

Protocole expérimental pour l'évaluation de la durabilité des limons traités à la chaux et aux liants bas carbone sous sollicitations hydriques et mécaniques dans un contexte de changement climatique

Experimental protocol for assessing the durability of lime-treated silts with low-carbon hydraulic binders under hydraulic and mechanical solicitations in a climate-change context

Vincent KRZEWSKI^{1,2*}, Nathalie DUFOUR¹, Muriel GASC-BARBIER¹, Christophe CHEVALIER²,
Daniel BORSCHNECK³, Luc BOUTONNIER⁴, Thibault LANDEL⁵, Véronique BERCHE⁶

1 GéoCoD, Cerema, Aix-en-Provence, France

2 Univ Gustave Eiffel, GERS-SRO, Marne-la-Valée, France

3 EGIS, Seyssins, France

4 CEREGE, Aix-en-Provence, France

5 Cerema, Aix-en-Provence, France

6 CSNE, Comiègne, France

**vincent.krzewinski@cerema.fr*

RESUME : Le développement des infrastructures de transport contribue de manière significative aux émissions de gaz à effet de serre. Pour limiter leurs impacts, le recours au traitement des limons à la chaux et aux liants hydrauliques bas carbone est une solution courante. Toutefois la durabilité de cette solution face à des sollicitations mécaniques et hydriques répétées est encore mal connue et reste à caractériser, en particulier dans le contexte climatique futur. Dans ce cadre, cet article se concentre sur la présentation et la validation du protocole expérimental développé pour étudier ces mécanismes d'endommagement, en combinant des sollicitations hydriques et mécaniques ainsi que des outils d'analyse avancée en vue de proposer à terme un indicateur d'endommagement des limons traités. Pour cela, huit éprouvettes stabilisées avec 1 % de chaux et 5 % de CEMIII/A seront reconstituées en laboratoire puis mises en cure durant 180 jours. Quatre scénarii hydriques seront envisagés pendant cette cure : (1) éprouvette non immergée en permanence, (2) et (3) éprouvette immergée par intermittence (scenarii intermédiaires), (4) éprouvette immergée en permanence (scenarii extrêmes). Les scenarii (2) et (3) seront définis à partir des précipitations caractéristiques et plausibles, en lien avec les différents niveaux de réchauffement climatique prévus dans une zone géographique d'intérêt. Les éprouvettes seront ensuite soumises à des cycles mécaniques répétés (jusqu'à 1 000 000). L'évolution de la fissuration sera suivie par tomographie à rayon X, une technique permettant une observation interne non-destructive de l'endommagement. Cette démarche constitue une étape de validation méthodologique préalable à l'obtention et à l'analyse de résultats expérimentaux futurs sur la durabilité et la résilience des ouvrages en terre dans un contexte de changement climatique.

ABSTRACT: The development of transport infrastructure contributes significantly to greenhouse gas emissions. To limit their impacts, treating silts with lime and low-carbon hydraulic binders is a common solution. However, the durability of this approach under repeated mechanical and hydraulic stresses is still poorly understood, particularly in the current climatic context, and remains to be characterized. In this context, the article focuses on presenting and validating the experimental protocol developed to investigate these damage mechanisms, by combining hydraulic and mechanical loadings with advanced analytical tools, with the aim of ultimately proposing a damage indicator for treated silts. For this purpose, eight samples stabilized with 1% lime and 5% CEM III/A will be reconstituted in the laboratory and cured for 180 days. Four hydraulic scenarios will be considered during curing: (1) samples not permanently immersed, (2) and (3) samples intermittently immersed (intermediate scenarios), (4) samples permanently immersed (extreme scenarios). Scenarios (2) and (3) will be defined based on characteristic and plausible precipitation patterns, linked to different projected levels of climate

warming in a specific area of interest. The samples will then be subjected to repeated mechanical cycles (up to 1,000,000). The evolution of cracking will be monitored using X-ray tomography, a non-destructive internal observation technique for assessing damage. This approach constitutes a methodological validation step prior to the acquisition and analysis of future experimental results on the durability and resilience of earthen structures in a climate-change context.

Mots-clés: Limons traités; Durabilité; Sollicitations hydriques et mécaniques; Tomographie à rayons X; Changement climatique.

1 INTRODUCTION

Le développement des infrastructures de transport constitue un enjeu central pour répondre aux besoins croissants de mobilité des territoires. Toutefois, leur construction et leur entretien s'accompagnent de pressions environnementales significatives, notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Dans cette perspective, le recours à des solutions favorisant à la fois la valorisation des matériaux locaux et la réduction de l'empreinte carbone apparaît incontournable.

