

# Etude du potentiel de gonflement et de retrait des sols argileux sous chaussée des routes des marais

Mohamed Amine ES-SOUFI<sup>1,2</sup>, Jacqueline SALIBA<sup>1</sup>, Arnaud LAFOURCADE<sup>2</sup>, Nadia SAIYOURI<sup>1</sup>

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

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

**RESUME** Le changement climatique et les périodes de sécheresse/humidification prolongées sont à l'origine d'importants dommages au niveau des infrastructures routières construites sur des sols argileux. En effet, les sols argileux présentent une variation de volume plus ou moins importante en fonction de leur teneur en eau et de leur minéralogie. Les travaux présentés dans cet article rentrent dans le cadre de l'identification et de la prévision du comportement des sols argileux sous chaussée des routes des marais du département de la Charente-Maritime (Sud-Ouest de la France). Plusieurs carottages allant jusqu'à une profondeur de 4 m ont été réalisés afin de caractériser les propriétés physico-chimiques des argiles. La granulométrie, la sédimentométrie, les limites d'Atterberg, la valeur au bleu de méthylène ainsi que le pourcentage en matières organiques ont été, dans un premier temps, déterminés pour des échantillons de sols relatifs à différentes profondeurs et différents carottages. Des essais MEB/EDS et DRX ont été ensuite réalisés pour analyser la composition chimique et la minéralogie du sol. Des essais de gonflement libre, de gonflement à volume constant et des essais de retrait linéaire ont été également effectués afin d'évaluer le comportement de ces sols vis-à-vis des phénomènes de retrait et de gonflement. Les résultats montrent une forte argilosité des sols avec une certaine sensibilité au gonflement et au retrait.

**Mots-clés :** sols argileux, propriétés physico-chimiques, retrait, gonflement

## I. INTRODUCTION

Le retrait-gonflement des sols argileux est un phénomène naturel qui affecte les routes construites sur des sols argileux. Ce phénomène est causé par les variations de teneur en eau des sols argileux en réponse aux changements de conditions climatiques, qui peuvent conduire à des mouvements du sol. Les accotements de la route, notamment ceux situés à proximité de la végétation, sont particulièrement sensibles à ce phénomène. Lorsque les sols argileux sont exposés à une sécheresse prolongée, ils ont tendance à se rétracter et à se fissurer, ce qui peut entraîner un affaissement de la chaussée. À l'inverse, lorsque les sols argileux absorbent de l'eau, ils ont tendance à se dilater et à gonfler, ce qui peut entraîner une élévation de la chaussée et des déformations. Avec le dérèglement des saisonnalités, les périodes de sécheresse sont de plus en plus longues, intenses et fréquentes, ce qui rend les routes plus vulnérables aux fissures causés par le retrait. Des observations expérimentales ont montré que les 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 (Tang et al., 2019). Les désordres liés aux phénomènes de retrait-gonflement dépassent la moyenne annuelle des désordres causés par d'autres risques naturels tels que les inondations, les tremblements de terre et les tempêtes (Buhler and Cerato, 2007). De nombreuses recherches ont été menées pour mieux comprendre comment les sols argileux réagissent aux cycles d'humidité et de sécheresse, en prenant en compte des facteurs tels que la minéralogie de l'argile, la teneur en eau et la succion. Le but est de réduire les dommages causés par le retrait-gonflement de ces sols. La stabilisation des sols argileux en utilisant des additifs chimiques est parmi les solutions les plus courantes permettant de contrôler les interactions argile-eau. Ces additifs stabilisent les minéraux d'argile soit par inhibition ionique en réduisant l'hydratation des cations d'inter-couche entre les feuillettes argileux, soit par bouchage physique des pores en réduisant le taux de pénétration de l'eau dans le sol ou soit en recouvrant les minéraux argileux par des liaisons chimiques pour réduire leur exposition à l'eau (Gholami et al., 2018). La stabilisation traditionnelle avec des agents tels que le ciment est fréquemment utilisée pour améliorer les sols (Estabragh et al., 2014). Cependant, cette méthode a des inconvénients tels qu'une faible durabilité, des coûts de transport élevés et des préoccupations croissantes pour l'environnement liées aux émissions de gaz à effet de serre (Soltani et al., 2018). La sélectivité ionique est un facteur clé de la stabilité des argiles en présence d'eau (Whittaker et al., 2019). La plupart des additifs liés aux minéraux argileux peuvent être facilement remplacés par les cations  $H^+$  lorsqu'une formation argileuse est continuellement exposée à l'eau, en raison de la préférence des argiles pour  $H^+$  (Badalyan et al., 2016). Ainsi, il est important de se concentrer sur des additifs chimiques qui peuvent non seulement créer des liaisons chimiques avec les minéraux argileux, mais également rester physiquement présents dans les pores et insolubles. C'est pourquoi l'utilisation des nanoparticules comme la nano-silice pour stabiliser les sols argileux est une piste intéressante (Roshan et al., 2022). En raison de sa taille nanométrique, de sa grande surface spécifique et de sa réactivité chimique, l'ajout d'une faible quantité de nano-silice a un grand effet sur les propriétés physico-mécaniques du sol (Lo et al., 2015; Pham and Nguyen, 2014; Taha and Taha, 2012; Wilson et al., 2008). Son inclusion permet d'augmenter la cohésion et de réduire la plasticité du sol. En effet, la nano-silice absorbe de l'eau (réduction de la valeur de l'indice de plasticité) et forme un gel visqueux entre les particules, ce qui remplit les pores et améliore la cohésion du sol (Barbhuiya and Hasan, 2021). Une étude de (Shahsavani et al., 2020) a montré que l'ajout de 0,5% de nano-silice à un sol argileux a réduit le potentiel de gonflement d'une valeur initiale de 75,26% à 58,10% après 24h. L'ajout de plus de 0,5% de nano-silice a eu un effet négatif sur la réduction du potentiel de gonflement. En effet, une forte teneur en nano-silice forme des morceaux de grumeaux instables dans le sol en raison de la distribution hétérogène des nanoparticules et de la réduction du poids unitaire des échantillons traités à la suite du remplacement des particules de sol par des nanoparticules de poids léger (Kalhor et al., 2019; Vakili et al., 2020).

