

Durabilité et comportement différé des mélanges sol-ciment sous sollicitations hydromécaniques dans les ouvrages de soutènement

Durability and time-dependent behavior of soil–cement mixtures under hydromechanical solicitations in retaining structures

Marissabelle MRAD^{1*}, Olivier CUISINIER¹, Fabien FANCELLI², Farimah MASROURI¹

1 LEMTA, Université de Lorraine, CNRS, F-54000 Nancy, France

2 Fayat Fondations, 91350 Grigny, France

**marissabelle.mrad@univ-lorraine.fr*

RESUME : La technique du Deep Soil Mixing (DSM) améliore les sols in situ par ajout direct de liants hydrauliques. Initialement utilisée pour le renforcement des sols, elle s'applique aujourd'hui aux ouvrages de soutènement grâce à son coût compétitif et son faible impact environnemental. Cependant, sa durabilité face aux sollicitations environnementales, telles que les cycles hydriques, reste peu étudiée. Cette étude évalue la durabilité des matériaux DSM soumis à des cycles humidification-séchage (H/S) et sollicitations mécaniques (M). Des éprouvettes, composées de limon des plateaux de la région parisienne et d'un ciment CEM III/C 32.5 N (150, 250, 400 kg/m³), ont été mises en cure 56 jours à 40 °C, puis soumises à des cycles de 12 j de séchage à 50% d'humidité relative suivis de 2 j d'immersion. Afin d'évaluer l'effet combiné du chargement mécanique et des variations hydriques (M et H/S), un dispositif expérimental spécifique a été conçu. L'éprouvette est placée dans une enceinte à hygrométrie contrôlée, une presse étant utilisée pour appliquer la charge axiale. L'humidité relative est contrôlée par un système utilisant une solution saline saturée. Un système de circulation permet de contrôler l'humidité au sein de l'enceinte qui est mesurée à l'aide d'un capteur. Les résultats révèlent une dégradation significative des éprouvettes à faible dosage cimentaire dès le premier cycle, les rendant inadaptées aux ouvrages permanents. Seules les formulations à 400 kg/m³ résistent efficacement aux cycles (H/S). Par ailleurs, en comparant le fluage en conditions endogènes (M) et les sollicitations couplées (M et H/S), des endommagements mécaniques ainsi qu'un taux et une vitesse de déformation plus élevés ont été observés pour (M et H/S), soulignant la nécessité d'intégrer ces effets dans les analyses de durabilité. Ces observations confirment l'influence conjointe (M et H/S) sur la pérennité des ouvrages.

ABSTRACT : The Deep Soil Mixing (DSM) technique improves in situ soils through the direct addition of hydraulic binders. Initially used for soil reinforcement, it is now applied to retaining structures due to its competitive cost and low environmental impact. However, its durability when exposed to environmental solicitations, such as moisture cycles, remains poorly investigated. This study assesses the durability of DSM materials subjected to wetting–drying (W/D) cycles and mechanical (M) solicitations. Specimens composed of silt from the Paris Basin and a CEM III/C 32.5 N cement (150, 250, 400 kg/m³) were cured for 56 days at 40 °C, then exposed to cycles of 12 days of drying at 50% relative humidity followed by 2 days of water immersion. To assess the combined effect of mechanical loading and moisture variations (M and W/D), a dedicated experimental setup was developed, allowing the application of a sustained axial load within a controlled-humidity chamber. Relative humidity was regulated using a saturated salt solution and monitored through a circulation system equipped with humidity sensors. The results show significant degradation of low-cement specimens from the first cycle, making them unsuitable for permanent structures. Only the 400 kg/m³ mixtures effectively withstand the (W/D) cycles. Furthermore, by comparing creep under endogenous conditions (M) and coupled solicitations (M and W/D), mechanical damage and higher strain magnitude and rate were observed for (M and W/D), highlighting the need to integrate these effects into durability analyses. These findings confirm the combined influence (M and W/D) on the long-term performance of structures.

Mots-clés : Deep Soil Mixing DSM ; Cycles humidification/séchage ; Fluage ; Durabilité.

1 INTRODUCTION

Développée dans les années 1960 au Japon et dans les pays nordiques, la technique du Deep Soil Mixing (DSM) a progressivement évolué d'une méthode d'amélioration des sols vers une véritable solution structurelle. Cette évolution s'accompagne d'exigences accrues en termes de performances mécaniques et de durabilité. Celles-ci incluent une résistance et une rigidité suffisantes, un contrôle maîtrisé des déformations, ainsi qu'un comportement satisfaisant à long terme sous chargements permanents. Au cours de leur vie en service, les parois en DSM sont exposées à des sollicitations environnementales variables, en particulier des fluctuations d'humidité et des sollicitations mécaniques. Ces actions combinées constituent des facteurs majeurs des déformations différées et de la dégradation mécanique des matériaux cimentaires, effets d'autant plus marqués que le matériau présente une porosité élevée.