Parmi les solutions techniques existantes, le traitement des sols fins à l'aide de chaux et de liants hydrauliques constitue une pratique courante et efficace (LCPC/SETRA 2007). Cette technique permet d'améliorer la portance, la stabilité et la résistance des sols en place initialement peu performants mécaniquement, favorisant ainsi leur réutilisation dans les ouvrages (Bell, 1996; Preteseille and Lenoir, 2015). Elle contribue également à réduire le recours à des matériaux importés et à limiter les transports, répondant ainsi aux objectifs de développement durable fixés dans les politiques d'aménagement. Le recours à des liants hydrauliques à faible teneur en clinker, tels que les ciments de type CEM III, renforce l'intérêt environnemental de cette solution en diminuant les émissions de CO₂ associées à leur fabrication.

Toutefois, malgré les avantages des sols traités, leur durabilité à long terme reste encore mal connue. Si l'amélioration mécanique à court terme est bien établie, le comportement de ces matériaux au cours du temps demeure incertain, notamment lorsqu'ils sont soumis à des chargements variables. En effet, les sols traités peuvent être exposés à des sollicitations mécaniques répétées, telles que celles induites par le trafic routier ou ferroviaire, mais également à des sollicitations environnementales, comme des cycles d'humidification et de séchage à faible profondeur, ou les variations du niveau de la nappe à plus grande profondeur. Ces sollicitations successives ou simultanées pourraient provoquer des phénomènes de fatigue et d'endommagement progressif, responsables d'une dégradation des propriétés mécaniques initiales du matériau. Comprendre ces processus et leurs

interactions constitue un enjeu clé pour améliorer la durabilité des ouvrages et fiabiliser leur conception.

Le contexte actuel de changement climatique vient accentuer cette problématique. L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes, épisodes de précipitations intenses, périodes de sécheresse prolongée, fluctuations rapides du régime hydrique exposent les ouvrages en terre et en sols traités à des conditions plus sévères et plus variables que celles actuelles avec le dérèglement climatique. Ces contraintes combinées pourraient entraîner une évolution progressive des propriétés mécaniques et microstructurales du matériau : microfissuration, diminution de cohésion, perte de rigidité, voire désagrégation partielle. Comprendre l'influence de ces sollicitations sur le comportement des sols traités est donc un enjeu scientifique et technique majeur pour améliorer la résilience des ouvrages en terre et anticiper leur performance à long terme.

Face à ces défis, il est nécessaire de développer des méthodologies expérimentales originales permettant de reproduire de manière réaliste ces conditions et d'en analyser les effets sur la durabilité des sols traités. Le travail présenté s'inscrit dans cette démarche. Il s'appuie sur la reconstitution en laboratoire d'éprouvettes de limons traités à la chaux et au ciment bas carbone (CEM III/A), soumis à des conditions de cure variables reproduisant différents scénarios hydriques représentatifs des évolutions climatiques futures, et est en lien avec les projections climatiques régionales (TRACC, 2023), puis soumis à des essais de chargement mécanique cycliques.

Le couplage des cycles hydriques et mécaniques vise ainsi à reproduire plus fidèlement les conditions réelles auxquelles les sols traités sont exposés en service : alternance d'humidité et de sécheresse d'une part, sollicitations mécaniques répétées dues à l'utilisation en service de l'ouvrage d'autre part. Cette approche permettra d'évaluer les effets conjoints de ces contraintes sur l'endommagement progressif du matériau, et d'identifier les mécanismes de dégradation responsables de la perte de performance à long terme.

