

Effets des Cycles de Séchage/Humidification et de la Nano-Silice sur la Stabilisation des Sols Argileux Sous-Chaussée

Mohamed Amine ES-SOUFI^{1,2,3}

¹ Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France

² Arts et Metiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, Hesam Université, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France

³ GEOTEC, Geotechnical Consulting Office, 19 Rue de la Gravette, 33320 Eysines, France

RESUME Les sols expansifs sont sujets à des variations volumiques importantes sous l'effet des cycles de séchage et d'humidification, posant un risque pour la durabilité des infrastructures. Cette étude évalue l'impact de ces cycles sur le retrait-gonflement de deux sols sous-chaussée (Sarlat et Esnandes) et d'une bentonite calcique industrielle, ainsi que l'efficacité de la stabilisation à la nano-silice. Les résultats montrent que la Bentonite, contenant de la montmorillonite, présente les plus fortes déformations, tandis que Sarlat, majoritairement composé de kaolinite, affiche des variations plus faibles. Esnandes, riche en matière organique, présente un comportement intermédiaire. L'analyse des déformations volumiques révèle une stabilisation progressive dès le troisième cycle, suggérant une adaptation structurelle aux sollicitations hydriques répétées. L'ajout de nano-silice réduit significativement les déformations, avec une efficacité maximale à 20%, permettant une diminution de 45% du retrait et 55% du gonflement dès le premier cycle. Cependant, son impact diminue au fil des cycles en raison d'une stabilisation structurelle naturelle du sol. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt de la nano-silice comme stabilisant innovant et soulignent la nécessité d'optimiser son dosage et ses interactions avec d'autres traitements pour améliorer la durabilité des sols soumis à des cycles hydriques.

Mots-clefs : argile, retrait, gonflement, traitement, nano-silice

I. INTRODUCTION

Les sols expansifs, particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau, subissent d'importants changements volumiques qui représentent un défi majeur pour la durabilité des infrastructures, notamment dans les régions soumises à des fluctuations saisonnières d'humidité (Estabragh et al., 2015; Goodarzi et al., 2016). Ces cycles répétés de séchage et d'humidification provoquent des retraites et gonflements successifs, entraînant des déformations différentielles susceptibles d'endommager les fondations, les routes et d'autres ouvrages (Tripathy et al., 2002; Wang et al., 2013). Une analyse approfondie des mécanismes associés à ces cycles est donc nécessaire pour mieux comprendre le comportement des sols et proposer des solutions adaptées.

En laboratoire, les cycles de séchage et d'humidification influencent fortement le comportement des sols expansifs, selon des facteurs tels que la minéralogie des argiles, la teneur en eau initiale, la surcharge appliquée et les conditions environnementales (Estabragh et al., 2015; Kherad et al., 2020). (Tripathy et al., 2002) ont montré qu'une bentonite calcique compactée à différentes pressions de surcharge, conservée à température ambiante, présente une réduction progressive du potentiel de gonflement et de retrait au fil des cycles, liée à des réarrangements structuraux et à une diminution de la porosité. De son côté, (Kalkan, 2011) a observé un comportement similaire sur un sol argileux naturel traité à la fumée de silice, soumis à des cycles à 40 °C, en particulier pour les échantillons traités, mettant en évidence l'effet stabilisant du traitement. À l'inverse, (Tawfiq et Nalbantoglu, 2009) ont rapporté une augmentation du potentiel de gonflement sur un sol limono-argileux compacté, soumis à plusieurs cycles à température ambiante, sans surcharge. Ces résultats, parfois divergents, reflètent la complexité des interactions entre cycles hydriques et microstructure, et montrent l'importance des conditions expérimentales et des propriétés du sol dans l'interprétation des mécanismes observés.

Pour limiter les impacts de ces cycles sur les infrastructures, les traitements de stabilisation chimique sont largement utilisés. Ces traitements agissent en modifiant les interactions entre les argiles et l'eau grâce à des mécanismes tels que l'inhibition ionique, le blocage des pores et la formation de liaisons chimiques avec les minéraux argileux (Gholami et al., 2018). Parmi les stabilisants traditionnels, le ciment et la chaux sont fréquemment utilisés pour réduire le potentiel de gonflement et améliorer les propriétés mécaniques des sols (Estabragh et al., 2014). Cependant, ces méthodes présentent des limites en termes de durabilité et d'impact environnemental, notamment en raison des émissions de gaz à effet de serre liées à leur production (Soltani et al., 2018). Ces préoccupations ont conduit à l'émergence de stabilisants innovants tels que les nanomatériaux, notamment la nano-silice, qui offrent des avantages en termes de performance et de durabilité (Taha and Taha, 2012; Bahmani et al., 2014).