Les matériaux sol-ciment issus du DSM se caractérisent en effet par une porosité importante, généralement comprise entre 25 % et 65% selon la nature du sol, la formulation du mélange et les conditions de cure, soit jusqu'à un ordre de grandeur supérieur à celui des bétons conventionnels (Denies et al., 2012; Helson, 2017). Cette porosité élevée accroît leur sensibilité aux variations hydriques et aux phénomènes de fluage (Brooks, 2005; Helson et al., 2018).

Bien que plusieurs études aient évalué la durabilité des matériaux de soil mixing soumis à des cycles hydriques (Amrioui, 2023; Helson et al., 2018), très peu de travaux se sont intéressés à leur comportement mécanique sous des sollicitations hydriques et mécaniques couplées, représentatives des conditions réelles in situ. En conséquence, le comportement mécanique à long terme des matériaux DSM soumis à des cycles humidification-séchage en présence d'un chargement mécanique demeure largement méconnu et nécessite d'être approfondi afin de valider leur pérennité en tant que solutions structurelles.

Dans ce contexte, le programme expérimental développé dans cette étude vise à caractériser (i) la dégradation mécanique du matériau sol-ciment soumis à des sollicitations environnementales, et (ii) l'évolution des déformations différées d'éprouvettes exposées à des cycles humidification-séchage (H-S) couplés à un chargement mécanique soutenu (M). Il s'appuie dans un premier temps sur l'analyse de l'influence du dosage en ciment et du nombre de cycles hydriques sur le comportement mécanique d'un limon traité, en considérant la dégradation de la rigidité comme indicateur de l'endommagement. Dans

un second temps, une approche comparative est mise en œuvre afin de dissocier l'effet des cycles hydriques sur l'endommagement du matériau de leur interaction avec un chargement mécanique maintenu, en analysant l'évolution des déformations différées en conditions hydriques seules et sous sollicitations hydromécaniques couplées.

2 METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

2.1 Matériaux d'étude

Le sol sélectionné pour cette étude est le *Limon des Plateaux* (LP), prélevé dans la partie nord-est de Paris. Ses propriétés de base sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Propriétés de base du sol étudié

Propriétés	Valeur
Limite de liquidité (%)	36,8
Limite de plasticité (%)	22,5
Indice de plasticité (%)	14,3
Masse volumique des grains (Mg/m ³)	2,65
Particules < 63 μm (%)	95
Valeur au bleu de méthylène (VBS)	2,8

Le liant utilisé est un ciment à base de laitier, CEM III/C 32.5 N – SR CE PM NF, fourni par ROMBAS Heidelberg Materials. Il contient 15 % de clinker et 85 % de laitier granulé de haut-fourneau (GGBFS), majoritairement vitreux (99 %). Conformément à la norme NF EN 196-1, 2016, des essais préliminaires ont montré qu'au 7^e jour, ce ciment développe 95 % de la résistance normalisée.

Le sol LP a été traité avec trois dosages en ciment de 150, 250 et 400 kg/m³ correspondant aux formulations LP 150, LP 250 et LP 400. Ces dosages ont été définis sur la base des recommandations de (Bruce et al., 2013; Denies and Huybrechts, 2018).

Une étude paramétrique a ensuite été menée afin de déterminer la teneur en eau optimale de chaque mélange, de manière à obtenir une ouvrabilité représentative des conditions in situ tout en évitant le ressuage du matériau. Une approche de type mortier a été adoptée : l'ouvrabilité a été évaluée à l'aide d'un mini-cône d'Abrams, en mesurant l'étalement après 15 chocs sur une table à chocs, conformément à une méthode adaptée de la norme NF EN 1015-3, 1999. Sur cette base, une teneur en eau totale $w_{Tot} = 48$ % a été

retenue, correspondant à un étalement cible de 25 ± 2 cm.

La préparation consistait à homogénéiser manuellement le sol et le ciment, puis à ajouter l'eau dans un malaxeur tournant à 60 tr/min pendant 10 minutes. Le matériau frais était placé dans des moules cylindriques (100×50 mm) en trois couches compactées par tapotement. Les éprouvettes ont été mises en cure à 40°C pendant 56 jours. Ce protocole, basé sur une étude préalable, est équivalent à environ 180 jours de cure à 20°C et permet d'accélérer le développement de la résistance tout en conservant les caractéristiques mécaniques du matériau (Escalante-García and Sharp, 1998).