L'objectif de cet article est d'évaluer le potentiel de gonflement et de retrait d'un sol argileux dans la perspective de le stabiliser chimiquement en utilisant la nano-silice. Les sols quaternaires récents sous chaussée de la route des marais RD 105 située entre Esnandes et Charron (17) - (Sud-Ouest de la France) ont été identifiés et caractérisés en mesurant leurs paramètres physico-chimiques. Ensuite, leurs potentiels de retrait et de gonflement ont été examinés expérimentalement pour avoir une meilleure compréhension de la manière dont ces sols réagissent aux variations de teneur en eau.

**II. PROGRAMME EXPERIMENTAL**

*A. Origine des sols testés*

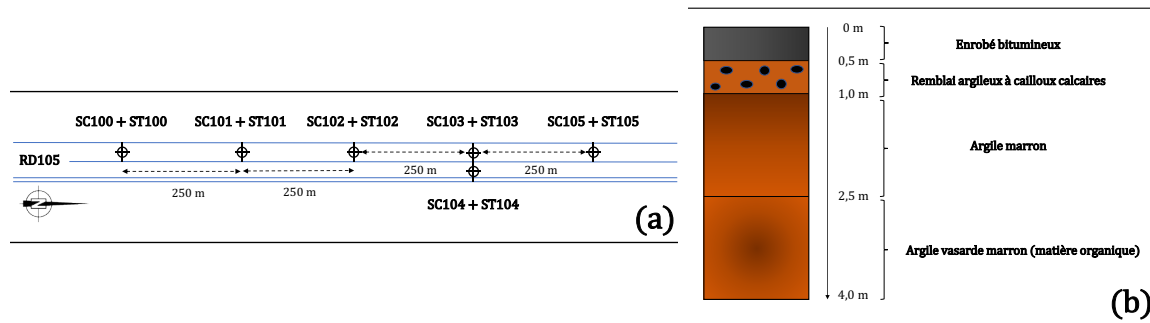
Les sols étudiés proviennent de la route départementale des marais RD105 située entre Esnandes et Charron (17) - département de la Charente-Maritime (Sud-Ouest de la France) (Figure 1. (a)). Un diagnostic géotechnique des désordres affectant cette route a montré la présence de plusieurs fissures longitudinales au niveau de ce linéaire de chaussée (Figure 1. (b)). L'analyse des différentes causes probables a montré qu'un tassement différentiel lié aux phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux pourrait être à l'origine de ces désordres.



**Figure 1. (a) Localisation de la zone d'étude et (b) Exemple d'une fissuration longitudinale observée**

Des sondages (ST/SC100 à ST/SC105) ont été effectués à l'aide d'une tarière et d'un carottier battu type LS 114 puis d'un carottier rotatif T6 de diamètre 116 mm. La sondeuse utilisée était de marque GEOTEC type 225. La

Figure 2. montre la distribution spatiale des sondages réalisés. La distance entre ces sondages est environ 250 m.