La nano-silice, grâce à sa surface spécifique élevée et sa réactivité chimique, modifie significativement les propriétés physico-mécaniques des sols argileux. Elle agit en réduisant l'épaisseur de la double couche électrique des particules d'argile, favorisant ainsi leur floculation et une diminution de la porosité (Shang et Fu, 2018). Par ailleurs, en présence d'électrolytes tels que des cations sodium, la nano-silice peut être activée pour former un gel silicaté (Iler, 1979). Ce processus implique des liaisons entre les groupements silanols des particules de silice via les cations, conduisant à la formation d'un réseau solide cohérent capable de retenir l'eau par capillarité (Noll et al., 1992). Une fois diffusée dans le sol, cette transformation en gel contribue à renforcer les liaisons inter-particulaires et à bloquer la migration de l'eau, réduisant ainsi le potentiel de retrait-gonflement (Changizi and Haddad, 2017; Shahsavani et al., 2020). Toutefois, les effets de la stabilisation à la nano-silice, notamment dans des conditions cycliques de séchage et d'humidification, restent encore peu explorés.

Cette étude vise à approfondir la compréhension des effets des cycles de séchage et d'humidification sur les comportements de retrait-gonflement de deux sols argileux sous-chaussée (Sarlat et Esnandes) ainsi qu'une Bentonite calcique industrielle, tout en évaluant l'efficacité de la stabilisation chimique à la nano-silice. Les mécanismes sous-jacents aux variations volumiques et microstructurales seront analysés à l'aide d'essais expérimentaux combinant des

mesures géotechniques, minéralogiques et chimiques, afin d'apporter des réponses aux défis de durabilité des infrastructures dans des contextes soumis à des cycles hydriques.

II. MATERIAUX

A. Sols d'étude

Dans cette étude, trois types de sols argileux ont été analysés : deux sols sous-chaussée, Sarlat et Esnandes, issus de sites routiers en France, et une bentonite calcique industrielle utilisée comme référence. Le sol de Sarlat provient d'un projet de future route départementale en Dordogne (24), traversant des zones forestières et agricoles peu urbanisées. Le sol d'Esnandes, prélevé sur une route départementale en Charente-Maritime (17), est issu d'un tronçon présentant des fissurations longitudinales principalement au niveau des accotements proches de la végétation. Les deux sols ont été collectés à des profondeurs comprises entre 1 et 6 m et présentent des densités sèches initiales variant de 1,0 à 1,6 g/cm³. Ils se trouvent dans un état quasi-saturé. Enfin, la bentonite calcique industrielle utilisée a été fournie par LAFAURE (France). Cette argile a été intégrée dans cette étude pour comparer ses caractéristiques aux sols naturels étudiés. Le TABLEAU 1 résume les propriétés physico-chimiques des trois sols.

TABLEAU 1. Propriétés physico-chimiques des sols d'étude

Norme	NF P 94-051	NF P 94-056			NF P 94-068	NF P 94-051			XP P 94-047	Classification GTR
	W _{nat} (%)	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	VBS	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	MO (%)	
Sarlat	32 ± 7	12 ± 9	54 ± 13	31 ± 7	8,0 ± 1,9	82 ± 10	32 ± 5	50 ± 5	2,4 ± 0,5	A4
Esnandes	50 ± 8	1 ± 1	48 ± 5	51 ± 6	7,8 ± 0,8	69 ± 4	35 ± 3	35 ± 4	6,8 ± 0,4	A3
Bentonite	-	-	-	-	10,2 ± 0,1	84 ± 2	40 ± 1	44 ± 1	-	A4

Les analyses de diffraction des rayons X (DRX), réalisées en collaboration avec l'Institut de Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux (ICMCB) sur des échantillons en poudre tamisés à 80 µm et analysés à l'aide du logiciel Profex 5.2.5, montrent que le sol de Sarlat est principalement constitué de quartz et de kaolinite. Le sol d'Esnandes est dominé par le quartz et la montmorillonite, avec des proportions mineures de kaolinite et de graphite. La bentonite est riche en montmorillonite et en quartz, avec des quantités secondaires de calcite et d'illite.

B. Nano-silice utilisée (NS)

La nano-silice utilisée, LEVASIL CS30-324, est une dispersion aqueuse alcaline de silice colloïdale fournie par Nouryon (Pays-Bas). Stabilisée par des ions sodium, elle est composée de particules sphériques amorphes portant une charge de surface négative. Ce liquide clair, légèrement plus visqueux que l'eau, présente une distribution granulométrique semi-large, avec des tailles de particules comprises entre 10 et 20 nm. Les caractéristiques de cette nano-silice sont résumées dans le TABLEAU 2.