La porosité accessible à l'eau (n) et la masse volumique sèche (ρ_a) ont été mesurées après 56 jours de cure selon la norme béton NF P18-459,2022. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Propriétés physiques des éprouvettes

Mélange	n (%)	ρ_a (Mg/m ³)
LP 150	$53 \pm 0,9$	1,21
LP 250	$48,7 \pm 0,51$	1,27
LP 400	$46,3 \pm 0,03$	1,30

2.2 Description des protocoles expérimentaux

La phase expérimentale se déroule en deux étapes complémentaires. La première vise à évaluer l'endommagement mécanique induit par les cycles H-S. La seconde a pour objectif d'étudier la performance à long terme du matériau soumis à des sollicitations couplées H-S et M, représentatives des conditions rencontrées par un ouvrage en service.

2.2.1 Impact des cycles H-S

2.2.1.1 Conditions environnementales imposées

Le choix de cycles réalistes d'humidification-séchage (H/S) est essentiel pour évaluer la durabilité des matériaux cimentaires. Le taux de séchage dépend à la fois des propriétés internes du matériau (porosité, tortuosité, microfissures) et des conditions environnementales telles que la température et l'humidité relative. Dans la littérature, divers protocoles de cycles H/S accélérés sont proposés afin d'évaluer la durabilité des matériaux ; ces cycles visent notamment à modéliser les variations saisonnières du niveau de la nappe phréatique et l'exposition directe à l'environnement rencontrées in situ. Toutefois, de nombreuses études s'accordent sur le fait que les conditions sévères imposées par la norme ASTM D559, 2023 ne reproduisent pas fidèlement l'exposition réelle des matériaux sur le terrain

(Amrioui, 2023; Chabrat, 2024; Helson et al., 2018). Ainsi, de nombreux chercheurs recommandent l'utilisation de cycles plus modérés, considérés comme plus représentatifs des environnements naturels auxquels sont soumis les ouvrages en sol traités par DSM.

Dans cette étude, le cycle H-S choisi s'appuie sur ces recommandations et sur le climat français, caractérisé par une humidité relative annuelle moyenne d'environ 50 %. La phase de séchage est réalisée pendant 12 jours dans une enceinte climatique contrôlée à 20°C et 50 % d'humidité relative. La phase d'humidification consiste en une immersion complète du matériau pendant 2 jours à 20°C , durée nécessaire pour atteindre une masse stable correspondant à un état optimal de saturation.

Les performances mécaniques ont été mesurées sur le matériau de référence non altéré, puis après N cycles, avec $N = 1, 3$ et 6 , afin de suivre l'évolution progressive du comportement sous des sollicitations environnementales répétées. Un suivi visuel systématique a également été réalisé.

2.2.1.2 Caractérisation mécanique des éprouvettes

La résistance en compression simple (R_c) est déterminée sur des éprouvettes cylindriques ($\Phi = 50$ mm, $h = 100$ mm), préalablement poncées afin d'obtenir des faces planes et parallèles. Les essais sont réalisés au moyen d'une machine d'essai universelle de capacité maximale de 50 kN, conformément à la norme NF EN 13286-41, 2021. Une vitesse de déplacement constante de 1,0 mm/min est imposée, de manière à provoquer la rupture des éprouvettes dans un intervalle compris entre 30 s et 120 s, tel que prescrit par la norme. Pour chaque formulation (LP 150, LP 250 et LP 400) et pour chaque nombre de cycles d'humidification-séchage prédéfinis, deux éprouvettes sont testées afin de garantir la répétabilité des résultats.

Le comportement contrainte-déformation du matériau non altéré est analysé à l'aide d'un dispositif instrumenté combinant un capteur global de déplacement et deux capteurs locaux verticaux, permettant une mesure directe de la déformation axiale. Le protocole suit la norme NF EN 12390-13, 2021. Chaque essai débute par trois cycles de préconditionnement entre une contrainte de précharge $\sigma_p = 0,5$ MPa et une contrainte inférieure σ_b correspondant à 20 % de la résistance R_c , afin d'assurer le bon alignement des éprouvettes et la stabilité des mesures. Ensuite, un chargement cyclique est appliqué entre σ_b et une contrainte supérieure $\sigma_a = R_c/3$, avec un maintien de charge inférieur à 20 s à chaque palier. Le module élastique est extrait de ces cycles : le module sécant initial est déterminé lors du

premier cycle, tandis que le module stabilisé est obtenu au troisième cycle.

Pour les éprouvettes ayant subi des cycles H/S, le même protocole de chargement est appliqué. Toutefois, seule la mesure issue du capteur global est utilisée pour l'analyse, en raison des difficultés d'adhérence des capteurs locaux sur des surfaces fissurées ou dégradées. L'effet de l'endommagement hydrique sur la rigidité du matériau est évalué à l'aide du paramètre d'endommagement mécanique défini par:

$$D = 1 - \frac{E_{Nx}}{E_0} \quad (1)$$

Où $0 < D < 1$, avec $D = 0$ caractérisant un matériau sain et $D = 1$ un matériau totalement endommagé. Le paramètre D est déterminé à partir du module sécant initial et du module sécant stabilisé, notés respectivement $D_{Ec,0}$ et $D_{Ec,s}$. Dans cette expression, E_{Nx} correspond au module sécant initial ou stabilisé mesuré après N cycles H-S, tandis que E_0 désigne le module sécant initial ou stabilisé du matériau de référence non altéré, déterminé à partir des mesures globales.