**Figure 2. (a) Répartition spatiale des sondages effectués et (b) Exemple d'une coupe de sol – SC 105**

Pour chaque sondage effectué, 3 échantillons ont été prélevés à des profondeurs différentes. Le premier échantillon a été prélevé à une profondeur comprise entre 0,5 à 1,0 mètre, le deuxième entre 1,0 à 2,5 mètres et le troisième entre 2,5 à 4,0 mètres. En total, 18 échantillons ont été collectés

au cours des sondages et ont été transportés au laboratoire pour analyse ultérieure. Cela permet d'obtenir une image complète de la composition du sol à différentes profondeurs. Les premières analyses descriptives des carottes montrent que les échantillons profonds (1,0-4,0 m) sont composés principalement d'une argile marron / noire indiquant la présence de matière organique.

### B. Procédures d'essais

Des essais physico-chimiques (granulométrique, sédimentométrique, bleu de méthylène, limites d'Atterberg, calcination par perte au feu) selon les normes NF P 94-056, NF P 94-057, NF P 94-068, NF P 94-051 et XP P 94-047 ont été effectués pour caractériser le sol d'étude (taille et répartition des particules, teneur en argile, état plastique et teneur en matière organique).

L'analyse de la microstructure et de la minéralogie du sol a été réalisée par observation au MEB et spectroscopie EDS, ainsi que par diffractométrie aux rayons X utilisant la Plateforme Aquitaine de Caractérisation des Matériaux (PLACAMAT). La plateforme utilisait un microscope MEB EVO 50 pour l'observation.

Le programme expérimental comprend également des essais de gonflement libre, de gonflement à volume constant et de retrait linéaire par dessiccation :

- L'essai de gonflement libre (XP P 84-703) mesure l'expansion d'une poudre de sol lorsqu'elle est immergée pendant 24h dans l'eau.
- L'essai de gonflement à volume constant consiste à charger une éprouvette œdométrique avec des paliers de charges en présence d'eau pour maintenir son volume constant et à la décharger ensuite pour mesurer sa déformation verticale maximale (Figure 3. (a)). Ce type d'essai est utilisé pour évaluer la capacité du sol à se déformer sans changer de volume, ce qui peut être utile pour comprendre sa stabilité en présence d'eau et son comportement mécanique sous charge.
- L'essai de retrait linéaire par dessiccation (NF P 94-060-2) détermine la limite de retrait en mesurant la variation de hauteur d'une éprouvette soumise au séchage à l'air libre (Figure 3. (b)). La courbe de retrait obtenue à partir de cette variation de hauteur permet de déterminer la limite de retrait.



Figure 3. (a) Suivi du gonflement à volume constant (b) Appareil de mesure du retrait linéaire

## III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

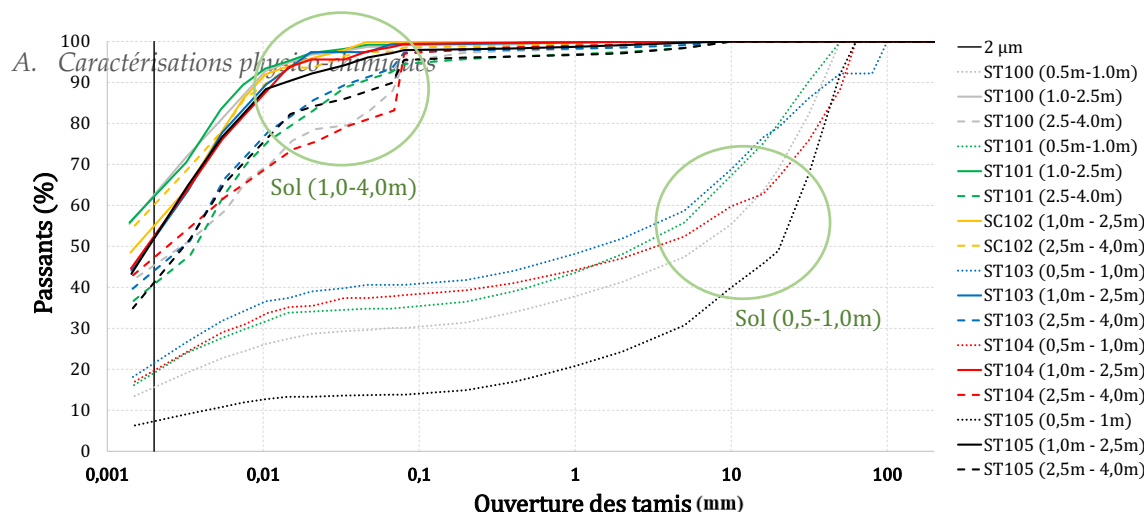


Figure 4. Courbes granulométriques des échantillons étudiés

L'analyse granulométrique (Figure 4. ) révèle la présence de deux familles de sol. Les échantillons superficiels, prélevés entre 0,5 et 1,0 m de profondeur, ont un faible pourcentage d'argile (% des passants à 2 µm) de 16,7%. À l'inverse, les échantillons prélevés plus profondément ont une forte teneur en argile de 50,1%.