TABLEAU 2. Caractéristiques de la nano-silice utilisée

Caractéristiques	Silice (% en poids)	Densité (g/cm ³)	Surface spécifique (m ² /g)	pH	Viscosité (cP)	Na ₂ O (% en poids)
Nano-silice	30	1,2	300	10	7	0,35

III. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

A. Préparation des échantillons

Dans un premier temps, trois échantillons représentatifs des sols de Sarlat, Esnandes et Bentonite ont été préparés conformément aux conditions définies par l'essai Proctor normal (NF P94-093). Dans un second temps, l'effet de la stabilisation chimique à la nano-silice a été étudié sur la Bentonite calcique. Trois mélanges ont été préparés en incorporant des pourcentages croissants de nano-silice (NS) : 4%, 10% et 20% en poids. Ces dosages correspondent à des teneurs réelles en nano-silice sèche de 1,2%, 3% et 6% respectivement. Après la compaction dans le moule Proctor, les échantillons ont été extraits à l'aide d'une bague œdométrique rigide de 50 mm de diamètre et 20 mm de hauteur. Les sols de Sarlat et Esnandes ont été préalablement concassés et tamisés à 80 µm afin de conserver uniquement la fraction fine. Les teneurs en eau initiales ont été choisies du côté humide de l'optimum. Le TABLEAU 3 présente les valeurs initiales de la teneur en eau (W_{initiale}), de la densité sèche ($\gamma_{d,\text{initiale}}$) et du degré de saturation (S_r) des mélanges étudiés, avec et sans traitement à la nano-silice.

TABLEAU 3. Conditions initiales des mélanges avec et sans traitement à la nano-silice

Mélanges	Sans traitement à la nano-silice			Avec traitement à la nano-silice		
	Sarlat	Esnandes	Bentonite	Bentonite		
				4% NS	10% NS	20% NS
W_{initiale} (%)	32	33	42	44	39	39
$\gamma_{d,\text{initiale}}$ (g/cm ³)	1,26	1,37	1,21	1,21	1,28	1,29
$S_{r,\text{initial}}$ (%)	77	94	93	98	98	98

B. Dispositif expérimental des cycles de séchage-humidification

- Mesure des déformations axiales

Pour mesurer la déformation axiale due au retrait, l'échantillon, placé sur une pierre poreuse lisse, est séché à l'air libre conformément au protocole de l'essai de retrait linéaire (NF P 94-060-2). Le processus de séchage dure 5 jours. Pendant cette phase, un capteur de déplacement Mitutoyo de la série ABSOLUTE Digimatic, avec une précision de 0,01 mm, est positionné sur la surface supérieure de l'échantillon afin de mesurer en continu la variation de hauteur. Grâce à sa faible force de mesure, le palpeur n'exerce qu'une pression minimale sur le matériau, assurant ainsi un contact sans enfoncement et garantissant la fiabilité des mesures. En parallèle, l'échantillon est placé sur une balance de précision 0,01 g pour surveiller la perte de masse, permettant ainsi de déterminer les variations de teneur en eau au cours du séchage.

Après la phase de séchage, l'échantillon est transféré avec la pierre poreuse inférieure directement dans une cellule œdométrique. Une seconde pierre poreuse est ensuite placée sur sa face supérieure afin d'assurer une distribution homogène de l'eau lors de la ré-humidification. L'ensemble est fermé, puis de l'eau distillée est ajoutée dans la cellule. L'humidification se fait progressivement par capillarité à travers la pierre poreuse inférieure, permettant ainsi d'atteindre un état relativement homogène en fin d'essai. La durée du test est fixée à 5 jours, ce qui s'est révélé suffisant pour atteindre une déformation axiale maximale. Un capteur de déplacement, avec une précision de 0,01 mm, est utilisé pour mesurer en continu l'évolution de la hauteur de l'échantillon au cours du gonflement. Le retrait latéral n'est pas suivi en continu, mais est évalué en fin d'essai par comparaison entre la surface initiale et la surface finale de l'échantillon, à l'aide du logiciel Image-J.

Les deux montages, pour les phases de retrait et de gonflement, sont installés dans une salle à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $50 \pm 5\%$. La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre ces dispositifs expérimentaux.