2.2.2 Impact des cycles H-S et sollicitations mécanique M

2.2.2.1 Dispositif d'essai

Afin d'évaluer la réponse à long terme des matériaux issus du DSM soumis simultanément à un chargement

mécanique soutenu et à des cycles hydriques, un dispositif expérimental spécifique a été développé Figure 1. Le système d'application des cycles hydriques s'inspire des dispositifs de circulation fermée utilisés pour l'imposition de la succion dans les essais triaxiaux et œdométriques sur des sols et des roches non saturés (Cunningham et al., 2003; Oldecop and Alonso, 2004).

Un flux d'air contrôlé est établi autour de l'éprouvette placée dans une cellule triaxiale en plexiglas modifiée afin d'imposer la phase de séchage. La pompe à vide assure l'aspiration de l'air préalablement conditionné dans un dessiccateur contenant une solution saline saturée de $Mg(NO_3)_2$, permettant de maintenir une humidité relative de 54 % à 20 °C. Un filtre pneumatique empêche la migration de particules salines vers l'éprouvette. Un capteur combiné de température et d'humidité (T, HR %) installé dans la cellule assure le suivi en continu des conditions hydriques appliquées.

La purge du piédestal triaxial est ensuite utilisée pour le remplissage en eau lors de la phase d'humidification. Enfin, une presse instrumentée permet d'appliquer une charge axiale constante et d'enregistrer les déformations verticales grâce à des capteurs de déplacement LVDT.

Ce système permet d'appliquer simultanément des sollicitations environnementales et mécaniques, garantissant une analyse réaliste et reproductible du comportement différé et de la durabilité du matériau.

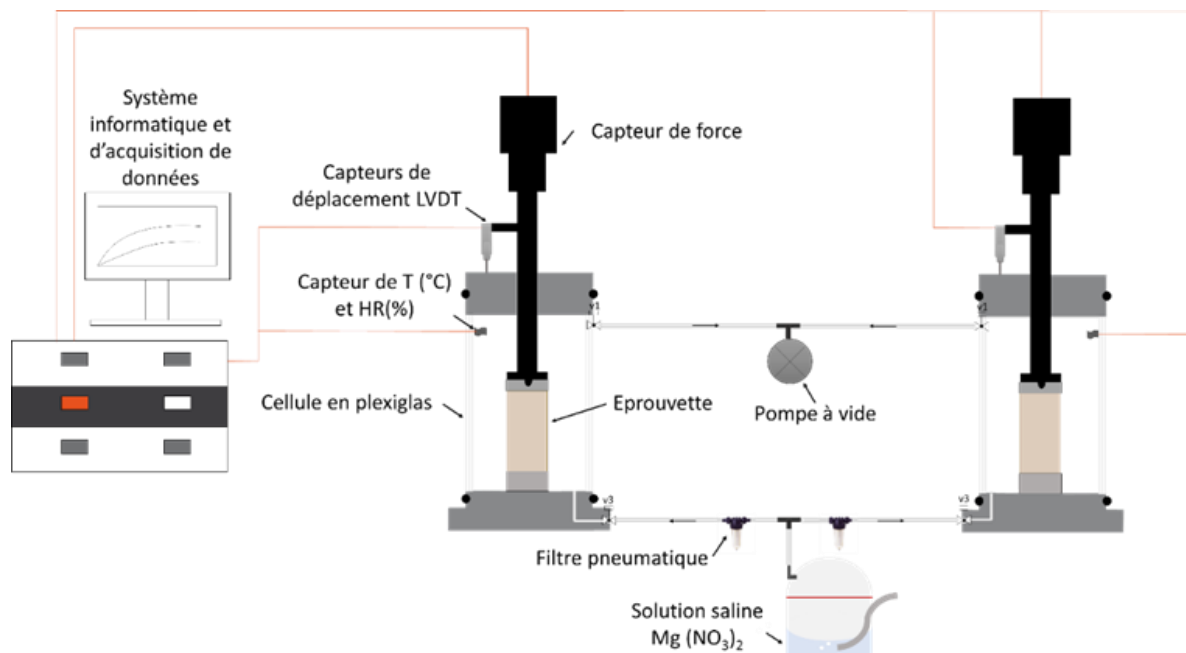


Figure 1: Schéma du dispositif développé

2.2.2.2 Validation du dispositif expérimental

Des essais préliminaires ont été réalisés afin de valider le dispositif expérimental. Une première vérification a consisté en une comparaison du séchage obtenu dans l'enceinte climatique (50 % HR, 20 °C) avec celui obtenu dans le dispositif développé. Pour cela, un conteneur d'eau distillée de mêmes dimensions a été soumis au séchage dans les deux systèmes, et la perte d'eau a été suivie au cours du temps. Le dispositif développé atteint environ 80 % de la vitesse de perte en eau observée dans l'enceinte climatique, confirmant

la pertinence du mécanisme de circulation d'air imposé.

