

# Comportement des limons traités à la chaux et au liant hydraulique immergés pendant leur cure

## *Behavior of silts treated with lime and hydraulic binder immersed during their curing*

**O. Queste<sup>1</sup>, V. Berche<sup>1</sup>, N. Dufour<sup>2</sup>, H. Calissano<sup>2</sup>, L. Batilliot<sup>2</sup>, L. Pigeot<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> SCNE, Compiègne, France, [Olivier.QUESTE@scsne.fr](mailto:Olivier.QUESTE@scsne.fr)

<sup>2</sup> Cerema, GéoCoD, Aix-en-Provence, France Egis, Seyssins, France, [nathalie.dufour@cerema.fr](mailto:nathalie.dufour@cerema.fr)

### Résumé

Le Canal Seine-Nord-Europe est un projet majeur de liaison fluviale à grand gabarit visant à raccorder le réseau fluvial français au réseau fluvial européen. Il s'inscrit dans le projet européen Seine-Escaut d'interconnexion des bassins de la Seine et de l'Escaut. Le développement durable est l'un des objectifs centraux du projet. Les travaux de terrassement étant excédentaires en matériaux, les enjeux techniques portent sur la valorisation maximale des matériaux extraits en déblais. Ces enjeux sont identiques à ceux pour les constructions en terre ou les digues. En particulier l'effet de l'immersion sur le comportement des matériaux utilisés est crucial. Pour y répondre, 48 éprouvettes de limons traités à la chaux et au liant hydraulique ont été reconstituées en laboratoire et testées mécaniquement. Elles ont été fabriquées par compactage statique. Ce procédé présentait l'avantage d'être répétable et de constituer rapidement des éprouvettes homogènes, de diamètre 5 cm (élancement 2).

Le programme expérimental avait pour objectif de déterminer les propriétés de résistance et de déformabilité d'un limon traité à la chaux et au liant hydraulique, en fonction des conditions de cure et des conditions de drainage. Ainsi, des paramètres de résistance, de cohésion et d'angle de frottement ainsi que des paramètres de déformabilité (module de cisaillement) ont été déterminés pour différents niveaux de déformation. Le programme expérimental comprenait plusieurs essais mécaniques : - des essais triaxiaux UU à des pressions de confinement de 50, 100, 200 et 300 kPa, - des essais triaxiaux CD à des pressions de confinement de 150, 300, 600 et 1200 kPa, - des essais triaxiaux cycliques contrôlés en fréquence et en déplacement à des pressions de confinement de 150, 300 et 500 kPa, - des essais de résonance en torsion à des pressions de confinement de 150, 300 et 500 kPa. Pour chaque type d'essai, quatre conditions de cure ont été testées : - sans immersion : 90 jours à 20 °C et 270 jours à 20 °C, - avec immersion : 28 jours à 20 °C suivis de 62 jours immergés à 20 °C et 28 jours à 20 °C suivis de 242 jours immergés à 20 °C. Les résultats des essais en laboratoire sont présentés, comparés entre eux et discutés.

### Mots-clés

limon traité, chaux, liant hydraulique, essais en laboratoire, cure immergée

## Abstract

The Seine-Nord-Europe Canal is a major large-gauge river link project designed to connect the French river network to the European river network, and is part of the Canal Seine-Nord Europe project to interconnect the Seine and Escaut basins. Sustainable development is one of the project's key objectives. As there is a surplus of materials in the earthworks, the technical challenges involve maximizing the value of the materials extracted as excavated material. These challenges are identical to those for earthworks and dikes. In particular, the effect of immersion on the behavior of the materials used is crucial. To address these issues, 48 specimens of lime and hydraulic binder-treated silt were reconstituted in the laboratory and mechanically tested. They were manufactured by static compaction. The advantage of this process was that it was repeatable and rapidly produced homogeneous specimens with diameters of 5 cm.