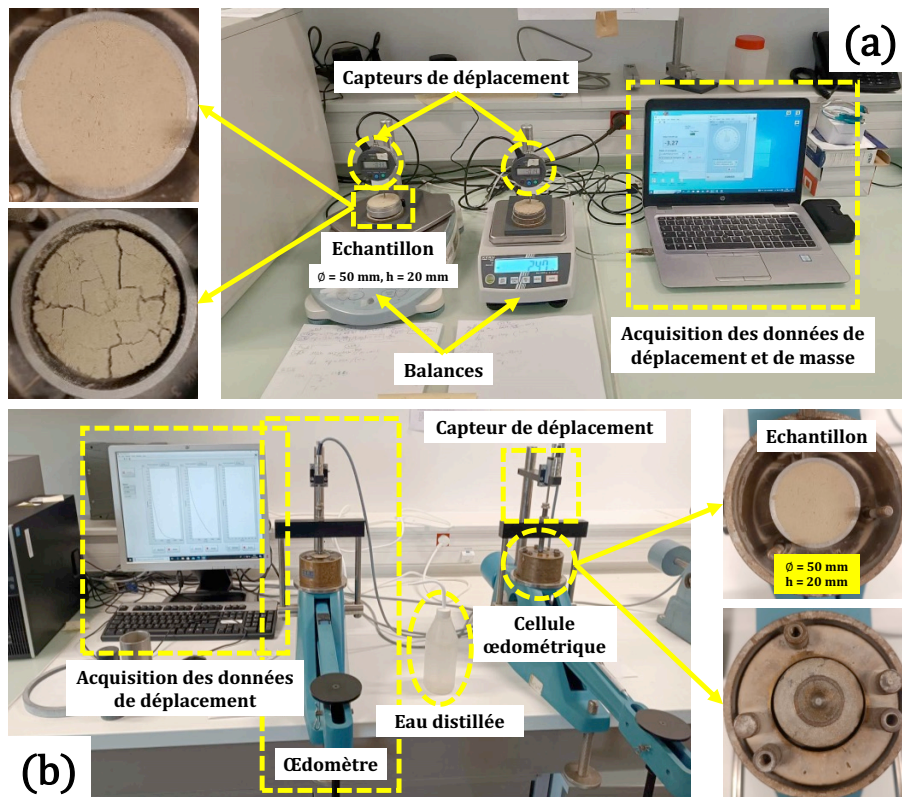


FIGURE 1. Dispositif de mesure des déformations axiales dues au (a) retrait et au (b) gonflement

- Mesure des déformations volumiques

À la fin de chaque phase de séchage, une photographie de la surface supérieure de l'échantillon a été prise. La surface a ensuite été mesurée à l'aide du logiciel Image-J, en ajustant l'échelle de l'image au diamètre connu de la bague (50 mm). Les images ont été converties en format binaire,

ce qui permet de mettre en évidence les zones rétrécies de l'échantillon tout en distinguant les fissures ou les vides. L'incertitude associée à ce processus de binarisation est estimée à 5%. À la fin des phases d'humidification, la surface de l'échantillon est supposée identique à celle de la bague (19.6 cm²), puisque le sol remplit complètement la bague.

La hauteur de l'échantillon, mesurée en continu tout au long des cycles de séchage et d'humidification, est ensuite combinée avec les mesures de surface, réalisées à l'aide du logiciel Image-J, pour calculer le volume de l'échantillon. Cette méthode repose sur l'hypothèse que la surface rétrécie mesurée en haut de l'échantillon représente uniformément la section transversale sur toute la hauteur. L'incertitude liée à cette hypothèse a été estimée à environ 4%.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Sans traitement à la nano-silice

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre l'état des échantillons après chaque cycle de retrait-gonflement, en incluant les versions binarisées, traitées avec le logiciel Image-J pour la mesure des surfaces en fin de phase de séchage. À partir du deuxième cycle, des fissures visibles ont commencé à se former dans les échantillons, avec une tendance à s'élargir au fil des cycles. Pour quantifier ces évolutions, le TABLEAU 4 présente la surface totale des fissures observées à la fin de la phase de séchage (correspondant aux zones noires sur les images binarisées), ainsi que le pourcentage de fissuration, défini comme le rapport entre la surface fissurée et la surface totale de l'échantillon. La bentonite a présenté la plus grande surface de fissures, suivie par le sol d'Esnandes, tandis que le sol de Sarlat a affiché la surface fissurée la plus faible.