La répétabilité du système a ensuite été évaluée en appliquant les mêmes sollicitations hydriques et mécaniques à deux éprouvettes identiques. Les résultats obtenus, déformations en fonction du temps au cours de cinq cycles H-S sont présentés Figure 2. La superposition des courbes confirme la reproductibilité du dispositif.

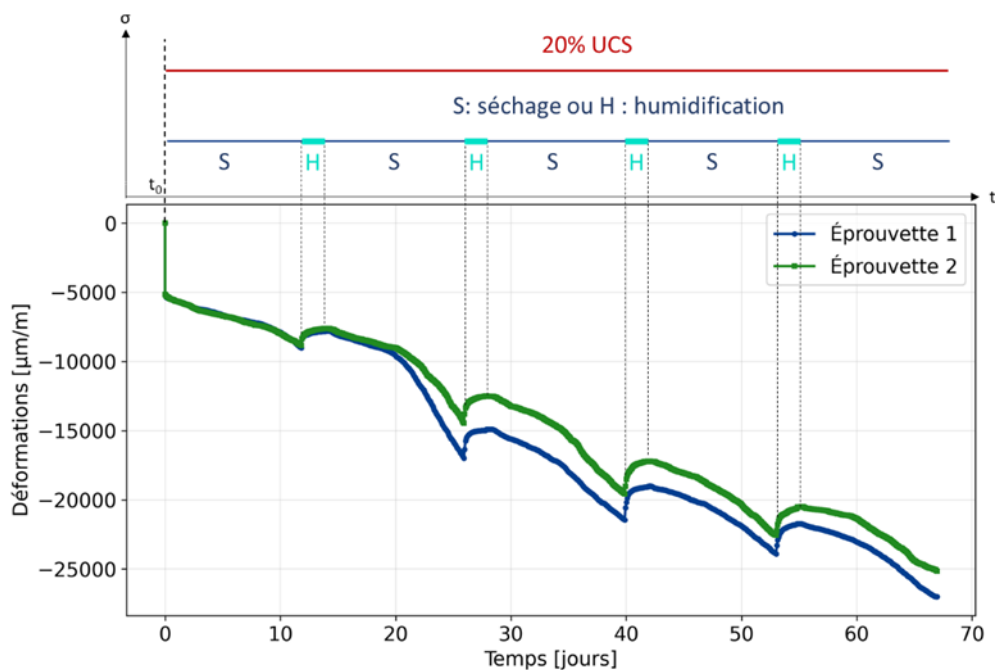


Figure 2: Essai de répétabilité sur LP 400

2.2.2.3 Conditions de sollicitation appliquées

Deux éprouvettes de la même formulation (LP 400) ont été soumises à deux modes de sollicitation : la première est soumise à un chargement mécanique constant égal à 20 % de R_c , valeur permettant de rester dans l'état de service du matériau et dans sa zone élastique linéaire, préalablement identifiée à partir d'essais mécaniques. Les échanges hydriques avec l'environnement sont empêchés par l'utilisation d'une membrane étanche. La seconde éprouvette est soumise simultanément à ce même chargement mécanique et à des cycles H-S accélérés. Chaque cycle comprend 12 jours de séchage, durant lesquels l'humidité relative diminue progressivement Figure 3, suivis de 2 jours d'humidification par immersion complète.

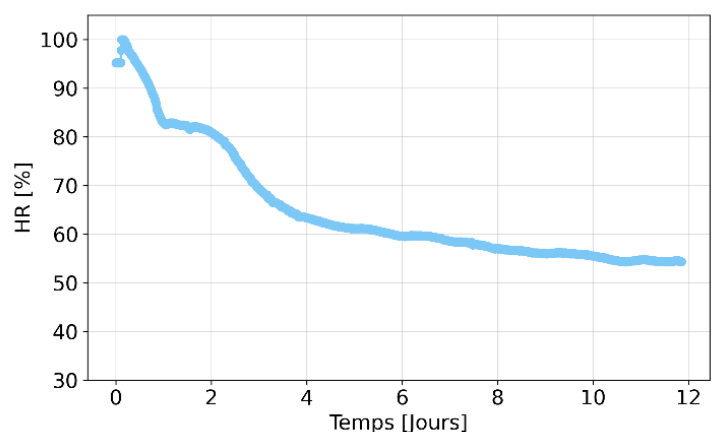


Figure 3: HR (%) imposée lors du séchage dans le dispositif développé

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Dégradation des matériaux DSM sous cycles H-S

Les observations visuelles Figure 4 mettent en évidence une fissuration marquée des éprouvettes à faible dosage en ciment, dont l'intensité augmente lorsque le dosage en liant diminue. Pour les mélanges LP 150 et LP 250, une perte de cohésion accompagnée d'un endommagement sévère, voire total, est observée dès le premier cycle H-S. À l'inverse, seul le mélange LP 400 a résisté au premier cycle, permettant la poursuite des essais sur plusieurs cycles afin d'étudier l'évolution progressive de l'endommagement.

