

Effets de la dessiccation sur le retrait et la fissuration des sols argileux sous chaussée

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, Jacqueline.saliba@aum.edu.kw

RESUME L'impact de la sécheresse sur la fissuration des chaussées construites sur des sols argileux constitue un enjeu majeur dans le domaine de l'ingénierie des infrastructures routières. Les argiles, en tant que sols, présentent la particularité de subir des variations volumiques significatives en fonction de leur teneur en eau. Les périodes de sécheresse peuvent induire un retrait du sol argileux, entraînant ainsi des fissures et des déformations dans la chaussée. Cet article se focalise sur une analyse approfondie des mécanismes de retrait et de fissuration de trois types d'argile : une kaolinite, une bentonite, et un sol argileux d'Esnandes, prélevé sous les chaussées des routes des marais dans le département de la Charente-Maritime (17), dans le Sud-Ouest de la France. Des essais de retrait linéaire (NF P 94-060-2) et de suivi de la fissuration induite par le séchage utilisant la méthode de corrélation d'images numériques (CIN) ont été réalisés afin d'évaluer le retrait et la fissuration de ces trois argiles. Des analyses microscopiques et minéralogiques ont été également réalisées pour approfondir la compréhension de ce phénomène.

Mots-clefs : retrait, fissuration, argiles, corrélation d'images numériques

I. INTRODUCTION

La fissuration des chaussées est un problème courant dans les régions où le sol est composé principalement d'argile. Les argiles sont des matériaux qui ont la propriété de se contracter lorsqu'ils sont secs et de se dilater lorsqu'ils sont mouillés. Ce phénomène, connu sous le nom de retrait-gonflement, peut causer des dommages importants aux infrastructures, y compris aux chaussées. La vulnérabilité accrue des accotements, notamment à proximité de la végétation, aggrave cette problématique. L'extension des périodes de sécheresse rend les routes de plus en plus sujettes aux fissures dues au retrait du sol (Buhler and Cerato, 2007). Les fissures de séchage peuvent se former lorsque les contraintes dans la chaussée dépassent la résistance du matériau. Elles 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. Ce mécanisme, apparemment simple

soulève de nombreuses questions concernant le retrait des sols argileux et la propagation des réseaux de fissures (Boivin et al., 2004; Groenevelt, 2004; Kodikara et al., 2000; Mbemba, 2010; Osinubi and Nwaiwu, 2008; Stirk, 1954). (Lecocq and Vandewalle, 2003) ont réalisé une étude expérimentale sur une lame d'argile longue et étroite, des fissures divisaient la lame d'argile en petits segments perpendiculaires à sa longueur. (Peron et al., 2009) ont démontré l'effet de la rugosité du support sur l'apparition des fissures. Le retrait est accompagné de fissures si le support sur lequel reposent les échantillons génère du frottement. En effet, ce frottement provoque des contraintes de traction dans l'échantillon en réponse au déplacement induit par le retrait. Lorsqu'à un point la contrainte de traction atteint la valeur de la résistance à la traction du matériau, la rupture se produit à ce point. D'autres travaux ont étudié la propagation des fissures dans un champ bidimensionnel. (Tang et al., 2010) ont étudié l'impact de la température sur le séchage en utilisant une technique d'analyse d'image, la forme des fissures induites et la variation de la zone fissurée en fonction de la teneur en eau du matériau ont été analysées. (Wei, 2014) a étudié le champ de déformation de la surface de l'argile pendant le séchage en utilisant une technique de corrélation d'images et a montré que, dans un premier stade, les fissures apparaissent lorsque la résistance à la traction est atteinte localement, puis elles se propagent et se bifurquent sous l'effet des contraintes de cisaillement qui se développent le long de la fissure. L'étude des fissures de séchage et spécifiquement de leur profondeur a fait l'objet d'une attention croissante dans les recherches récentes. (Sanchez et al., 2013) ont utilisé un dispositif laser 2D couplé à un dispositif de contrôle de mouvement (qui permet le balayage de la surface totale d'un sol soumis au séchage) en mesurant en parallèle la perte d'eau au fil du temps pour déterminer le retrait vertical, longitudinal et transversal, ainsi que la profondeur et la largeur des fissures.