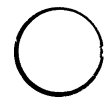
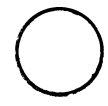





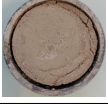


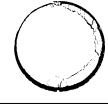
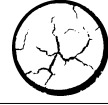







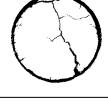













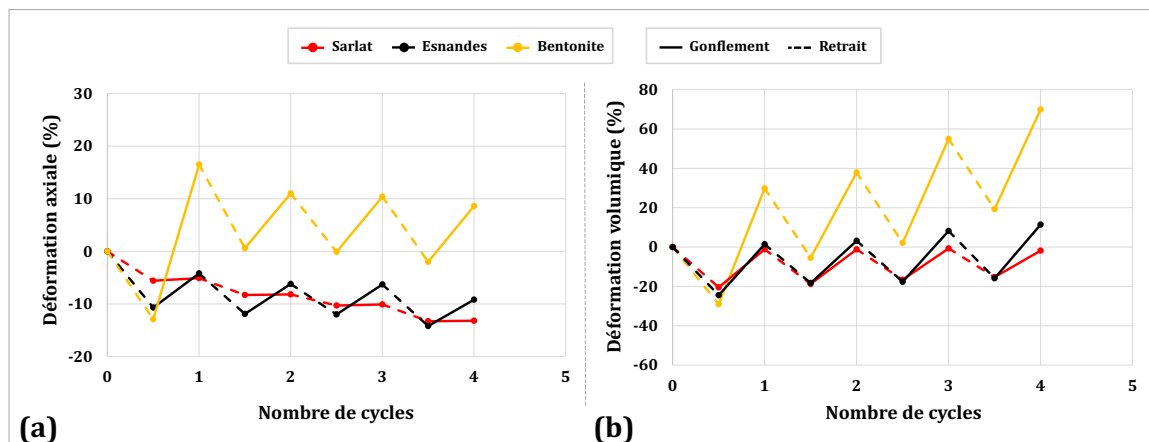
	Retrait						Gonflement		
	Images originales			Images binaires			Sarlat	Esnandes	Bentonite
	Sarlat	Esnandes	Bentonite	Sarlat	Esnandes	Bentonite			
Cycle 1									
Cycle 2									
Cycle 3									
Cycle 4									

FIGURE 2. Etat des sols étudiés au cours des cycles de séchage-humidification

TABLEAU 4. Surface et pourcentage de fissures au cours des cycles de séchage pour les sols étudiés

	Sarlat		Esnandes		Bentonite	
	S _{fissures} (cm ²)	% fissuration	S _{fissures} (cm ²)	% fissuration	S _{fissures} (cm ²)	% fissuration
Cycle 1	3.1	16	3.0	15	3.6	19
Cycle 2	2.9	15	2.5	13	4.5	23
Cycle 3	2.6	14	3.1	16	5.4	28
Cycle 4	2.3	12	3.4	17	5.2	27

La déformation axiale des échantillons est représentée par la variation de hauteur observée lors des phases de retrait ou de gonflement. Elle est calculée en pourcentage comme la variation de hauteur entre le début et la fin de chaque cycle de retrait-gonflement. La FIGURE 3 illustre l'évolution cumulée des déformations axiales et volumiques au cours des cycles pour les échantillons étudiés. La Bentonite subit les plus fortes déformations en raison de sa grande capacité d'absorption d'eau. Esnandes, avec une teneur élevée en matière organique, présente des variations modérées, tandis que Sarlat, dominé par la kaolinite, affiche les plus faibles déformations, son minéral peu gonflant limitant le retrait et le gonflement. Les déformations axiales ont montré une tendance à la diminution au fil des cycles. Dès le deuxième cycle, une stabilisation des déformations axiales est observée, en accord avec les études sur les sols expansifs soumis à des cycles de séchage-humidification menées par Tripathy et al. (2002); Yigzaw (2009) et Estabragh et al. (2015). L'analyse des déformations volumiques montre que les déformations surfaciques sont systématiquement plus importantes que les déformations axiales.

**FIGURE 3.** Déformations (a) axiales et (b) volumiques cumulées au cours des cycles pour les sols étudiés

La FIGURE 4 présente les courbes de retrait et de gonflement des trois sols étudiés, mettant en évidence des comportements distincts au cours des cycles hydriques. Lors du retrait, deux phases sont observées : une phase initiale de contraction importante due à la perte d'eau, suivie d'une stabilisation une fois la limite de retrait atteinte. Pour Sarlat, une légère réduction de déformation après cette limite pourrait s'expliquer par un réarrangement des particules ou l'apparition de

microfissures. Dans certains cycles (notamment pour Esnandes et Bentonite au cycle 4), les teneurs en eau massiques atteignent des valeurs très faibles, tandis que d'autres conservent une teneur résiduelle plus élevée. Cela s'explique par le protocole expérimental : chaque phase de séchage est limitée à 5 jours, durée à laquelle la déformation tend à se stabiliser, mais la teneur résiduelle varie selon la structure du sol et son évolution au fil des cycles. Concernant le gonflement, deux phases sont également identifiées : un gonflement primaire rapide correspondant à la fermeture des fissures formées lors du séchage, suivi d'un gonflement secondaire plus progressif, lié à la réorganisation interne du sol jusqu'à stabilisation. Les courbes de retrait et de gonflement sont exprimées en pourcentage de déformation, calculé par rapport à l'état initial de chaque cycle, et non par rapport à l'état initial de l'essai.