The aim of the experimental program was to determine the strength and deformability properties of a silt treated with lime and hydraulic binder, as a function of curing conditions and draining conditions. Strength, cohesion, angle of friction and deformability parameters (shear modulus) were determined for different levels of deformation. The experimental program included several mechanical tests: - UU triaxial tests at confining pressures of 50, 100, 200 and 300 kPa, - CD triaxial tests at confining pressures of 150, 300, 600 and 1200 kPa, - frequency- and displacement-controlled cyclic triaxial tests at confining pressures of 150, 300 and 500 kPa, - torsional resonance tests at confining pressures of 150, 300 and 500 kPa. For each type of test, four curing conditions were tested: - without immersion: 90 days at 20°C and 270 days at 20°C, - with immersion: 28 days at 20°C followed by 62 days immersed at 20°C and 28 days at 20°C followed by 242 days immersed at 20°C. Laboratory test results are presented, compared and discussed.

## Key Words

treated silt, lime, hydraulic binder, laboratory tests, immersed cure

## Introduction

Des impératifs économiques et environnementaux incitent les Maîtres d’Ouvrage à privilégier les matériaux en place pour la construction d’infrastructures de transport et d’ouvrages géotechniques. Par exemple, dans le cadre du projet du Canal Seine-Nord Europe, ce défi a conduit à proposer des solutions innovantes pour la réutilisation des matériaux extraits : ces sols seront utilisés comme remblais techniques placés derrière les murs de futures écluses (Bizien et al. 2022; Bufalo et al. 2022). Pour répondre aux performances attendues, les propriétés mécaniques du sol en place doivent être améliorées. Pour cela, le sol est traité à la chaux et au liant hydraulique et compacté sur place. Ces étapes confèrent au sol des propriétés mécaniques qui augmentent en fonction du temps après le traitement et varient en fonction des conditions de cure. Une prévision de l’évolution de ces propriétés mécaniques est notamment rendue possible par la réalisation d’essais de laboratoire sur des éprouvettes reconstituées. Leur comportement mécanique est investigué et notamment l’impact des conditions hydriques de saturation et d’immersion pendant leur cure. Plusieurs études ont déjà porté sur le comportement des sols traités en immersion (Le Borgne 2019; Barbara Le Runigo 2008; Lemaire 2012; Saussaye 2013) ou encore plus récemment (Miyashita, Sanjeevani, et Kuwano 2019). En complément, l’article présenté ici vise à mettre en lumière dans ces conditions le comportement de limons traités à la chaux et au liant hydraulique sur une très large plage de déformation, des très petites déformations (essais de torsion en résonance à la colonne résonnante) en allant jusqu’à la rupture (essais triaxiaux).

## Matériel

### *Le limon*

Le sol étudié est un limon prélevé dans le Nord de la France (Figure 2). La première étape de préparation a consisté à homogénéiser le sol en le tamisant à 0,2 mm. D’après ses caractéristiques géotechniques présentées dans le Tableau 1, il correspond à un limon à faible limite de liquidité ML dans le système de classification des sols USCS (ASTM 2018). L’analyse granulométrique réalisée par diffraction laser indique une composition équivalente à 81,41 % de limon, 11,03 % d’argile et 7,55 % de sable. Plus précisément, 80 % des grains sont inférieurs à 0,008 mm. Une analyse par diffraction des rayons X a permis d’identifier les minéraux suivants : quartz, phases carbonatées (calcite et dolomite), silicates (muscovite, microcline et clinochlore), feldspaths (albite), minéraux argileux (kaolinite) et hématite.

TABLEAU 1. Propriétés géotechniques du limon.

| Propriétés                                | Valeurs |
|---|---------|
| Valeur au bleu VBS [g/100 g]              | 2,2     |
| Limite de liquidité [%]                   | 28      |
| Limite de plasticité [%]                  | 21      |
| Indice de plasticité $I_p$ [%]            | 7       |
| Unified Soil Classification System (USCS) | ML      |

### La chaux et le liant hydraulique

La formulation de traitement du limon est similaire à celle proposée pour des limons similaires en France (Lemaire 2012). Le sol humide a été traité avec 1 % de chaux et 5 % d'un liant routier hydraulique polyvalent. Des analyses thermogravimétriques et de diffractométrie des rayons X ont été effectuées sur les liants. La chaux vive est composée de 89,6 % de chaux libre, de 7,1 % de Portlandite et de 0,4 % de carbonate. Le liant a une composition déclarée d'environ 35 % de clinker de ciment Portland et 65 % de laitier de haut fourneau. Plus précisément, une analyse spectrométrique indique une composition de 48,2 % de CaO, 30,8 % de SiO<sub>2</sub>, 7,1 % d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1,06 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4,56 % de MgO, 1,34 % de K<sub>2</sub>O, 0,57 % de Na<sub>2</sub>O et 2,76 % de SO<sub>3</sub>.