Ces premiers résultats soulignent la forte sensibilité des sols fins, tels que le limon des plateaux traités en deep mixing, aux cycles hydriques, ainsi que leur faible durabilité lorsqu'ils sont faiblement dosés en liant. Ce comportement est principalement attribué à la porosité élevée des mélanges et à leur faible résistance en traction, ce qui limite leur capacité à supporter les sollicitations induites par les gradients hydriques développés lors des phases de séchage (Helson et al., 2018).

L'analyse de l'impact des cycles H-S sur les propriétés mécaniques du matériau LP 400 est réalisée à partir de l'évolution de la résistance à la compression simple (R_c) et de la rigidité. Les courbes contrainte-déformation issues des essais de compression simple Figure 5 mettent en évidence une diminution progressive de la résistance maximale avec l'augmentation du nombre de cycles H-S, accompagnée d'une modification du mode de rupture. Le matériau non altéré présente un comportement quasi fragile, tandis que les éprouvettes soumises aux cycles H-S développent un comportement de plus en plus ductile. Après six cycles H-S, la contrainte maximale mobilisable est réduite à environ 20 % de R_c . Ce niveau de contrainte correspond généralement au domaine de service du matériau.

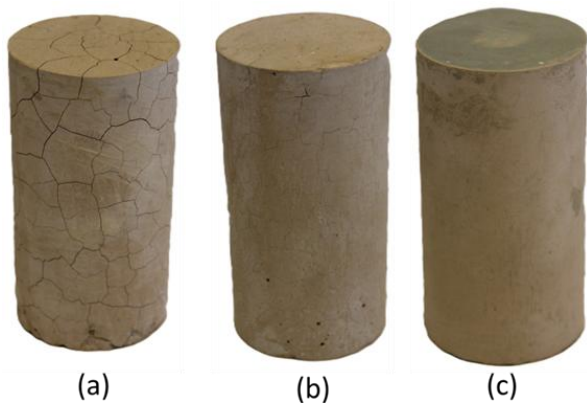


Figure 4: Aspect visuel des éprouvettes lors du premier séchage : (a) LP 150, (b) LP 250 et (c) LP 400

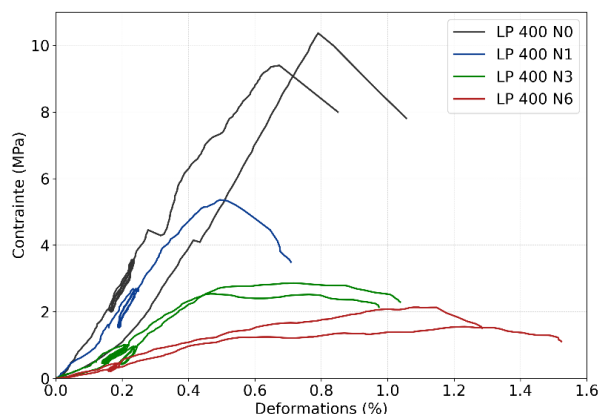


Figure 5 : Évolution des courbes contrainte-déformation du LP 400 en fonction du nombre de cycles H-S (0, 1, 3 et 6)

Le Tableau 3 présente l'évolution de l'indicateur d'endommagement mécanique D , déterminé à partir du module sécant initial et du module sécant stabilisé, ainsi que l'évolution du module sécant stabilisé résiduel, en fonction du nombre de cycles H-S. Dès le premier cycle H-S, une augmentation significative de l'endommagement est observée, accompagnée d'une diminution du module d'Young d'environ 17 %, passant de 6,96 à 5,79 GPa. Cette dégradation met en évidence la forte sensibilité du matériau aux variations hydriques, même pour un nombre limité de cycles. Après trois cycles H-S, l'endommagement s'accroît fortement, se traduisant par une chute marquée de la rigidité, de l'ordre de 50 % par rapport à l'état initial. En revanche, après six cycles H-S, l'évolution de l'endommagement tend vers un état quasi stabilisé. Le module sécant initial étant mesuré lors du premier chargement mécanique, il est particulièrement sensible à l'ouverture des microfissures induites par les cycles H-S, tandis que le module sécant stabilisé correspond à une réponse après accommodation du matériau. Néanmoins, l'écart observé entre l'endommagement associé au module sécant initial et celui associé au module sécant stabilisé constitue ainsi un indicateur pertinent de l'ouverture progressive de fissures induites par les cycles H-S. Cet écart s'amplifie avec l'augmentation du nombre de cycles H-S, traduisant une accumulation progressive de l'endommagement microstructural.