Dans cet 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 sur trois types de sols argileux : deux argiles de référence, la bentonite très gonflante et la kaolinite peu gonflante, ainsi qu'un sol argileux prélevé sur une route déjà fissurée. L'évaporation de l'eau, le retrait linéaire et volumique, l'initiation et la propagation des fissures en surface ont été surveillés pendant le séchage pour les trois types d'argile. L'objectif est de mieux comprendre le mécanisme de retrait et de fissuration des sols argileux.

II. CARACTERISATION DES SOLS ET METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

Le sol argileux examiné a été prélevé le long de la route départementale des marais RD105, située entre Esnandes et Charron (17). Six sondages (SC100 à ST/SC105) ont été réalisés à des profondeurs comprises entre 1 et 2,5 mètres. Une caractérisation physique de ces échantillons a été réalisée au travers d'une campagne expérimentale. Les six échantillons d'Esnandes démontrent une homogénéité remarquable dans leurs caractéristiques physiques, soulignant une cohérence significative entre les différentes mesures effectuées. En accord avec la classification GTR, ces échantillons sont catégorisés dans la classe des argiles A4 (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, désigné désormais sous le nom de "Sol d'Esnandes". Ce mélange sera composé de 13% de SC100, 6% de SC102, 24% de SC103, 33% de SC104, et 24% de

SC105. L'échantillon SC101 ne sera pas pris en compte en raison de sa disponibilité restreinte. Les deux autres argiles sont la bentonite fournie par LAFAURE et la kaolinite SOKA (figure 1 (a)).

Les propriétés plastiques des trois argiles testées ont été évaluées à travers les limites d'Atterberg et la valeur VBS. La bentonite se distingue par sa plasticité élevée, avec une limite de liquidité (w_L) de 84% et un indice plastique (I_p) de 44%, ce qui témoigne de sa réactivité significative aux variations de la teneur en eau. Le sol d'Esnandes montre des caractéristiques plastiques légèrement élevées (w_L = 76% et I_p = 33%), bien que moins marquées que celles de la bentonite. En revanche, la kaolinite présente des valeurs plus modérées (w_L = 59% et I_p = 27%), indiquant une plasticité moindre. Les valeurs élevées du VBS pour la bentonite et le sol d'Esnandes (10,2 et 6,4 g/100g) confirment leur forte plasticité. En ce qui concerne le pH, la bentonite présente une valeur moyenne de 8,1, la kaolinite de 6,3 et le sol d'Esnandes de 8,9. Ces variations de pH sont attribuées à la composition chimique spécifique des minéraux d'argile et aux réactions chimiques qui se produisent dans la solution.

L'examen microscopique par MEB révèle que la kaolinite (figure 2 (c)) exhibe une disposition feuilletée avec une organisation cristalline précise, illustrant une structure bien définie à l'échelle microscopique. À l'inverse, la bentonite (figure 2 (b)) présente une complexité structurale supérieure, formant une matrice tridimensionnelle avec des agrégats disposés de manière moins ordonnée. En ce qui concerne le sol d'Esnandes (figure 2 (d)), l'observation au MEB révèle une structure de grains agglomérés. Des grains plus importants agissent comme des noyaux autour desquels des particules plus petites se regroupent de manière moins ordonnée. Cette organisation suggère une structure plus hétérogène et moins cristalline, indiquant une variabilité dans la taille et l'agencement des particules.