### Compactage

Dans ce programme expérimental, 48 éprouvettes ont été reconstituées en laboratoire et testées mécaniquement. Elles ont été fabriquées par compactage statique (Bizien et al. 2022). Ce procédé présente plusieurs avantages : l'enregistrement de la courbe de compactage, qui constitue « l'histoire » de l'éprouvette, l'homogénéité et la répétabilité des éprouvettes ainsi fabriquées pour des essais de mécanique des sols assurés par le contrôle de l'effort axial pendant la phase de compactage. En cas d'écart sensible entre les courbes de compactage, l'éprouvette est écartée de la campagne expérimentale et une nouvelle éprouvette est immédiatement recompactée. Toutes les éprouvettes ainsi fabriquées ont un diamètre de 50 mm (élancement 2). Les courbes de compactage des 48 éprouvettes sont présentées sur la Figure 1 montrant l'indice des vides  $e_0$  en fonction de la contrainte axiale appliquée  $\sigma$ . Les courbes montrent la similitude d'historique de chargement des différentes éprouvettes.

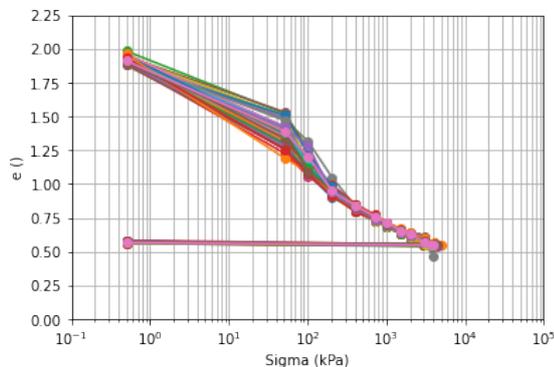


FIGURE 1. Courbes de compactage (indice des vides  $e_0$  en fonction de la contrainte axiale appliquée  $\sigma$ ).

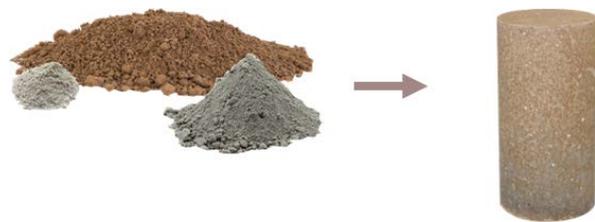


FIGURE 2. Matériaux et éprouvette reconstituée en laboratoire (limon, chaux et liant hydraulique).

## Protocole expérimental

### Préparation des éprouvettes

Un essai Proctor standard (AFNOR 2014) a été réalisé afin de déterminer la densité sèche maximale [ $Mg/m^3$ ] pour un mélange de limon avec 1 % de chaux et 5 % de liant hydraulique et la teneur en eau optimale correspondante  $w_{OPN}$  [%]. La densité sèche maximale mesurée ( $\rho_{d,OPN}=1,75 Mg/m^3$ ) correspond à une teneur en eau optimale  $w_{OPN}=17,5 \%$ . La Figure 3

présente la courbe Proctor et les lignes du taux de saturation ( $S_r$  [%]) correspondant à une saturation en eau de 100 %, 90 % et 80 % dans un graphique présentant la densité sèche en fonction de la teneur en eau.

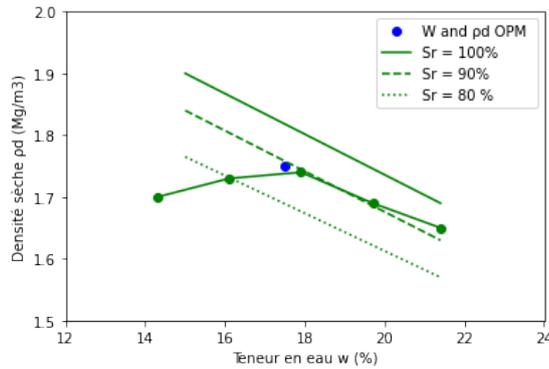


FIGURE 3. Courbe Proctor et lignes de saturation (80, 90 et 100 %).