En raison du risque de dégradations potentielles causées par les variations volumiques des sols de la deuxième famille (à des profondeurs allant de 1,0 à 2,5 m et de 2,5 à 4,0 m), des mesures supplémentaires ont été prises pour les étudier davantage (Tableau 1) :

- La teneur en eau naturelle (Wnat) ;
- La valeur de bleu (VBS) sur la fraction 0/2 mm ;
- Les limites d'Atterberg (limite de liquidité WL, de plasticité Wp et indice de plasticité Ip) ;
- La teneur en matière organique MO (%) par calcination ;
- L'activité :  $Ac = Ip / (\% < 2\mu m)$  (Skempton, 1953) et  $Acb = (100 \cdot VBS) / (\% < 2\mu m)$  (Lautrin, 1989) ;
- La surface spécifique des argiles :  $SA = 20,93 \cdot VBS$  (Bultel, 2001);
- La capacité d'échange cationique :  $CEC = (VBS / 374) \cdot 1000$  (Clement, 1988)

Tableau 1. Valeurs des paramètres d'identification des échantillons étudiés

Sondage	Profondeur	Wnat (%)	VBS (g/100g)	W <sub>t</sub> (%)	W <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub> (%)	MO (%)	Ac	Acb	SA (m <sup>2</sup> /g)	CEC (Cmol/kg)
SC100	1,0 - 2,5 m	48,8	7,9	73,3	35,2	38,1	6,1	0,61	12,7	166,2	21,2
	2,5 - 4,0 m	62,3	6,4	62,5	31,1	31,5	6,8	0,70	14,1	133,5	17,1
SC101	1,0 - 2,5 m	35,8	9,5	71,3	29,6	41,7	6,6	0,67	15,3	198,8	25,4
	2,5 - 4,0 m	55,2	7,1	69,3	35,9	33,4	6,7	0,77	16,3	149,2	19,1
SC102	1,0 - 2,5 m	35,1	8,6	71,1	30,6	40,4	7,1	0,73	15,6	180,1	23
	2,5 - 4,0 m	56,5	7,6	74,5	39,3	35,2	7,0	0,65	15,2	159,7	20,4
SC103	1,0 - 2,5 m	45,9	9,9	74,2	38,5	35,7	6,3	0,69	19,1	207,2	26,5
	2,5 - 4,0 m	55,5	7,6	53,3	29,9	23,5	7,6	0,53	16,5	158,3	20,2
SC104	1,0 - 2,5 m	42,3	7,9	73,1	35,8	37,3	6,5	0,71	15,1	164,9	21,1
	2,5 - 4,0 m	31,5	6,9	74,6	35,7	38,8	7,1	0,89	15,9	145,3	18,6
SC105	1,0 - 2,5 m	43,9	7,9	65,5	35,9	29,6	6,2	0,57	15,2	165,6	21,2
	2,5 - 4,0 m	53,1	6,3	69,5	35,5	34,0	7,2	0,82	15,4	132,7	17,0
Moyenne	1,0 - 2,5 m	42,0 ± 4,3	8,6 ± 0,7	71,4 ± 2,1	34,3 ± 2,8	37,1 ± 3	6,5 ± 0,3	0,66 ± 0,05	15,5 ± 1,2	180,5 ± 15	23,1 ± 1,9
	2,0 - 4,0 m	52,4 ± 6,9	7 ± 0,4	67,3 ± 6,3	34,6 ± 2,7	32,7 ± 3,5	7,1 ± 0,2	0,73 ± 0,1	14 ± 0,7	146,5 ± 9,3	18,7 ± 1,2