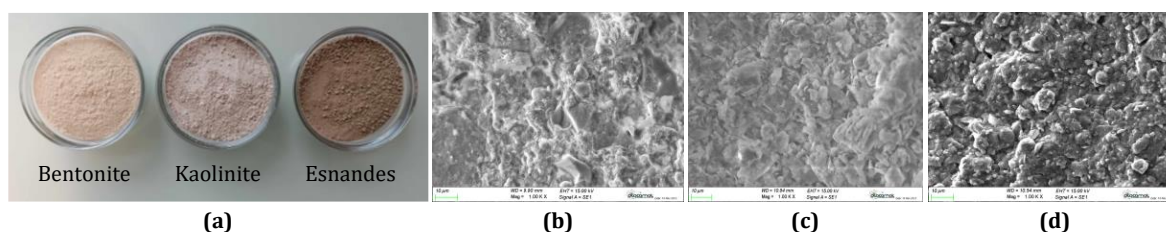


FIGURE 1. (a) Photos des argiles étudiées, observation au MEB de : (b) la bentonite, (c) la kaolinite, (d) le sol d'Esnandes

L'analyse chimique par EDS montre que la kaolinite présente un rapport Si/Al d'environ 1. En revanche, la bentonite et le sol d'Esnandes affichent des rapports Si/Al d'environ 2, avec des pourcentages plus élevés de magnésium (Mg), potassium (K) et de fer (Fe). Les résultats XRF confirment ces observations. Les essais DRX, réalisés en collaboration avec l'Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux (ICMCB) et analysés via le logiciel Profex 5.2.5, démontrent que la bentonite se caractérise par une concentration élevée d'illite et de montmorillonite. La présence de la montmorillonite, un minéral gonflant, suggère une capacité à absorber l'eau et à subir des variations de volume importantes. Le sol d'Esnandes présente également une teneur notable en illite et montmorillonite, bien que légèrement inférieure à celle de la bentonite. De plus, la présence de graphite, un composé carboné, dans le sol d'Esnandes confirme la présence de matière organique dans ce sol. En revanche, la composition minéralogique de la kaolinite est principalement dominée par le minéral non-gonflant « kaolinite ».

TABLEAU 1. Eléments et composés chimiques présents dans les argiles testées : (a) EDS, (b) XRF

(a)				(b)		
Elément	Pourcentage (%)			Composé	Pourcentage (%)	
	Bentonite	Kaolinite	Esnandes		Bentonite	Kaolinite
Si	23,3	19,2	21,1	SiO ₂	54,6	47,9
Al	11,1	19,6	11,0	Al ₂ O ₃	16,7	35,8
Mg	2,2	0,2	2,0	MgO	2,3	0,3
K	2,0	0,8	1,8	K ₂ O	2,8	1,5
Fe	2,5	0,4	2,5	Fe ₂ O ₃	5,5	1,1
Na	0,2	-	1,0	Na ₂ O	0,1	0,1
Ca	2,2	-	2,7	CaO	6,1	0,1
Ti	0,3	-	0,2	TiO ₂	0,7	0,3
Cl	0,1	-	0,2	...	...	...
C	-	-	3,1			
O	56,1	59,8	54,4			
Total	100					

Dans un premier temps, des essais de retrait linéaire conformément à la norme NF P 94-060-2 ont été effectués sur les trois types d'argile. L'objectif étant d'observer la variation de hauteur d'éprouvettes soumises au séchage à l'air libre. Cette variation de hauteur a été mesurée à l'aide d'un comparateur de précision à 0,01 mm, placé dans une bague de 50 mm de diamètre et 20 mm de hauteur. Les échantillons d'argile 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, ont été positionnés dans des conditions de température et d'humidité de $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $HR = 50 \pm 5\%$. En suivant la variation de hauteur et de la teneur en eau, des courbes de retrait ont été tracées, offrant ainsi 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 2 (a)). De manière simultanée, une deuxième série de mélanges identiques a été réalisée dans les mêmes conditions, mais cette fois sans l'utilisation d'un capteur de déplacement. Le retrait linéaire et le retrait volumique ont été mesurés à l'aide d'un pied à coulisse de 0,01 mm de précision (figure 2 (b)). Afin d'assurer la variabilité et la précision des résultats, deux échantillons ont été préparés pour chaque type d'argile, avec la mesure de quatre diamètres et trois hauteurs par échantillon. Les valeurs moyennes ont ensuite été calculées pour obtenir une estimation représentative de la hauteur finale après séchage et du retrait volumique.