2 MATERIAUX ET METHODES

2.1 Matériaux

2.1.1 Sol limoneux

Le sol étudié est un limon provenant du nord de la France. Il a été prélevé par pelle mécanique puis stocké en sacs hermétiques avant d'être transporté au laboratoire. Afin de garantir l'homogénéité des échantillons, le matériau a été tamisé à 0,2 mm puis divisé à l'aide d'un séparateur. L'analyse granulométrique réalisée par diffraction laser a montré que 80% des particules présentaient une dimension inférieure à 0,008 mm, pour un diamètre maximal mesuré $D_{max} = 0,1346\text{mm}$ (ISO, 2020). La courbe granulométrique indique une composition moyenne de 81% de limon, 11% d'argile et 8% de sable. La composition minéralogique, déterminée par diffraction des rayons X, révèle la présence majoritaire de quartz, carbonates (calcite et dolomite), silicates (muscovite, microcline, clinocllore), feldspaths (albite), minéraux argileux (kaolinite) et hématite. Comme indiqué dans le tableau 1, le sol étudié présente une faible teneur en argile et un indice de plasticité (IP) faible. Selon le système unifié de classification des sols (USCS), il est donc classé dans la catégorie ML, correspondant à un limon à faible limite de liquidité (ASTM D698-12, 2021). Ses propriétés sont comparables à celles de plusieurs sols limoneux rencontrés dans le nord de la France (Das et al. 2022; Lemaire et al. 2013).

Tableau 1. Propriétés géotechniques du limon utilisé

Propriétés	Valeurs	Unités
Valeur au bleu de méthylène VBS	20	g/100 g
Limite de liquidité WL (NF P 94-051)	28	%
Limite de plasticité WP (NF P 94-051)	21	%
Indice de plasticité IP (NF P 94-051)	7	%
Classification du sol selon le système USCS (ASTM D2487-17, 2020)	ML	-

2.1.2 Chaux et liant hydraulique

Le limon est stabilisé par ajout de 1 % de chaux vive (CaO). L'analyse par diffraction des rayons X a confirmé la pureté du produit, composé à 89,6 % de

CaO, avec des teneurs faibles en carbonate (0,4 % de CaCO_3) et en hydroxyde (7,1 % de $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Cette chaux, fortement réactive, permet la floculation rapide du sol lors du mélange et favorise les réactions pouzzolaniques (Pigeot et al., 2024).

Le liant hydraulique retenu est un ciment de type CEM III/A, utilisé à hauteur de 5 % de la masse de l'éprouvette. Sa composition repose sur un mélange de clinker Portland ($\approx 35\%$) et de laitier de haut-fourneau ($\approx 65\%$), ce qui en fait un liant bas carbone couramment employé dans les projets d'infrastructures linéaires. Les analyses chimiques ont montré une composition typique dominée par CaO (48,2 %), SiO_2 (30,8 %), Al_2O_3 (7,1 %) et MgO (4,56%) (Pigeot et al., 2024). Ce liant, associé à la chaux, contribue à la stabilisation mécanique et chimique du limon.

2.2 Préparation du matériau

Un essai Proctor a été réalisé sur le mélange sol avec 1 % de chaux et 5 % de ciment afin de déterminer la teneur en eau optimale (OMC) et la densité sèche maximale. Les résultats indiquent une densité sèche maximale de $1,75\text{ Mg/m}^3$ obtenue pour une OMC de 17,5 %. Afin de reproduire les conditions de traitement habituellement mises en œuvre sur chantier, la même séquence a été suivie en laboratoire. Le sol humidifié a d'abord été mis en contact avec la chaux et mélangé. Le ciment a ensuite été incorporé, puis le mélange a été homogénéisé jusqu'à obtenir une texture uniforme. Les éprouvettes sont confectionnées par compactage statique dans un moule cylindrique en acier préalablement graissés pour faciliter le démoulage. Le matériau est disposé en une seule couche et est soumis à une charge appliquée simultanément aux deux extrémités, jusqu'à atteindre 96 % de la densité sèche maximale. Un indice des vides de 0,577, une hauteur de 100 mm et un diamètre de 50 mm sont visés. Le protocole ainsi décrit permet une répétabilité et une régularité lors de la préparation assurant une comparabilité des essais qui vont être réalisés (Serratrice, 2018).

2.3 Conditions de cure

La durabilité des sols traités dépend fortement des conditions d'humidification et des variations hydriques auxquelles ils sont exposés. Pour évaluer l'influence de ces conditions sur le comportement des matériaux, quatre scénarios de cure ont été définis. Deux d'entre eux représentent des situations extrêmes, tandis que les deux autres visent à simuler les effets du dérèglement climatique, en reproduisant des cycles de mouillage et de séchage réalistes. Tous les scénarios

comportent d'abord 28 jours de cure normalisée, durant lesquels les éprouvettes sont enveloppées dans du papier aluminium puis recouvertes d'un film plastique afin de limiter les échanges d'humidité avec l'air. Elles sont conservées à 21 ± 1 °C et 50 % d'humidité relative.

À l'issue de ces 28 jours, les conditions d'exposition divergent selon les scénarios, pour atteindre une durée totale de 180 jours de cure.