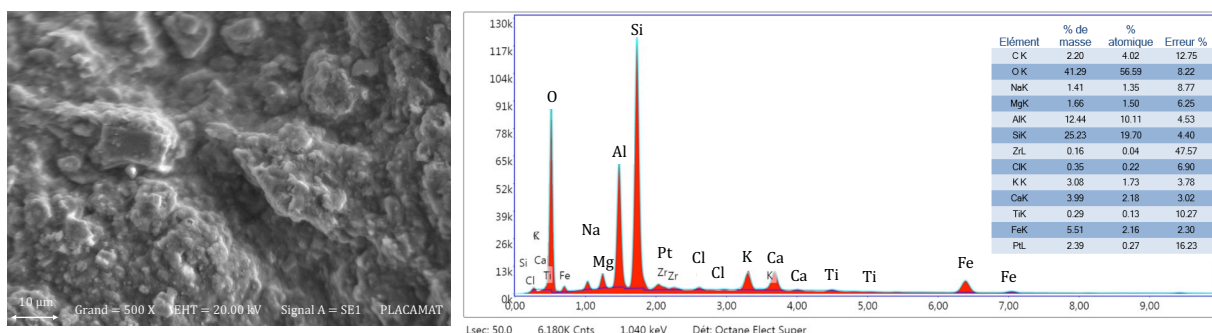
Les données obtenues lors des 5 sondages effectués à deux profondeurs différentes montrent une cohérence relative des valeurs des paramètres identifiés, sans présenter de variations importantes. Le sol d'étude a un indice de plasticité moyen compris entre 32% et 37%, ce qui indique qu'il est plastique. La moyenne de l'indice VBS au Bleu est d'environ 7 à 8, ce qui suggère une forte argilosité du sol et une sensibilité éventuelle au retrait-gonflement (Chassagneux et al., 1996). En se basant sur la classification GTR, le sol est classé comme étant de type A3/A4.

Le sol examiné a une teneur en matière organique d'environ 6 à 7%, ce qui est considérable. (Hamouche, 2016) a étudié le comportement d'une argile silteuse calcaire en présence de matière organique et a constaté que cela augmente la plasticité (Ip) et l'argilosité (VBS) de l'échantillon argileux. Cela peut être attribué à la capacité de la matière organique à retenir l'eau (Thiyyakkandi, 2011) et à renforcer les complexes argilo-humiques (Naskar, 2013). Cette étude pourrait expliquer les valeurs élevées d'Ip et de VBS observées dans le sol examiné. Selon (Lautrin, 1989), l'indice de l'activité au bleu est un bon indicateur de l'activité colloïdale du sol. Il augmente en présence de smectites, qui sont des minéraux très gonflants, et décroît avec la présence de kaolinite, qui est un minéral peu gonflant. En comparant les valeurs d'activité au bleu des échantillons testés (14 à 15) avec la classification proposée par ce chercheur, on peut conclure que le sol d'étude est très actif.

La surface spécifique exprime la quantité de surface accessible aux réactions chimiques et à la sorption de molécules dans le sol. Les grandes valeurs obtenues (entre 146 et 180 m<sup>2</sup>/g en moyenne) peuvent indiquer que le sol a une structure poreuse plus développée, ce qui peut entraîner une plus grande disponibilité pour les réactions chimiques et la sorption. Les fortes valeurs de la capacité d'échange cationique (entre 18 et 23 Cmol/kg) signifient que le sol a une grande capacité à retenir et à échanger des cations avec le milieu environnant.

*B. Analyses microscopiques (MEB / EDS et DRX)*

L'observation microscopique (MEB) de la fraction fine de l'échantillon SC 105 (2,5-4,0m) révèle que sa microstructure est caractérisée par une matrice argileuse relativement homogène et dense ( a)). Cela peut suggérer une bonne coagulation des particules argileuses, formant ainsi une structure compacte et cohérente. Cependant, il est important d'effectuer une analyse spectrométrique (EDS) et minéralogique (DRX) pour obtenir une compréhension plus approfondie et complémentaire des propriétés détaillées du sol d'étude.



**Figure 5. (a) Structure au MEB (b) éléments chimiques présents dans l'échantillon SC 105 (2,5 – 4,0 m)**

L'analyse spectrométrique par dispersion d'énergie EDS ( (b)) montre que l'échantillon étudié contient les éléments suivants en pourcentage : oxygène (41%), silicium (25%), aluminium (12,5%), fer (5,5%), calcium (4%) et potassium (3%). Cela signifie que l'échantillon est riche en oxygène et en silicium, tandis que les autres éléments ne sont présents qu'en quantités plus faibles.

Le diagramme de diffraction des rayons X d'une poudre du même échantillon est présenté dans la (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). L'analyse de ces diffractogrammes réalisée via le logiciel Profex 5.1.0 montre que les minéraux les plus présents dans l'échantillon testé sont la kaolinite (26%), la smectite (18,30%), la muscovite (17,39%), le quartz (16,26%), la dickite (14,09%) et le graphite (7,92%).