FIGURE 2. (a) Appareil de mesure du retrait linéaire, (b) mesure des dimensions de l'échantillon par un pied à coulisse

Dans un second temps, des essais portant sur le suivi de la fissuration induite par le séchage ont été effectués. Au cours de ces essais, des photographies de la surface supérieure des échantillons ont été prises à différents moments du processus de séchage. Les échantillons, à une teneur en eau initiale de 60% et une densité sèche de 1 g/cm³, sont placés dans un récipient avec un diamètre de 180 mm et une hauteur de 6 mm dans des conditions de température et d'humidité de $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $HR = 50 \pm 5\%$. Ces dimensions ont été soigneusement sélectionnées pour générer des contraintes internes plus importantes lors du processus de séchage, favorisant ainsi la formation des fissures. Un mouchetis peu et très dense, nécessaire à la corrélation d'images numériques, est appliqué sur la surface supérieure des échantillons par une peinture aérosol. Au fil du processus de séchage, l'échantillon peut se fissurer, formant des réseaux de fissures observés en deux dimensions (2D). 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. 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. En appliquant des techniques de traitement d'image, la géométrie des fissures a été décrite quantitativement et les caractéristiques de la propagation des fissures avec une teneur en eau décroissante ont été déterminées.

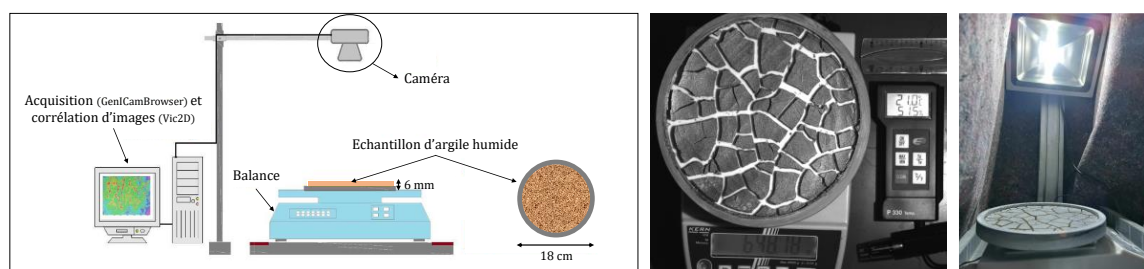


FIGURE 3. Dispositif expérimental de l'essai de suivi de fissuration induite par le séchage

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Essais de retrait linéaire NF P 94-060-2

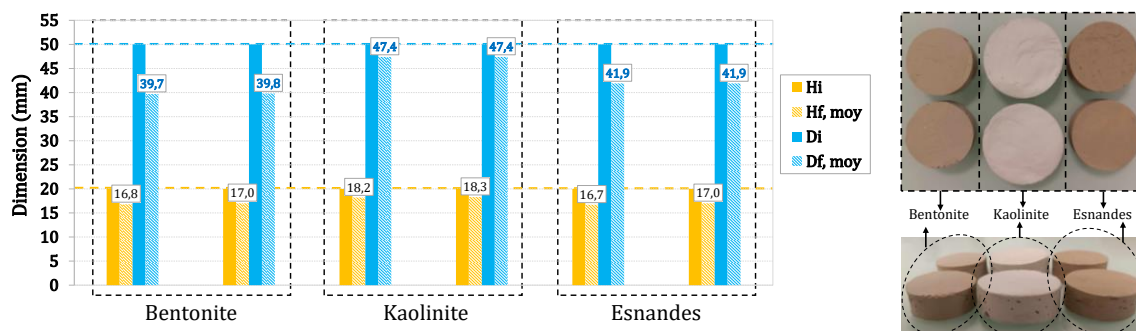


FIGURE 4. Dimensions des éprouvettes des argiles testées à l'état initial (i) et final (f, moy)

Les échantillons d'argile, initialement de 50 mm de diamètre et de 20 mm de hauteur, ont été préparés de manière uniforme avec une teneur en eau initiale de 60%. Une procédure de compactage manuel a été suivie pour obtenir une densité sèche commune de 1 g/cm³, justifiant ainsi la présence observée de porosité. La variation de hauteur et de diamètre des échantillons entre l'état initial et l'état final à la fin du processus de séchage est présentée dans la figure 4. Les courbes de retrait ainsi que les valeurs du retrait linéaire et volumique sont représentées dans la figure 5.