2.4 Suivi par tomographie à rayon X

La tomographie à rayons X représente une technique d'imagerie non destructive, qui permet d'explorer la structure interne des matériaux avec précision. En s'appuyant sur la capacité des rayons X à traverser la matière tout en étant absorbés de manière différenciée selon la densité et la composition des constituants, cette méthode offre une reconstruction tridimensionnelle complète de l'éprouvette analysée. Elle permet ainsi de visualiser avec une grande exactitude la microstructure du matériau, révélant par exemples des détails tels que la distribution de la porosité, et les hétérogénéités locales. Au-delà de la simple observation statique, la tomographie à rayons X autorise également l'étude dynamique des phénomènes internes. La tomographie à rayons X (Figure 1) est donc un outil utile pour le suivi non destructif de l'endommagement interne des sols stabilisés soumis à des chargements répétés (hydriques et mécaniques).

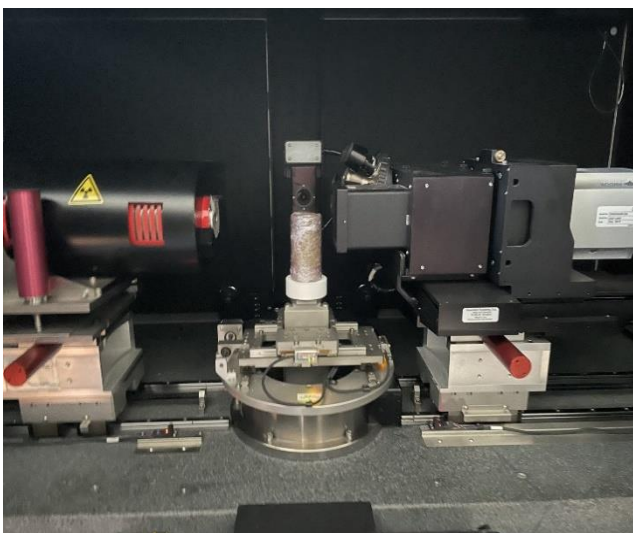


Figure 1. Appareil de tomographie à rayon X (Cerege)

Afin de réaliser les essais de tomographie à rayon X. Une source RX de 140 kV et 10 W, avec un grossissement de $0,39\times$ et une taille de voxel de l'ordre de $50 \mu\text{m}$ est utilisée. Chaque éprouvette est centrée dans le champ de vision de la source, à 0° et 90° , afin

de couvrir toutes les orientations et d'obtenir une reconstruction complète du volume.

Le protocole inclut plusieurs étapes : la prise d'images de référence (blancs) pour corriger l'effet de la source, la définition des coordonnées X, Y et Z pour positionner précisément l'échantillon, et le réglage des paramètres d'acquisition tels que la distance source-échantillon et source-détecteur, ainsi que le temps d'exposition. Les acquisitions sont réalisées en continu, avec un nombre d'images suffisant pour couvrir un angle de rotation de -180° à $+180^\circ$, permettant une reconstruction volumique.

Les éprouvettes, dont la hauteur dépasse largement leur diamètre, doivent être scannées en trois fois. Les données obtenues vont être reconstruites à l'aide du logiciel XMReconstructor. Puis un stitching (l'assemblage entre les différentes tomographies) est effectué. Les images reconstruites fournissent des cartes tridimensionnelles de la densité interne, permettant d'identifier et de quantifier la fissuration ainsi que la progression de l'endommagement sous les différents scénarios de chargement cyclique et de cure hydrique. Dans le cas des éprouvettes de limons traités à la chaux et au liant hydraulique bas carbone, trois densités distinctes peuvent être identifiées : les vides, la chaux et le limon, les coques cimentaires présentant une densité proche de celle du limon sont indistingables.

2.5 Essais triaxiaux cycliques

Les essais triaxiaux cycliques sont réalisés à l'aide de la machine DTX30 de VJTech (Figure 2), permettant d'imposer des chargements répétés sur les éprouvettes. Une première phase de saturation est effectuée. La saturation est vérifiée par le coefficient de Skempton (B). Après la saturation, les éprouvettes sont consolidées anisotropiquement. Ce confinement anisotrope simule les contraintes au sein d'un remblai.

Le chargement cyclique est ensuite appliqué sous forme de signal sinusoïdal de fréquence de 1 Hz, avec une amplitude de contrainte déviatorique maintenue constante au cours de l'essai (Figure 3).

