d'un échantillon d'argile pendant le séchage dépend des dimensions de l'échantillon. Les petits échantillons peuvent se rétracter sans se fissurer en raison d'une diminution uniforme de la teneur en eau. En revanche, avec des échantillons plus grands, les contraintes internes peuvent devenir plus importantes en raison de la réduction de la teneur en eau sur une plus grande surface et des fissures peuvent être engendrées.

Par la suite, des traitements respectifs avec la nano-silice Levasil 300/30 et la chaux naturelle faiblement hydraulique NH2 seront mis en œuvre. Leur efficacité sera évaluée en termes de réduction du retrait et de limitation du développement des fissures.

6. REFERENCES

- Amarasiri, A., Kodikara, J., Costa, S., 1997. DP-LOG: un langage logique dataparallèle. Actes des 6e journées francophones de programmation logique et programmation par contraintes JFPLC'97.
- Amarasiri, A.L., Kodikara, J.K., Costa, S., 2011. Numerical modelling of desiccation cracking. *Num Anal Meth Geomechanics* 35, 82–96.
<https://doi.org/10.1002/nag.894>
- Buhler, R.L., Cerato, A.B., 2007. Stabilization of Oklahoma Expansive Soils using Lime and Class C Fly Ash, in: *Problematic Soils and Rocks and In Situ Characterization*. Presented at the Geo-Denver 2007, American Society of Civil Engineers, Denver, Colorado, United States, pp. 1–10.
[https://doi.org/10.1061/40906\(225\)1](https://doi.org/10.1061/40906(225)1)
- ES-SOUFI, M.A., SALIBA, J., Saiyouri, N., LAFOURCADE, A., 2023. Etude du potentiel de gonflement et de retrait des sols argileux sous chaussée des routes des marais. *Academic Journal of Civil Engineering* 41, 293–302.
<https://doi.org/10.26168/ajce.41.1.29>
- Kodikara, J., Barbour, S., Fredlund, D., 2000. Desiccation craking in soils, in: *Asian Conference on Unsaturated Soils*.
- Lecocq, N., Vandewalle, N., 2003. Dynamics of crack opening in a one-dimensional desiccation experiment. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 321, 431–441. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)01538-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)01538-8)
- Mbemba, 2010. Évaluation de la dessiccation, du retrait et de la fissuration de matériaux silteux peu plastiques.
- Peron, H., Hueckel, T., Laloui, L., Hu, L.B., 2009. Fundamentals of desiccation cracking of fine-grained soils: experimental characterisation and mechanisms identification. *Can. Geotech. J.* 46, 1177–1201. <https://doi.org/10.1139/T09-054>
- Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G., 1996. *Soil mechanics in engineering practice*. John wiley & sons.