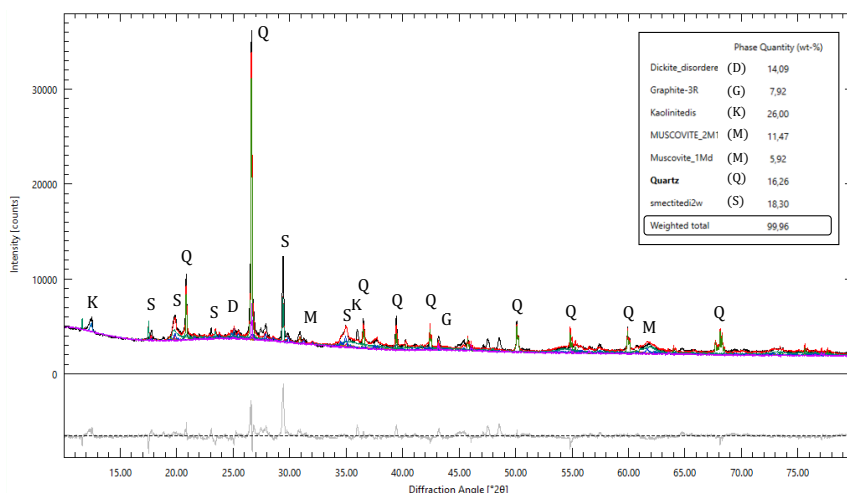


Figure 6. Diffractogramme d'une poudre de l'échantillon SC103 (1,0-2,5m)

C. Mesure du potentiel de gonflement

1. Essai de gonflement libre

4 g de poudre sèche de l'échantillon SC 103 (1,0 – 2,5m) et de SC 105 (2,5 – 4,0 m) ont été introduits séparément dans 200 ml d'eau. Le volume du dépôt de sol occupé avant et après 24h d'immersion a été ensuite observé.

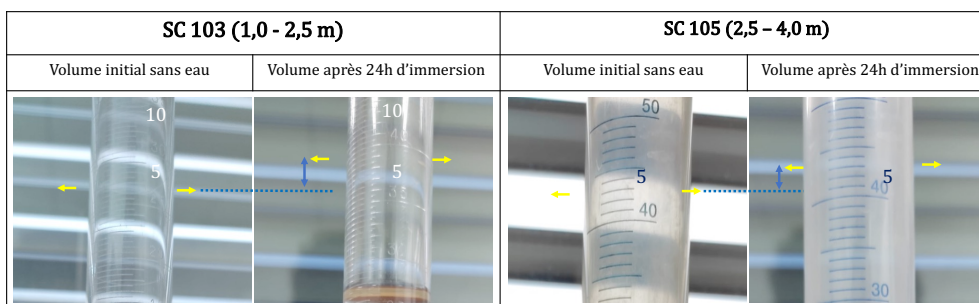


Figure 7. Volume initial et final des poudres de sol SC 103 (1,0 – 2,5 m) et SC 105 (2,5 – 4,0 m)

Le volume initial (Vi) et le volume final (Vf) des deux poudres sont respectivement égaux à 4,5 ml et 6,5 ml. Ainsi, le pourcentage de gonflement  $\{((Vf - Vi) / Vi) * 100\}$  est de l'ordre de 44,4 %

indiquant une forte sensibilité au gonflement (Tankpinou, 2016). (Haas et al., 2015) a réalisé une étude se basant sur ce principe et a montré que la mesure est fiable d’après des relations établies avec les analyses de minéralogie et les valeurs de bleu VBS.

2. Essai de gonflement à volume constant

Quatre échantillons intacts d'une hauteur de 10 cm sont prélevés des carottes SC100, SC103 et SC105, deux peu profonds (à 2m de profondeur) et deux très profonds (à 4m de profondeur), à l'aide d'une bague œdométrique. Les échantillons sont ensuite placés dans une enceinte cylindrique rigide en présence de l'eau. Les valeurs de la pression de gonflement (contrainte maximale pour empêcher le gonflement des échantillons pendant l'hydratation) et de l'amplitude de gonflement (déformation maximale pendant le déchargement) ont été enregistrées au cours de l'essai. Le Tableau 2 présente les résultats obtenus.

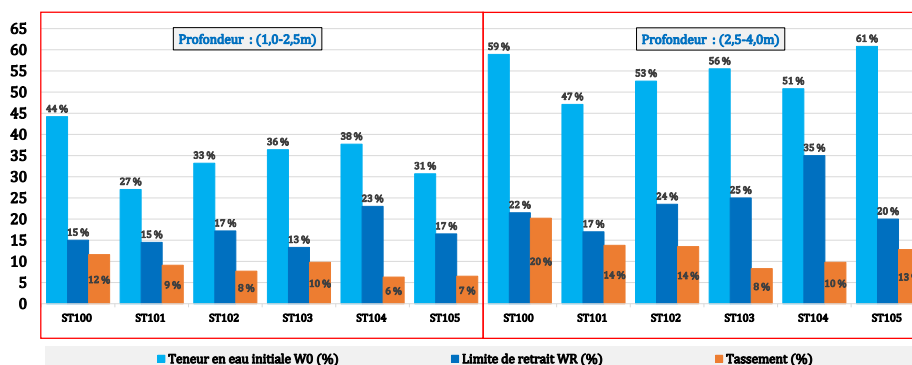
**Tableau 2. Valeurs des paramètres de gonflement mesurés**