Tableau 3: Effet des cycles hydriques sur le module sécant stabilisé et l'endommagement mécanique

Nb. des cycles H-S	$D_{Ec,0}$	$D_{Ec,s}$	$E_{c,s}$ (GPa)
0	0,00	0,00	6,96
1	0,18	0,17	5,79
3	0,66	0,54	3,17
6	0,79	0,46	3,77

3.2 Effet des sollicitations couplées H-S et M sur le comportement différé

Le couplage des sollicitations d'humidification-séchage (H-S) et du chargement mécanique (M) est susceptible d'altérer significativement les propriétés mécaniques du matériau, constituant ainsi un risque potentiel pour la sécurité et la stabilité des ouvrages géotechniques. Le dispositif expérimental développé permet d'analyser l'impact de ces sollicitations combinées sur le comportement différé du matériau. La Figure 6 illustre l'évolution de la déformation axiale sous un chargement soutenu égal à 20 % de l'UCS, pour des éprouvettes soumises uniquement à un chargement mécanique (M) et pour des éprouvettes soumises à des sollicitations hydriques couplées à ce chargement (H-S + M).

L'éprouvette sollicitée uniquement mécaniquement présente des déformations limitées, caractérisées par une phase de fluage primaire suivie d'une phase de fluage secondaire, au cours de laquelle la vitesse de déformation devient quasi constante dans le temps. À l'inverse, l'essai hydrique-mécanique met en évidence des déformations nettement plus importantes dès la première phase de séchage, révélant la forte sensibilité du matériau aux variations hydriques et la nécessité de comprendre les évolutions dimensionnelles induites par ces cycles. L'accumulation progressive de déformations irréversibles au fil des cycles traduit un processus d'endommagement progressif, chaque cycle hydrique générant une déformation additionnelle. Après environ 75 jours, lors de la phase de séchage du sixième cycle, une accélération marquée des déformations est observée, correspondant à l'apparition du fluage

tertiaire. Cette instabilité conduit finalement à la rupture de l'éprouvette avant la phase d'humidification du sixième cycle hydrique. Ces résultats montrent que des instabilités à long terme peuvent se développer dans les matériaux DSM, même à des niveaux de contrainte correspondant à l'état de service, lorsque les variations hydriques sont couplées à un chargement mécanique soutenu.

4 CONCLUSION

Cette étude a permis de développer une méthode de caractérisation du comportement à long terme des matériaux issus du DSM, en vue de leur utilisation dans des structures de soutènement pérennes. Une première phase expérimentale a consisté à évaluer l'impact du nombre de cycles H-S sur la durabilité des performances mécaniques des éprouvettes, après l'imposition de ces cycles hydriques. Les essais réalisés sous sollicitations hydriques seules mettent en évidence une dégradation progressive de la résistance mécanique, la contrainte maximale mobilisable atteignant environ 20 % de la résistance en compression simple après six cycles H-S. Dans ce contexte, un dispositif expérimental original a été développé afin de combiner des cycles hydriques et un chargement mécanique maintenu, reproduisant des conditions proches de celles rencontrées in situ par les structures en soil mixing. Ce dispositif permet un suivi continu des variations dimensionnelles et de la dégradation du matériau sous sollicitations couplées. Il a été testé et validé, montrant une bonne reproductibilité des résultats.

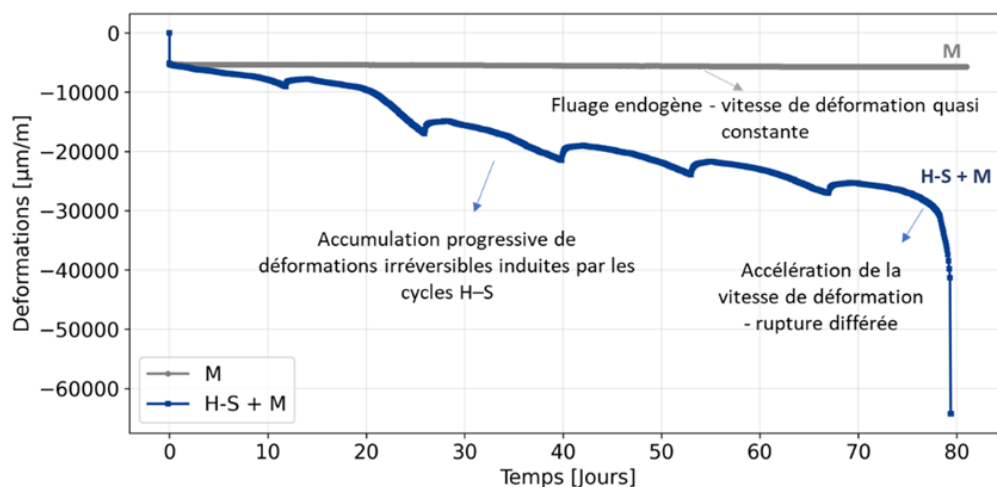


Figure 6: Évolution de la déformation axiale sous chargement mécanique constant (20 % UCS) : comparaison entre un essai mécanique seul (M) et un essai sous sollicitations hydriques et mécaniques couplées (H-S + M)