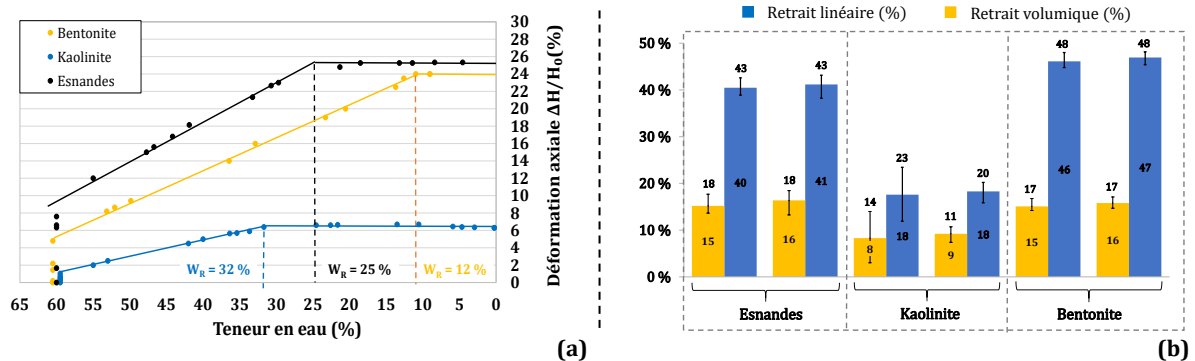


FIGURE 5. (a) Courbes de retrait, (b) Valeurs du retrait linéaire et volumique des argiles étudiées

Les résultats des essais de retrait linéaire mettent en lumière des comportements distincts des argiles étudiées lors du processus de séchage. La kaolinite présente une limite de retrait élevée de 32% et une déformation axiale maximale modérée de 6,5%. À l'inverse, le sol d'Esnandes présente une limite de retrait plus faible de 25% mais une déformation plus prononcée de 26%. La bentonite affiche la limite de retrait la plus basse des trois, avec une valeur de 12%, et une déformation de retrait similaire à celle du sol d'Esnandes (24%). Concernant le retrait volumique, 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. Il est donc observé que la kaolinite a tendance à se stabiliser rapidement au cours du séchage, illustrée par une faible déformation de retrait. En revanche, la bentonite et le sol d'Esnandes montrent une propension plus marquée à subir des variations significatives avec le séchage. Leur capacité à retenir davantage d'eau les expose à des changements de volume plus prononcés que ceux observés pour la kaolinite.

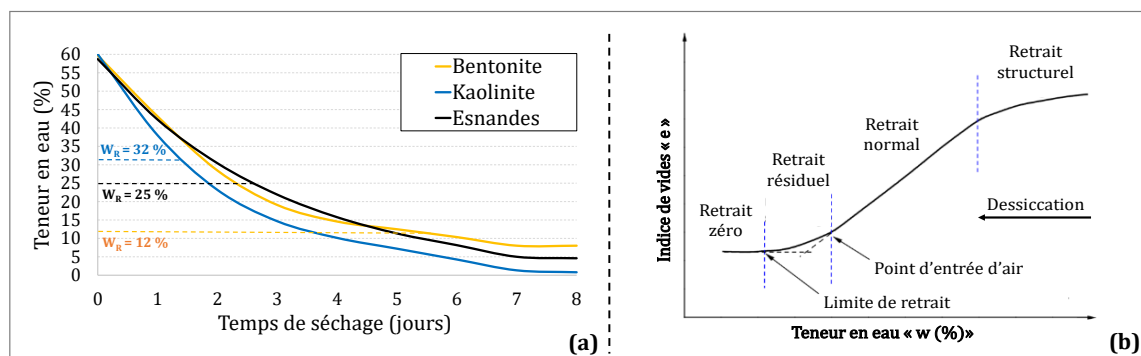


FIGURE 6. (a) Courbes de séchage des argiles étudiées, (b) Phases du retrait par dessiccation (Stirk, 1954; Tang et al., 2011)