La fréquence de 1 Hz représente un compromis entre la nécessité de réaliser un nombre élevé de cycles et le respect des conditions de drainage, assurant un écoulement adéquat de l'eau dans le sol saturé. Les conditions de drainage sont adaptées selon le scénario.

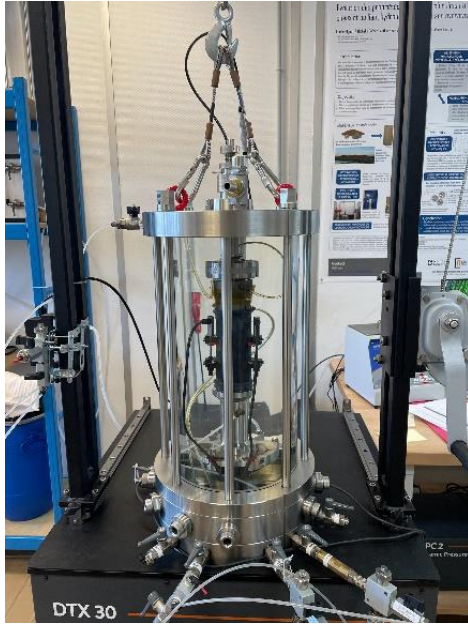


Figure 2. Presse triaxiale cyclique (Cerema)

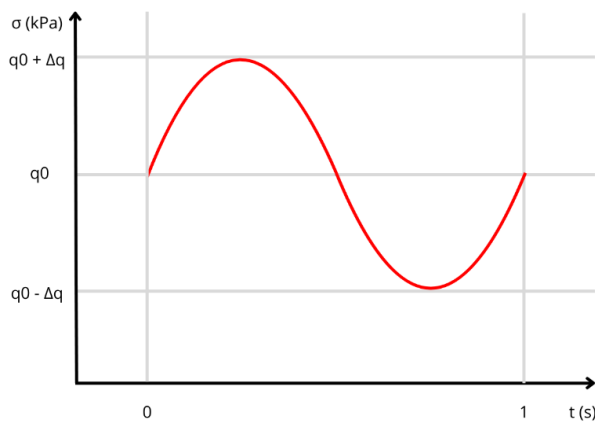


Figure 3. Evolution du déviateur en fonction du temps pour un cycle

3 DISCUSSION SUR LE CHOIX DES PARAMETRES ETUDIES

3.1 Cycles hydriques

L'un des objectifs principaux de cette étude est de reproduire en laboratoire des sollicitations hydriques réalistes auxquelles les ouvrages en terre pourraient être exposés sur le long terme. En effet, les variations de la teneur en eau du sol, induites par les fluctuations du niveau de la nappe pourraient constituer un facteur déterminant dans les processus d'endommagement des sols traités. Afin de caractériser de manière représentative la réponse du matériau à ces variations, il convient de définir des cycles hydriques adaptés, fondés sur une analyse des protocoles existants dans la littérature. L'étude est conçue pour couvrir une durée totale de 180 jours de cure, afin d'observer les effets à long terme des alternances d'humidification et de

séchage sur les propriétés mécaniques et microstructurales du limon traité.

La littérature montre que les cycles hydriques appliqués aux sols traités peuvent varier considérablement selon les conditions expérimentales, la nature du sol et le type de liant utilisé. Par exemple, la norme (AD559-D559M-15, 2023) propose un protocole standardisé composé de cycles d'immersion de 5h et de séchage au étuve à 71 °C pendant 42h, initialement conçu pour les sols stabilisés au ciment. Ce protocole, repris dans les travaux de Yangsukkasem et al. (2024)) et de Das et al. (2022), permet d'évaluer la résistance à la dégradation des matériaux soumis à des sollicitations hydriques rapides et sévères. Cependant, plusieurs études, dont celles de Cuisinier et al., (2020); de Das et al. (2022) et de Wassermann et al, (2022) soulignent que ces conditions de séchage extrêmes tendent à surestimer la perte de performance par rapport aux conditions *in situ*, et pourraient ne pas être représentatives du comportement réel des sols traités.

Les scénarii suivants sont présentés. Le premier scénario représente un état de saturation permanente : l'éprouvette est d'abord soumise à 28 jours de cure normalisée, puis immergée pendant 152 jours. Ce scénario correspond au cas d'un sol traité situé dans la partie inférieure du remblai, en contact permanent avec la nappe.