Le sol humide a été mélangé avec de la chaux et du liant hydraulique jusqu'à ce qu'il soit homogène. La densité visée pour l'ensemble des éprouvettes reconstituées est  $0,96\rho_{d,OPN}$  avec une teneur en eau moyenne  $w_{OPN} + 1$  %. Le Tableau 2 montre les moyennes, écarts types, valeurs maximales et minimales des paramètres d'état : teneur en eau  $w$ , poids volumique  $\gamma$ , poids volumique sec  $\gamma_d$ , indice des vides  $e$  et degré de saturation  $S_r$  après compactage. Pour chaque paramètre, les écart-types sont faibles, ce qui montre la similitude des éprouvettes fabriquées.

TABLEAU 2. Paramètres d'état après compactage et en fin de cure.

|                               |            | Après compactage | En fin de cure   |                                   |                   |                                    |
|-------------------------------|------------|------------------|------------------|-----------------------------------|-------------------|------------------------------------|
|                               |            |                  | 90 jours à 20 °C | 90 jours à 20 °C (avec immersion) | 270 jours à 20 °C | 270 jours à 20 °C (avec immersion) |
| $w$ (%)                       | Moyenne    | 17,71            | 16,20            | 21,17                             | 16,66             | 21,79                              |
|                               | Écart type | 0,16             | 0,15             | 1,22                              | 0,46              | 0,48                               |
|                               | Min        | 17,35            | 17,02            | 17,58                             | 16,15             | 20,83                              |
|                               | Max        | 18,10            | 17,49            | 22,06                             | 17,94             | 22,36                              |
| $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | Moyenne    | 19,79            | 19,63            | 20,08                             | 19,48             | 20,20                              |
|                               | Écart type | 0,06             | 0,11             | 0,20                              | 0,10              | 0,06                               |
|                               | Min        | 19,68            | 19,41            | 19,51                             | 19,35             | 20,10                              |
|                               | Max        | 19,91            | 19,77            | 20,28                             | 19,74             | 20,27                              |
| $\gamma_d$                    | Moyenne    | 16,81            | 16,75            | 16,56                             | 16,70             | 16,59                              |

|                      |            |       |       |       |       |        |
|----------------------|------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| (kN/m <sup>3</sup> ) | Écart type | 0,05  | 0,10  | 0,08  | 0,05  | 0,04   |
|                      | Min        | 16,71 | 16,56 | 16,46 | 16,64 | 16,52  |
|                      | Max        | 16,90 | 16,90 | 16,74 | 16,81 | 16,69  |
| e (-)                | Moyenne    | 0,58  | 0,58  | 0,60  | 0,59  | 0,60   |
|                      | Écart type | 0,00  | 0,01  | 0,01  | 0,00  | 0,00   |
|                      | Min        | 0,57  | 0,57  | 0,58  | 0,58  | 0,59   |
|                      | Max        | 0,59  | 0,60  | 0,61  | 0,59  | 0,60   |
| Sr (%)               | Moyenne    | 83,01 | 79,82 | 95,59 | 76,66 | 98,34  |
|                      | Écart type | 0,98  | 1,12  | 5,19  | 2,32  | 1,77   |
|                      | Min        | 81,15 | 77,39 | 79,59 | 73,86 | 95,74  |
|                      | Max        | 85,40 | 81,41 | 98,52 | 82,54 | 100,46 |

#### *Conditions de cure*

Les éprouvettes ont été testées après deux échéances de cure (90 et 270 jours) et deux conditions de cure : à 20 °C sous pression atmosphérique, à 20 °C et immergée à partir du vingt-huitième jour de cure dans de l'eau du robinet à 20 °C.

Les paramètres d'état des éprouvettes immergées et non immergées pendant leur cure sont différents (Tableau 2) en particulier le degré de saturation : après 270 jours de cure avec immersion, les éprouvettes sont quasiment saturées. Après 90 ou 270 jours de cure, les paramètres d'état varient peu.