L'analyse de la cinétique de séchage donne un aperçu du comportement hydrique de ces argiles. Les courbes de séchage (figure 6 (a)) indiquent que la vitesse d'évaporation de l'eau des échantillons ralentit après leur limite de retrait. De plus, après 8 jours de séchage, la kaolinite a quasiment éliminé toute son eau alors que la bentonite et le sol d'Esnandes ont maintenu une teneur en eau respectivement de 9% et 5% suggérant une rétention d'eau plus élevée même après une période prolongée de séchage.

B. Essais de suivi de la fissuration induite par le séchage utilisant la méthode de corrélation d'images

Le logiciel 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. Deux essais ont été réalisés pour chaque échantillon afin d'évaluer la fiabilité des résultats. Les mesures obtenues sont cohérentes entre les deux essais, confirmant ainsi la fiabilité de la procédure expérimentale.

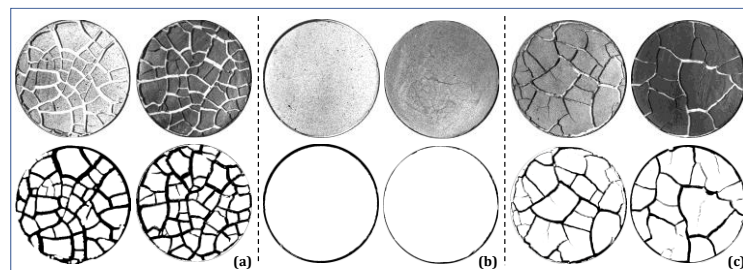


FIGURE 7. Images réelle et binaire à la fin du processus de séchage de (a) la bentonite, (b) la kaolinite, et (c) le sol d'Esnandes

Le traitement par Image-J 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 :

$$GSR = \frac{S_I - S_F}{S_I} \times 100$$

TABLEAU 2. Densité de retrait global GSR et ouverture des fissures des argiles testées

	Bentonite		Kaolinite		Esnandes	
Surface de l'échantillon (mm ²)	254,5	254,5	254,5	254,5	254,5	254,5
Surface rétrécie « SI – SF » (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

La kaolinite se distingue par sa résistance à la fissuration lors du séchage. Bien qu'elle ait montré une faible rétraction surfacique de moins de 7%, aucun réseau de fissures n'a été observé. Cette stabilité apparente peut être attribuée à sa structure cristalline et sa composition. En revanche, la bentonite a manifesté un comportement significativement différent, présentant un réseau de fissures étendu qui a contribué à un pourcentage de fissuration élevé de 32%. Cela peut être associé 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, a montré un pourcentage de fissuration de 14,5%, indiquant une certaine propension à la déformation en surface. En ce qui concerne la largeur des fissures (ouverture) à la fin du séchage, la bentonite et le sol d'Esnandes affichent des moyennes de 4,7 mm et 3,4 mm respectivement (tableau 2).

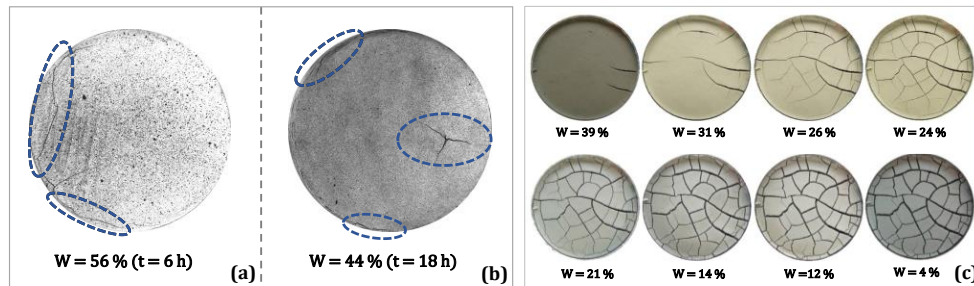


FIGURE 8. Teneur en eau et temps de début de fissuration de (a) la bentonite, (b) le sol d'Esnandes. (c) Evolution de la fissuration d'une argile de Romainville (Tang et al., 2011)