Le deuxième scénario vise à reproduire des variations hydriques lentes, typiques d'une zone de remblai située à quelques mètres sous la surface, qui sur le long terme est perturbé par des changements du niveau de la nappe. Après 100 jours de cure normalisée, l'éprouvette subit cinq cycles d'immersion et de séchage à l'air libre, la température et l'humidité relative lors du séchage à l'air libre étant maintenues à 20 °C et autour de 50 % d'humidité, conformément aux conditions climatiques moyennes du nord de la France (Cuisinier et al., 2020).

Le troisième scénario correspond à une accélération des cycles hydriques, représentant une situation de stress hydrique plus intense. Il comprend dix cycles d'immersion et de séchage à l'air libre. Il permet d'évaluer l'influence de la rapidité des alternances hydriques sur l'endommagement interne et la résistance du matériau tout en prenant en compte les projections climatiques régionales (TRACC, 2023).

Enfin, le dernier scénario correspond à un sol traité qui n'est soumis à aucun changement hydrique majeur. Cela correspond à une éprouvette sous cure normalisée prolongée de 180 jours. Ce scénario servira de référence.

L'ensemble de ces scénarios permet de couvrir un éventail de conditions allant de la saturation continue à des alternances hydriques périodiques,

représentatives des variations possibles au sein d'un remblai soumis à des changements de niveau de nappe ou à des fluctuations climatiques.

3.2 Cycles mécaniques

Au-delà des sollicitations hydriques, les ouvrages en sols traités sont fréquemment soumis à des chargements cycliques dans les infrastructures de transport, comme le trafic routier ou ferroviaire (LCPC/SETRA 2007; Xie et al. 2018). Dans la plupart des études disponibles, les essais de fatigue réalisés portent principalement sur des sollicitations en flexion, ce qui correspond aux besoins d'évaluation des sous-couches routières (Krzewinski et al., 2025). Ces essais permettent d'appréhender la résistance du matériau et d'estimer sa durée de vie sous des sollicitations répétées. Cependant, lorsqu'il s'agit de remblais, la réalité des contraintes est plus complexe : les sols peuvent être soumis à des efforts multiaxiaux, combinés aux variations hydriques et aux effets de compactage, qui influencent fortement la manière dont la déformation se propage à l'échelle du volume de matériau. Dans ce contexte, les essais triaxiaux cycliques apparaissent comme une méthode plus représentative du comportement en service. Bien que leur utilisation reste encore limitée dans ce cadre (Silva, 2012 ; Viana Da Fonseca et al., 2013), ces essais offrent la possibilité de reproduire de manière contrôlée les contraintes tridimensionnelles auxquelles les remblais sont soumis. Ainsi, sont réalisés des essais triaxiaux cycliques afin de mieux représenter les conditions réelles de chargement. Cette approche permet non seulement de reproduire les contraintes anisotropiques rencontrées dans un remblai, mais aussi de suivre l'évolution progressive de la déformation sur l'ensemble de l'essai. L'objectif est de caractériser la fatigue du sol traité sur une période correspondant à environ un million de cycles.

Pour relier les phénomènes macroscopiques observés en essais de fatigue à l'évolution interne de la microstructure du matériau, cette étude fait appel à la tomographie X. Contrairement aux essais triaxiaux qui ne renseignent que sur des paramètres globaux, la tomographie offre une observation directe et quantitative des modifications internes, fournissant ainsi un lien entre les sollicitations cycliques et les changements microstructuraux.

L'utilisation de la tomographie impose certaines contraintes pratiques. Un scan est effectué avant le début de l'essai de fatigue et à sa conclusion, afin de disposer de références sur l'état initial et final du matériau. Des scans intermédiaires sont réalisés à trois paliers durant le million de cycles par des éprouvettes

différentes. Ces paliers permettent d'observer l'état de fatigue du matériau et de suivre précisément l'évolution de sa microstructure au fil des sollicitations cycliques. Le palier 3 correspond à un million de cycle de compression réalisé sur l'éprouvette.

Le protocole expérimental récapitulé dans le tableau 2 a donc été conçu pour inclure des paliers d'arrêt pour les éprouvettes soumises à l'immersion ou à la cure normalisée. Les éprouvettes soumises aux cycles hydriques, en revanche, ne subiront que l'essai triaxial cyclique complet d'un million de cycles. Chaque arrêt pour tomographie fournit ainsi un « instantané » représentatif de l'état interne du matériau, permettant de relier les observations microstructurales à la dégradation progressive des propriétés mécaniques et d'établir une chronologie détaillée de l'évolution de la microstructure. La tomographie est particulièrement utile pour observer les phénomènes précoces de fatigue, souvent invisibles à l'échelle macroscopique. Les microfissures initiales, la progression des fissurations liées à la plasticité locale et la formation de zones plus poreuses sont autant d'éléments qui déterminent la durabilité à long terme des sols traités. En analysant ces transformations à plusieurs paliers de fatigue, il devient possible de comprendre comment les sollicitations cycliques conduisent progressivement au changement du comportement mécanique du matériau.