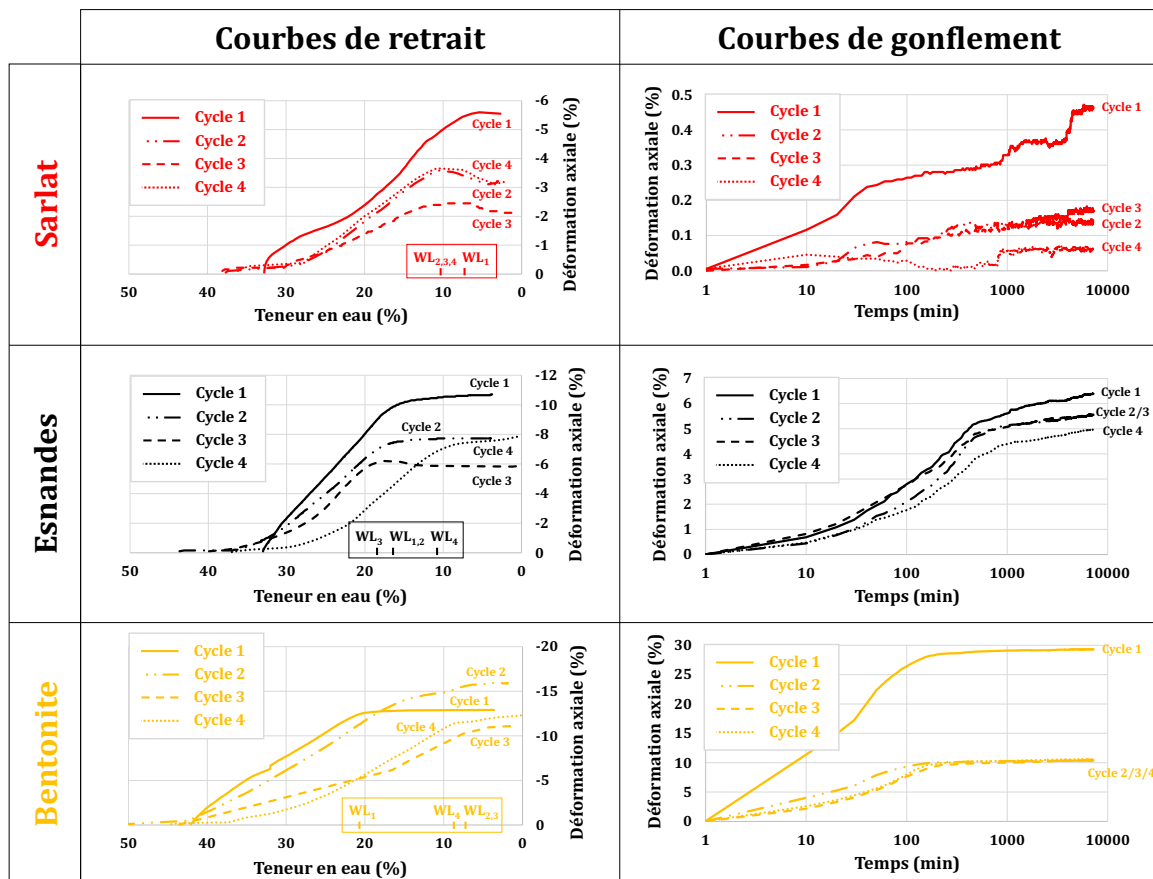


FIGURE 4. Courbes de retrait et de gonflement des sols étudiés au cours des cycles, exprimées en pourcentage de déformation relative à l'état initial de chaque cycle.

B. Avec traitement à la nano-silice : cas de la Bentonite calcique

La FIGURE 55 illustre l'évolution de la déformation volumique en fonction du pourcentage de nano-silice (NS) pour chaque cycle. Les valeurs des déformations volumiques sont calculées par rapport à l'état initial de chaque cycle, et non par rapport à l'état initial de l'essai. Lors du premier cycle, l'ajout de NS entraîne une réduction significative des déformations, particulièrement avec 20% de NS, où le retrait est diminué de 45% et le gonflement de 55%. Lors du deuxième cycle,

l'effet stabilisant se poursuit avec une réduction plus modérée : 23% pour le retrait et 12% pour le gonflement à 20% NS. À partir du troisième cycle, la réduction tend à se stabiliser, et au quatrième cycle, l'effet de la NS atteint une limite avec des réductions plus faibles. L'effet stabilisant semble plus marqué avec 4% de NS qu'avec 10%. Cette tendance peut être due à une dispersion non homogène de la NS dans le sol ou à une saturation partielle des sites d'adsorption à ce dosage intermédiaire, limitant son efficacité. Avec l'augmentation des cycles, l'effet de la nano-silice diminue. Initialement, la NS favorise la floculation et la formation d'un gel silicaté qui comble les vides, limitant le retrait et le gonflement. Toutefois, avec les cycles, la structure du sol se stabilise naturellement, réduisant la mobilité de l'eau et l'impact supplémentaire de la NS (Shahsavani et al., 2020).