Les premières fissures de la bentonite sont apparues après 6 heures de séchage (figure 8 (a)), 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 8 (b)). 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. (Tang et al., 2011) ont effectué des essais similaires sur une argile de Romainville composée d'illite et de smectite et placée sur un support cylindrique de 117 mm de diamètre et 8 mm d'épaisseur, dans des conditions de température et d'humidité relative respectives de 25°C et 50%. Leurs résultats ont indiqué que les fissures ont été initiées depuis les bords et se sont propagées vers le centre.

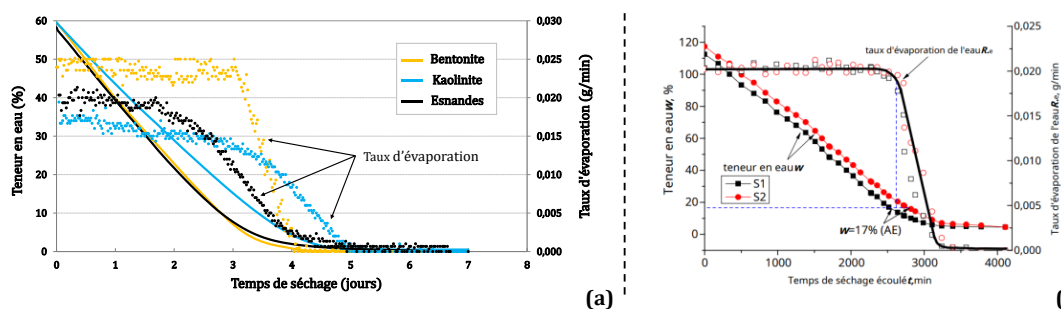


FIGURE 9. Courbes de séchage et taux d'évaporation en fonction du temps de séchage des (a) argiles étudiées, (b) argile de Romainville (Tang et al., 2011)

Au stade initial du séchage, les teneurs en eau ont diminué de manière linéaire, avec des taux d'évaporation constants spécifiques pour chaque type d'argile. La bentonite a affiché le taux d'évaporation le plus élevé à 0,025 g/min, suivi du sol d'Esnandes à 0,020 g/min, et enfin la

kaolinite à 0,015 g/min. Après environ 2 jours pour le sol d'Esnandes et 3 jours pour la bentonite et la kaolinite, la diminution de la teneur en eau a progressivement ralenti (figure 9 (a)). Concernant l'argile de Romainville (Tang et al., 2011), la teneur en eau a également diminué linéairement au stade initial, avec un taux d'évaporation constant d'environ 0,021 g/min. Environ 2 jours plus tard, la diminution de la teneur en eau a ralenti, se stabilisant ensuite à un niveau résiduel d'environ 4,5% (figure 9 (b)). À la limite de plasticité (W_p), 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 (W_R), 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, 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 (figure 10).