De plus, la combinaison de la tomographie avec les essais triaxiaux cycliques offre une vue complète du comportement du sol : d'une part, les données mécaniques globales renseignent sur la réponse du matériau aux contraintes appliquées ; d'autre part, l'imagerie X permet d'identifier les mécanismes internes responsables de cette réponse. Cette approche intégrée permet ainsi de relier directement les changements microscopiques aux propriétés macroscopiques, offrant une compréhension de la fatigue des sols traités.

Ce protocole permet non seulement d'étudier la fatigue mécanique des sols traités sous chargement cyclique, mais aussi de corrélérer les données expérimentales avec la progression des microfissures et l'endommagement interne observés par tomographie. La comparaison entre les différents scénarios de cure et de nombre de cycles fournit une vision complète de la durabilité des matériaux, en distinguant les effets des conditions extrêmes de saturation de ceux des sollicitations hydriques répétées et climatiquement modifiées.

En résumé, les matériaux, leur préparation, les scénarios de cure, les conditions de drainage et de

saturation, ainsi que les paramètres des essais triaxiaux cycliques et de tomographie ont été définis, choisis afin de garantir la représentativité des conditions de service et la comparabilité des résultats. Les paliers intermédiaires pour la tomographie vont être fixés pour permettre l'observation de l'évolution microstructurale du matériau.

3.3 Validation préliminaire du protocole

Avant la mise en œuvre complète du protocole combiné, des tests préliminaires ont été réalisés afin de vérifier la faisabilité de chacun de ses composants. Des cycles hydriques ont été appliqués sur des éprouvettes pilotes pour confirmer que les alternances

humidité/sécheresse pouvaient être reproduites dans des conditions contrôlées. Par ailleurs, une éprouvette test a été soumise à un essai de fatigue triaxiale, accompagné de scans tomographiques avant et après l'essai. Ces observations ont permis de vérifier que la tomographie permettait de suivre la microstructure interne et de détecter les modifications induites par les sollicitations mécaniques. Ces tests combinés montrent que le protocole complet, associant cycles hydriques, sollicitations mécaniques et suivi tomographique, est réalisable et fournit des données cohérentes et fiables. Ils constituent ainsi une première validation méthodologique solide avant l'application sur l'ensemble des éprouvettes et la production de résultats expérimentaux définitifs.

Tableau 2. Récapitulatif des essais

Éprouvette	Type de cure 180 jours de cure au total	Essai de fatigue	Tomographie
1-1	Normalisée	Palier 1	Avant et après l'essai de fatigue
1-2	Normalisée	Palier 2	Avant et après l'essai de fatigue
1-3	Normalisée	Palier 3	Avant et après l'essai de fatigue
2-1	Normalisée + cycles hydriques	Palier 3	Avant et après l'essai de fatigue
3-1	Normalisée + cycles hydriques	Palier 3	Avant et après l'essai de fatigue
4-1	Normalisée 28 jours + immersion prolongée	Palier 1	Avant et après l'essai de fatigue
4-2	Normalisée 28 jours + immersion prolongée	Palier 2	Avant et après l'essai de fatigue
4-3	Normalisée 28 jours + immersion prolongée	Palier 3	Avant et après l'essai de fatigue

4 CONCLUSION

Pour conclure, le protocole développé dans cette étude permet de reproduire de manière contrôlée et réaliste les conditions hydriques et mécaniques subies par les sols traités. L'association des cycles triaxiaux et de la tomographie à rayons X offre un cadre expérimental pour suivre l'évolution interne du matériau à différents stades de sollicitation. Cette méthodologie fournit ainsi une base solide pour analyser l'influence des

scénarii de conditions hydriques sur l'endommagement progressif des limons traités à la chaux et au liant hydraulique bas carbone.

- Le protocole combine des cures normalisées, une immersion prolongée et des cycles hydriques réalistes.
- Les essais triaxiaux cycliques permettent de simuler des sollicitations mécaniques proches de celles rencontrées sur le terrain.