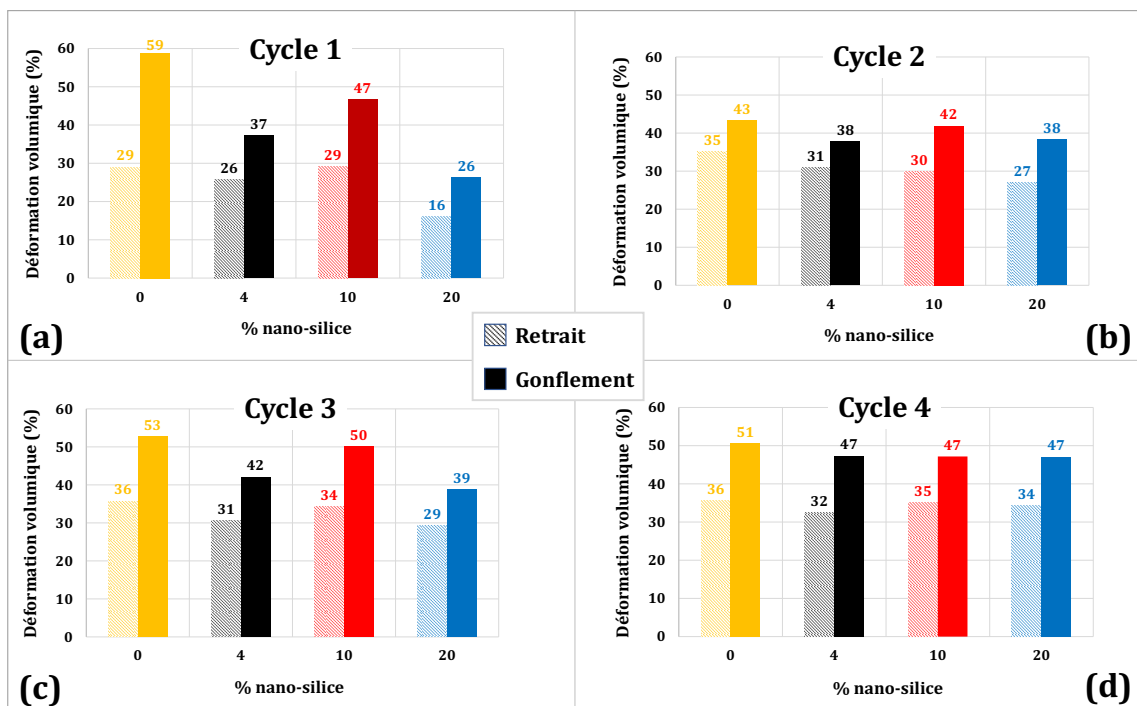


FIGURE 5. Evolution de la déformation volumique en fonction du pourcentage de NS au fil des cycles

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les observations au microscope électronique à balayage (MEB) de la Bentonite calcique avant et après traitement avec 10% de nano-silice (NS). Avant traitement, la structure microscopique révèle des vides dispersés, tandis qu'après ajout de NS, ces vides sont partiellement comblés, et une floculation commence à se former, renforçant la cohésion du sol.

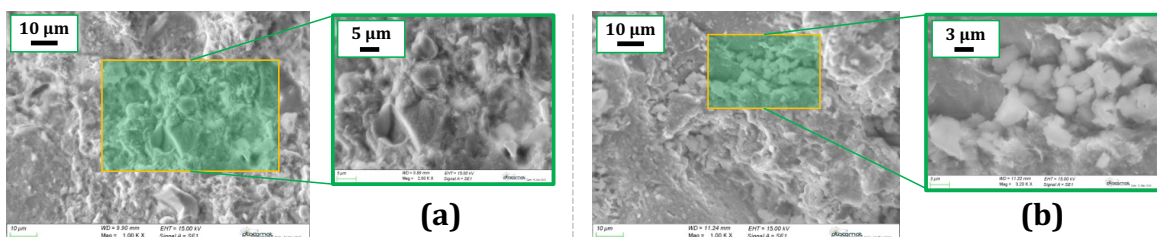


FIGURE 6. Observations au MEB de la Bentonite : (a) sans traitement et (b) après traitement avec 10% NS