#### *Essais mécaniques*

Plusieurs essais ont été réalisés afin d'obtenir les paramètres de déformabilité et de rupture des éprouvettes en fonction des conditions et durées de cure : des essais triaxiaux UU et CD (AFNOR 1994), des essais de résonance en torsion (CR) à la colonne résonante (ASTM 2021) des essais triaxiaux cycliques (Cuy) pilotés en fréquence et en déformation (ASTM 2012). Pour chaque amplitude de déformation, 50 cycles ont été imposés. Ces derniers essais sont très peu répandus dans le domaine des sols traités (Wang et al. 2012; Hoyos, Puppala, et Chainuwat 2004). Pourtant, la colonne résonante est un dispositif en laboratoire particulièrement bien adapté pour mesurer le comportement des éprouvettes traitées en très petites déformations. Le Tableau 3 recense tous ces essais et indique la pression de confinement  $p_c$ , la fréquence le cas-échant et les conditions de saturation de l'éprouvette : soit pendant la cure, soit saturée par application d'une contre-pression préalablement à la réalisation de l'essai.

TABLEAU 3. Tableau de synthèse des essais réalisés sur les éprouvettes après 90 et 270 jours de cure à 20°C.

| Nombre essais | Type essai | Nombre d'éprouvettes/essai | Diamètre (mm) | p <sub>c</sub> (kPa) | Fréquence (Hz) | Condition saturation |
|---------------|------------|----------------------------|---------------|----------------------|----------------|----------------------|
| 2             | UU         | 4                          | 50            | 50                   | -              | Non saturé           |
|               |            |                            |               | 100                  | -              | Non saturé           |
|               |            |                            |               | 200                  | -              | Non saturé           |
|               |            |                            |               | 300                  | -              | Non saturé           |
| 2             | UU         | 4                          | 50            | 50                   | -              | Non saturé           |
|               |            |                            |               | 100                  | -              | Non saturé           |
|               |            |                            |               | 200                  | -              | Non saturé           |
|               |            |                            |               | 300                  | -              | Non saturé           |
| 2             | CD         | 4                          | 50            | 150                  | -              | Saturé               |
|               |            |                            |               | 300                  | -              | Saturé               |
|               |            |                            |               | 600                  | -              | Saturé               |
|               |            |                            |               | 1 200                | -              | Saturé               |
| 2             | CD         | 4                          | 50            | 150                  | -              | Saturé               |
|               |            |                            |               | 300                  | -              | Saturé               |
|               |            |                            |               | 600                  | -              | Saturé               |
|               |            |                            |               | 1 200                | -              | Saturé               |
| 8             | CR         | 2                          | 50            | 150                  | -              | Non saturé           |
|               |            | 2                          | 50            | 300                  | -              | Non saturé           |
|               |            | 2                          | 50            | 500                  | -              | Saturé               |
|               |            | 2                          | 50            | 500                  | -              | Saturé               |
| 8             | Cuy        | 2                          | 50            | 150                  | 0,4            | Non saturé           |
|               |            | 2                          | 50            | 300                  | 0,4            | Non saturé           |
|               |            | 2                          | 50            | 500                  | 0,4            | Saturé               |
|               |            | 2                          | 50            | 500                  | 0,4            | Saturé               |

Dans les tableaux 2 à 5, les lignes en jaune correspondent à des éprouvettes non immergées et les lignes en bleu à des éprouvettes immergées.

## Résultats et discussions

Les résultats des essais sont maintenant présentés et discutés, en particulier en termes de résistance et de déformabilité.

### Paramètres de résistance

La Figure 4 présente l'évolution du déviateur  $q$  en fonction de la déformation axiale  $\epsilon_a$  obtenue lors des essais triaxiaux monotones UU, après 90 (a) et 270 (b) jours de cure. Pour ces essais, les éprouvettes sont testées dans leur état de saturation en fin de cure. Ainsi les éprouvettes immergées présentent un degré de saturation plus élevé que les éprouvettes non immergées (Tableau 2). Sur les Figures 4 et 5, les courbes rouges correspondent aux éprouvettes non immergées et les courbes bleues aux éprouvettes immergées.