Paramètres	Echantillons			
	Profondeur ≈ 2 m		Profondeur ≈ 4 m	
	SC100 (1,7-1,8m)	SC103 (1,8-1,9m)	SC100 (3,6-3,7m)	SC105 (3,6-3,7m)
Teneur en eau initiale $W_i$ (%)	31.0	30.7	65.8	67.5
Teneur en eau finale $W_f$ (%)	35.6	35.2	66.9	67.9
$W_f - W_i$ (%)	4.6	4.5	1.1	0.4
Amplitude de gonflement (%)	3.7	3.4	0.1	0.4
Pression de gonflement (kPa)	46.0	46.0	11.0	13.0

La pression et l'amplitude de gonflement des deux échantillons peu profonds sont de l'ordre de 46 kPa et 4% respectivement, ce qui montre qu'ils sont sensiblement réactifs à l'expansion. Les deux autres échantillons très profonds ont des pressions et amplitudes de gonflement faibles vu qu'ils sont quasiment saturés (teneur en eau = 70%). Des essais supplémentaires sur d'autres échantillons provenant de différentes profondeurs sont prévus pour une évaluation plus complète et globale du caractère gonflant du sol.

E. Mesure du potentiel de retrait

L'essai de retrait linéaire a été réalisé sur les échantillons de la profondeur 1,0 à 2,5 et de 2,5 à 4,0 m. La Figure 8 donne les valeurs des paramètres de retrait mesurés.



### Figure 8. Limite de retrait et tassement des échantillons testés

La limite de retrait est la teneur en eau en dessous de laquelle un échantillon subit un assèchement sans variation de volume. Le tassement est la variation maximale de la hauteur de l'échantillon lors de son assèchement. Les déformations de retrait observées (tassements) sont en moyenne de 8,5% pour les échantillons peu profonds (1,0 - 2,5 m) et de 13,1% pour ceux qui sont plus profonds (2,5 - 4,0 m), ce qui est très significatif. La différence au niveau de ces déformations observées est expliquée par la différence de teneur en eau initiale des échantillons. En effet, plus cette teneur en eau est importante, plus la pression interne augmente, ce qui peut entraîner une compression plus forte des particules et donc un tassement plus important. C'est pourquoi un sol ayant une teneur en eau plus élevée, comme celui situé entre 2,5 et 4 m se rétractera davantage que celui ayant une teneur en eau plus faible, comme celui situé entre 1,0 et 2,5 m.

## V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cette étude, les sols quaternaires sous la chaussée de la route des marais RD 105 entre Esnandes et Charron ont été examinés pour déterminer leurs propriétés de retrait et de gonflement. Les tests d'identification physique et chimique ont révélé que le sol est plastique, fortement argileux et contient environ 6 à 7 % de matière organique. Les analyses MEB/EDS et DRX ont montré une structure compacte et coagulée, comprenant principalement de la kaolinite, de la smectite, de la muscovite et du quartz. Les tests de gonflement et de retrait ont montré que le sol a une certaine capacité de gonflement et de retrait.

La prochaine étape consiste à tester l'effet de différents pourcentages de nano-silice pour stabiliser chimiquement ces sols et surveiller en continu les variations volumiques et les fissures à l'aide des techniques de traitement d'images. De plus, des cycles de séchage-humidification seront appliqués pour évaluer la stabilité à long terme du traitement. En outre, une méthodologie de mise en œuvre de la solution in situ qui inclura la zone et la profondeur de traitement, la période, le maillage, le dosage, etc., sera développée.