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude examine l'effet des cycles de séchage-humidification sur le retrait-gonflement de deux sols sous-chaussée (Sarlat et Esnandes) ainsi que d'une bentonite calcique industrielle, tout en évaluant l'efficacité de la stabilisation chimique à la nano-silice. Les résultats montrent que la Bentonite, contenant de la montmorillonite, présente les plus fortes déformations volumiques en raison de sa capacité de rétention d'eau. Sarlat, majoritairement composé de kaolinite, affiche des variations plus faibles en raison de sa faible aptitude au gonflement. Esnandes, avec une teneur élevée en matière organique et une fraction argileuse incluant de la montmorillonite, présente des déformations intermédiaires, illustrant l'influence combinée de ces facteurs sur son comportement hydrique. L'analyse des déformations volumiques a mis en évidence que les variations de surface jouent un rôle majeur dans l'évolution des sols sous sollicitations hydriques. Tous les sols ont montré une stabilisation progressive dès le troisième cycle, suggérant une adaptation structurelle aux cycles répétés. L'ajout de nano-silice a significativement réduit les déformations, en particulier avec un dosage de 20%, où la réduction du retrait atteint 45% et celle du gonflement 55% dès le premier cycle. Toutefois, l'efficacité de la nano-silice tend à diminuer avec les cycles, indiquant que la stabilisation structurelle du sol limite progressivement son impact.

Ces résultats ouvrent des perspectives pour l'amélioration des traitements stabilisants appliqués aux sols expansifs. Des recherches futures pourraient explorer l'optimisation des dosages de nano-silice et son interaction avec d'autres stabilisants, tout en intégrant des conditions de charge mécanique pour simuler des environnements réels. Le développement de protocoles expérimentaux avancés, notamment via des essais couplés en œdométrie et des analyses microstructurales détaillées, permettrait de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents et d'adapter les traitements aux contraintes des infrastructures exposées aux cycles hydriques.

REFERENCES

- Bahmani, S.H., Huat, B.B.K., Asadi, A., Farzadnia, N., 2014. Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement. *Construction and Building Materials* 64, 350–359.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.086>
- Changizi, F., Haddad, A., 2017. Improving the geotechnical properties of soft clay with nano-silica particles. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement* 170, 62–71.
<https://doi.org/10.1680/jgrim.15.00026>
- Estabragh, A.R., Parsaei, B., Javadi, A.A., 2015. Laboratory investigation of the effect of cyclic wetting and drying on the behaviour of an expansive soil. *Soils and Foundations* 55, 304–314.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.02.007>
- 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.
- Goodarzi, A.R., Akbari, H.R., Salimi, M., 2016. Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume. *Applied Clay Science* 132–133, 675–684.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.023>
- Iler, R.K., 1979. *The chemistry of silica, Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry* 866.

- Kalkan, E., 2011. Impact of wetting–drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume. *Applied clay science* 52, 345–352.
- Kherad, M.K., Vakili, A.H., Bin Selamat, M.R., Salimi, M., Farhadi, M.S., Dezh, M., 2020. An experimental evaluation of electroosmosis treatment effect on the mechanical and chemical behavior of expansive soils. *Arab J Geosci* 13, 260. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5266-3>
- Noll, M.R., Bartlett, C., Dochat, T.M., 1992. In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica, in: *Proceeding of the Sixth National Outdoor Action Conference on Aquifer Restoration, Ground Water Monitoring, and Geophysical Method*, National Ground Water Association. pp. 443–457.
- 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>
- Shang, Y., Fu, Y., 2018. Experimental study of the mechanical properties of expansive soil with added nanomaterials. *Arab J Geosci* 11, 180. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3518-2>
- 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>
- Tawfiq, S., Nalbantoglu, Z., 2009. Swell-shrink behavior of expansive clays.
- Tripathy, S., Rao, K.S., Fredlund, D.G., 2002. Water content - void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils. *Can. Geotech. J.* 39, 938–959. <https://doi.org/10.1139/t02-022>
- Wang, Q., Tang, A.M., Cui, Y.-J., Delage, P., Barnichon, J.-D., Ye, W.-M., 2013. The effects of technological voids on the hydro-mechanical behaviour of compacted bentonite–sand mixture. *Soils and Foundations* 53, 232–245.
- Yigzaw, Z.G., 2009. Analyse des processus de retrait-gonflement de sols argileux en réponse à des sollicitations hydriques cycliques : rôle de la microstructure (phdthesis). École Nationale Supérieure des Mines de Paris.