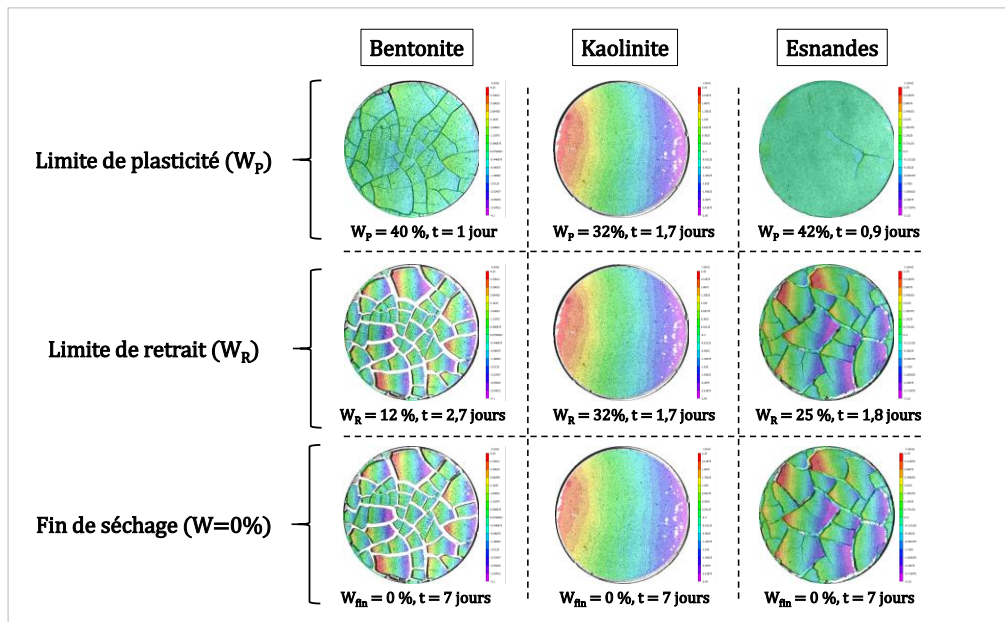


FIGURE 10. Champs de déplacement des argiles étudiées à W_p , W_R et W_{fin}

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Des essais de retrait linéaire et de suivi de la fissuration induite par le séchage en utilisant la méthode de corrélation d'images numériques ont été réalisés sur trois sols argileux comprenant une bentonite gonflante, une kaolinite non gonflante et un sol argileux prélevé sur une route départementale située entre Esnandes et Charron (17). Les constations suivantes ont été établies :

- La kaolinite se caractérise par sa stabilité et sa résistance remarquable à la fissuration, tandis que la bentonite et le sol d'Esnandes ont démontré des niveaux plus élevés de déformation et de fissuration.

- L'évolution d'un échantillon d'argile lors du processus de séchage est étroitement liée à ses dimensions. Les petits échantillons peuvent se rétracter sans se fissurer en raison d'une diminution uniforme de la teneur en eau. Cependant, avec des échantillons plus étendus, les variations dans la perte d'eau peuvent générer des contraintes internes plus importantes. Cela peut conduire à la formation des fissures.

Suite à cela, des traitements à base de nano-silice et de lait de chaux seront mis en œuvre. Leur efficacité sera évaluée en termes de réduction du retrait et de limitation des fissures.

REFERENCES

- Boivin, P., Garnier, P., Tessier, D., 2004. Relationship between Clay Content, Clay Type, and Shrinkage Properties of Soil Samples. *Soil Science Soc of Amer J* 68, 1145–1153. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1145>
- 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>
- Groenevelt, P.H., 2004. Analysis of soil shrinkage data.
- 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.
- Osinubi, K.J., Nwaiwu, C.M.O., 2008. Desiccation-induced Shrinkage in Compacted Lateritic Soils. *Geotech Geol Eng* 26, 603–611. <https://doi.org/10.1007/s10706-008-9193-4>
- 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>
- Sanchez, M., Atique, A., Kim, S., Romero, E., Zielinski, M., 2013. Exploring desiccation cracks in soils using a 2D profile laser device. *Acta Geotech.* 8, 583–596. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0272-1>
- Stirk, G.B., 1954. Some aspects of soil shrinkage and the effect of cracking upon water entry into the soil. *Australian Journal of Agricultural Research* 5, 279–296.
- Tang, C.-S., Cui, Y.-J., Tang, A.-M., Shi, B., 2010. Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils. *Engineering Geology* 114, 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.003>
- Tang, C.-S., Shi, B., Liu, C., Suo, W.-B., Gao, L., 2011. Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. *Applied Clay Science* 52, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.01.032>
- Wei, X., 2014. Etude micro-macro de la fissuration des argiles soumises à la dessiccation.