Les essais réalisés à l'aide de ce dispositif montrent qu'un niveau de contrainte égal à 20 % de R_c initiale,

généralement considéré comme admissible à l'état de service, peut néanmoins conduire à une rupture

différée après plusieurs cycles hydriques lorsqu'il est combiné à un chargement mécanique maintenu. Ces observations soulignent que la stabilité à long terme des matériaux DSM ne dépend pas uniquement de leur résistance résiduelle, mais également de l'évolution des déformations différées et de l'endommagement progressif induit par les cycles hydriques.

Ces résultats mettent ainsi en évidence que l'utilisation du DSM pour des structures de soutènement pérennes dans des sols fins soumis à des gradients hydrauliques importants nécessite la mise en place d'un suivi spécifique accru. Même pour des mélanges fortement dosés en liant (400 kg/m³), la durabilité mécanique du matériau apparaît insuffisante face aux sollicitations environnementales étudiées.

Dans la continuité de ce travail, une analyse approfondie du comportement différé et des variations dimensionnelles sous cycles hydriques seuls est en cours afin de mieux dissocier les mécanismes d'endommagement. Par ailleurs, de nouveaux mélanges, élaborés à partir d'un sol reconstitué en laboratoire composé de 50 % de limon des plateaux et de 50 % de sable de Moselle, avec différents dosages en ciment, seront étudiés afin d'évaluer leur durabilité sous sollicitations hydriques et mécaniques couplées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTM. D559 (2023). Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures, 2023.
- Amrioui, J., 2023. Vulnérabilité des digues au changement climatique: Approche multi-échelle pour l'étude du comportement à long terme des mélanges sol-ciment et effet des inclusions de sol non traité lors du processus de malaxage (thèse de doctorat). Université Gustave Eiffel.
- Brooks, J., 2005. 30-Year creep and shrinkage of concrete. *Magazine of Concrete Research - MAG CONCR RES* 57, 545–556. <https://doi.org/10.1680/macr.2005.57.9.545>
- Bruce, M.E.C., Turner-Fairbank Highway Research Center, Geotechnica, S., Inc, United States Federal Highway Administration Office of Transportation Management, 2013. *Federal Highway Administration design manual: deep mixing for embankment and foundation support*. McLean, VA.
- Chabrat, N., 2024. Impact des conditions environnementales sur le comportement à long terme de sols traités. (thèse de doctorat). Université de Lorraine.
- Cunningham, M.R., Ridley, A.M., Dineen, K., Burland, J.B., 2003. The mechanical behaviour of a reconstituted unsaturated silty clay. *Géotechnique* 53, 183–194. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.2.183>
- Denies, N., Huybrechts, N., 2018. *Handbook - Soil mix walls: Design and execution*, 1st ed.
- Denies, N., Huybrechts, N., De Cock, F., Lameire, B., Vervoort, A., Van Lysebetten, G., Maertens, J., 2012. SOIL MIX WALLS as retaining structures – mechanical characterization. Presented at the ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI, Brussels.
- Escalante-García, J.I., Sharp, J.H., 1998. Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in portland cements: part i, neat cements. *Cement and Concrete Research* 28, 1245–1257. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00115-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00115-X)
- Helson, O., 2017. Comportement thermo-hydro-mécanique et durabilité des bétons de sol: influence des paramètres de formulation et conditions d'exposition. (thèse de doctorat). UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE.
- Helson, O., Eslami, J., Beaucour, A.-L., Noumowe, A., Gotteland, P., 2018. Durability of soil mix material subjected to wetting/drying cycles and external sulfate attacks. *Construction and Building Materials* 192, 416–428.
- NF P18-459. (2022). Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique.
- NF EN 12390-13. (2021). Essais pour béton durci - Partie 13: détermination du module sécant d'élasticité en compression.
- NF EN 13286-41. (2021). Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41: méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des graves traitées aux liants hydrauliques.
- NF EN 1015-3. (1999). Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3: détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses).
- NF EN 196-1. (2016). Méthodes d'essais des ciments - Partie 1: détermination des résistances.
- Oldecop, L., Alonso, E., 2004. Testing rockfill under relative humidity control. *Geotechnical Testing Journal* 27, 269–278.