## REFERENCES

- Badalyan, A., Beasley, T., Nguyen, D., Keshavarz, A., Schacht, U., Carageorgos, T., You, Z., Bedrikovetsky, P., Hurter, S., Troth, I., 2016. Laboratory and mathematical modelling of fines production from CSG interburden rocks, in: SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. OnePetro.
- Barbhuiya, G.H., Hasan, S.D., 2021. Effect of nano-silica on physio-mechanical properties and microstructure of soil: A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings* 44, 217–221. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.115>
- 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)

- Bultel, F., 2001. Prise en compte du gonflement des terrains dans le dimensionnement des revêtements des tunnels.
- Chassagneux, D., Stieljes, L., Mouroux, P., Ménilliet, F., Ducreux, G.H., 1996. Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse-pluie) à l'échelle départementale. Approche méthodologique dans les Alpes de Haute-Provence. Rapport BRGM n R39218 6.
- Clement, C., 1988. Etude de coulis hydrauliques pour la rétention des cations polluants Pb, Cd, Hg, Sr, Cs (PhD Thesis). Paris, ENMP.
- Estabragh, A.R., Rafatjo, H., Javadi, A.A., 2014. Treatment of an expansive soil by mechanical and chemical techniques. *Geosynthetics International* 21, 233–243.
- Gholami, R., Elochukwu, H., Fakhari, N., Sarmadivaleh, M., 2018. A review on borehole instability in active shale formations: Interactions, mechanisms and inhibitors. *Earth-Science Reviews* 177, 2–13.
- Haas, H., Maubec, N., Bruyère, D., Le Clech, A., Bourrat, X., 2015. Test de la mesure de l'indice de gonflement des sols par immersion dans l'eau pour la caractérisation du retrait-gonflement de sols naturels, in: *Symposium International SEC*.
- Hamouche, F., Zentar, R., 2016. Influence des matières organiques sur les propriétés physiques des sédiments de dragage. *Academic Journal of Civil Engineering* 34, 908–914.
- Kalhor, A., Ghazavi, M., Roustaei, M., Mirhosseini, S.M., 2019. Influence of nano-SiO<sub>2</sub> on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology* 161, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.03.011>
- Lautrin, D., 1989. Essai au bleu de méthylène (suite). Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. *Bull. liaison lab. ponts chaussées* 53–65.
- Lo, A.-Y., Wang, C., Hung, W.H., Zheng, A., Sen, B., 2015. Nano- and Biomaterials for Sustainable Development. *Journal of Nanomaterials* 2015, e129894. <https://doi.org/10.1155/2015/129894>
- Naskar, N., 2013. Effect of organic content on shear strength characteristics of clay (PhD Thesis).
- Pham, H., Nguyen, Q.P., 2014. Effect of silica nanoparticles on clay swelling and aqueous stability of nanoparticle dispersions. *J Nanopart Res* 16, 2137. <https://doi.org/10.1007/s11051-013-2137-9>
- Roshan, H., Lv, A., Aghighi, M.A., Sarmadivaleh, M., Siddiqui, M.A.Q., van As, D., Ehsani, S., 2022. Stabilization of clay-rich interburdens using silica nanoparticles. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 211, 110126. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110126>
- Shahsavani, S., Vakili, A.H., Mokhberi, M., 2020. The effect of wetting and drying cycles on the swelling-shrinkage behavior of the expansive soils improved by nanosilica and industrial waste. *Bull Eng Geol Environ* 79, 4765–4781. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01851-6>
- Skempton, A.W., 1953. Soil mechanics in relation to geology. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society* 29, 33–62. <https://doi.org/10.1144/pygs.29.1.33>
- Soltani, A., Deng, A., Taheri, A., Mirzababaei, M., 2018. Rubber powder–polymer combined stabilization of South Australian expansive soils. *Geosynthetics International* 25, 304–321. <https://doi.org/10.1680/jgein.18.00009>
- Taha, M.R., Taha, O.M.E., 2012. Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior. *J Nanopart Res* 14, 1190. <https://doi.org/10.1007/s11051-012-1190-0>
- Tang, C.-S., Zhu, C., Leng, T., Shi, B., Cheng, Q., Zeng, H., 2019. Three-dimensional characterization of desiccation cracking behavior of compacted clayey soil using X-ray computed tomography. *Engineering Geology* 255, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.04.014>
- Tankpinou, Y., 2016. Caractérisation minéralogique, thermique et microscopique des sols fins en technique routière.
- Thiyyakkandi, S., Annex, S., 2011. Effect of organic content on geotechnical properties of Kuttanad clay. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 16, 1653–1663.
- Vakili, A.H., Shojaei, S.I., Salimi, M., Selamat, M.R. bin, Farhadi, M.S., 2020. Contact erosional behaviour of foundation of pavement embankment constructed with nanosilica-treated dispersive soils. *Soils and Foundations* 60, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.02.001>
- Whittaker, M.L., Lammers, L.N., Carrero, S., Gilbert, B., Banfield, J.F., 2019. Ion exchange selectivity in clay is controlled by nanoscale chemical–mechanical coupling. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 22052–22057.

Wilson, M.A., Tran, N.H., Milev, A.S., Kannangara, G.K., Volk, H., Lu, G.M., 2008. Nanomaterials in soils. *Geoderma* 146, 291–302.