- Les scans tomographiques offrent un suivi non destructif de l'évolution microstructurale à plusieurs paliers de fatigue.
- Cette approche constitue un outil robuste pour étudier de manière systématique l'endommagement des sols traités.

Ce protocole commence à être mis en place actuellement au laboratoire, et les premières séries d'essais devraient fournir des résultats préliminaires qui pourront être présentés lors de la prochaine communication scientifique.

5 REFERENCES

- AD559-D559M-15, 2023. Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures [WWW Document]. URL https://store.astm.org/d0559_d0559m-15.html (accessed 10.23.25).
- A.F.N.O.R., 1993. NF P94-051: Soils – Investigation and testing – Determination of Atterberg's limits – Liquid limit by the cup method – Plastic limit by the thread method. French Standardization Association.
- ASTM D698-12, 2021. Standard Test Methods foLaboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).
- ASTM D2487-17, 2020. ASTM D2487-17e01. ASTM International.
- Bell, F.G., 1996. Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils. *Eng. Geol.* 42, 223–37. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2).
- Cuisinier, O., Masrouri, F., Mehenni, A., 2020. Alteration of the Hydromechanical Performances of a Stabilized Compacted Soil Exposed to Successive Wetting–Drying Cycles. *J. Mater. Civ. Eng.* 32, 04020349. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003270](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003270)
- Das, G., Razakamanantsoa, A., Herrier, G., Deneele, D., 2022. Physicochemical and Microstructural Evaluation in Lime-Treated Silty Soil Exposed to Successive Wetting-Drying Cycles Submitted to Different Testing Conditions [WWW Document]. URL <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/%28ASC E%29MT.1943-5533.0004636> (accessed 9.11.25).
- ISO, 2020. ISO 13320:2020 - Analyse granulométrique — Méthodes par diffraction laser.
- Krzewinski, V., Dufour, N., Chevalier, C., Borderon, J., Gasc-Barbier, M., 2025. Fatigue behavior of lime- and/or cement-treated soils: A database analysis and empirical modeling approach. *Results Eng.* 28, 107682. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107682>
- LCPC/SETRA, 2000. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide de Traitement des sols (GTS) (No. Réf. D9924). LCPC.
- Lemaire, K., Deneele, D., Bonnet, S., Legret, M., 2013. Effects of lime and cement treatment on the physicochemical, microstructural and mechanical characteristics of a plastic silt. *Eng. Geol.* 166, 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.09.012>
- Pigeot, L., Dufour, N., Calissano, H., Dermenonville, F., Soive, A., 2024. Influence of the curing stress effect on the stiffness degradation curve of a silt stabilized with lime and cement. *Eng. Geol.* 337, 107574. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107574>
- Preteseille, M., Lenoir, T., 2015. Mechanical fatigue behavior in treated/stabilized soils subjected to a uniaxial flexural test. *Int. J. Fatigue* 77, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.03.010>
- Rios da Rocha e Silva, S., n.d. A General Framework for the Geomechanical Characterisation of Artificially Cemented Soil.
- Serratrice, J.-F., 2018. Apport expérimental de la méthode de compactage statique des sols au laboratoire. *Rev. Fr. Géotechnique* 1. <https://doi.org/10.1051/geotech/2019001>
- TRACC, 2023. La trajectoire de réchauffement de référence.
- Viana Da Fonseca, A., Rios, S., Amaral, M.F., Panico, F., 2013. Fatigue Cyclic Tests on Artificially Cemented Soil. *Geotech. Test. J.* 36, 20120113. <https://doi.org/10.1520/GTJ20120113>
- Wassermann, A., Abdallah, A., Cuisinier, O., 2022. Impact of wetting and drying cycles on the mechanical behaviour of a cement-treated soil. *Transp. Geotech.* 36, 100804. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100804>
- Xie, J., Tang, L., Lv, S., Zhang, N., Huang, T., Liu, H., 2018. Standardization of Fatigue Characteristics of Cement-Treated Aggregate Base Materials under Different Stress States. *Appl. Sci.* 8, 1500. <https://doi.org/10.3390/app8091500>
- Yangsuksakem, N., Suebsuk, J., Kampala, A., Siriphan, A., Somna, R., Jiammeepreecha, W., Chindaprasirt, P., 2024. Durability against cyclic wetting-drying of cement-stabilized loess subgrade for railway in tropical semi-arid regions. *Constr. Build. Mater.* 455, 139123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139123>