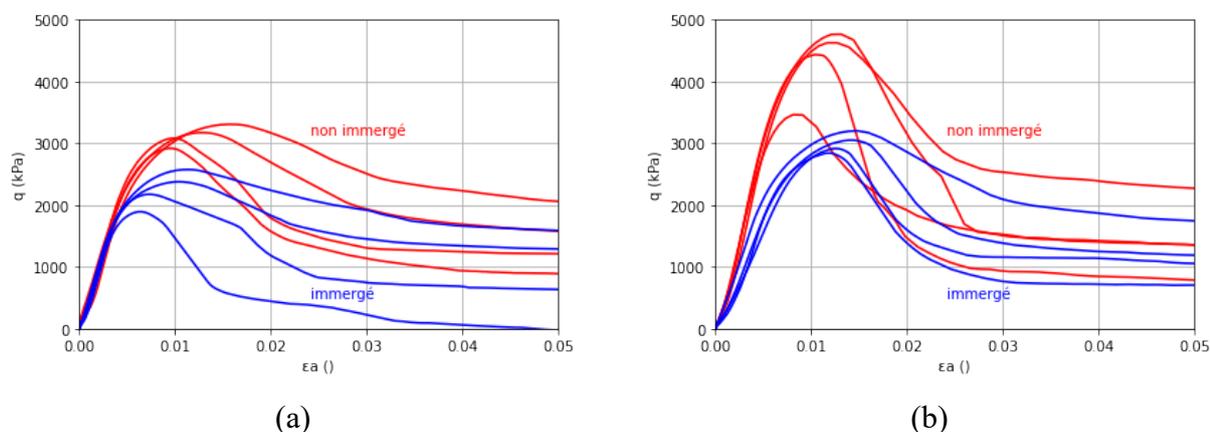


FIGURE 4. Évolution du déviateur  $q$  en fonction de la déformation axiale  $\epsilon_a$   
Cure sans immersion (rouge) et cure avec immersion (bleu) – Essais UU  
(a) après 90 jours de cure (b) après 270 jours de cure.

En conditions non drainées, quelle que soit la pression de confinement appliquée pendant l'essai, le déviateur maximal est supérieur pour les éprouvettes non immergées. Après 270 jours de cure, les éprouvettes non immergées présentent un comportement plus raide que celles immergées. Même si les résistances mécaniques des éprouvettes immergées sont moindres, elles sont tout de même bien supérieures à celles du limon non traité. Ces résultats sont cohérents avec les résultats d'essais de compression uniaxiale réalisés sur des éprouvettes de limons traitées à la chaux exposés par (Le Runigo 2008).

Le Tableau 4 montre les paramètres de résistance  $c_u$  et  $\phi_u$  obtenus après 90 et 270 jours de cure. Comme attendu, la cohésion augmente considérablement entre 90 et 270 jours (Le Runigo et al. 2011). Elle est inférieure pour les éprouvettes immergées (Le Borgne 2019).

TABLEAU 4. Paramètres de résistance après cure de 90 et 270 jours à 20 °C.

| Cure                     | $c_u$ (kPa) | $\varphi_u$ (°) | Cure                      | $c_u$ (kPa) | $\varphi_u$ (°) |
|--------------------------|-------------|-----------------|---------------------------|-------------|-----------------|
| 90 j à 20 °C             | 919         | 25,0            | 270 j à 20 °C             | 1 510       | 21,1            |
| 90 j à 20 °C (immersion) | 582         | 29,1            | 270 j à 20 °C (immersion) | 888         | 24,7            |

La Figure 5 présente l'évolution du déviateur  $q$  en fonction de la déformation axiale  $\epsilon_a$  obtenue lors des essais triaxiaux monotones CD, après 90 (a) et 270 (b) jours de cure. Pour ces essais, les éprouvettes sont préalablement saturées par contre-pression (800 kPa). Avant la phase de cisaillement, les éprouvettes non immergées ont en moyenne un coefficient de Skempton de 0,88 et les éprouvettes immergées de 0,99, ce qui traduit un état de saturation assez différent. Une boucle de chargement déchargement a été effectuée pour un déviateur  $q$  voisin de la moitié du déviateur maximal.

En conditions drainées, après 90 jours de cure, le comportement des éprouvettes immergées et non immergées est assez proche. Par contre, après 270 jours de cure, les éprouvettes non immergées présentent un comportement plus raide que celles immergées. Pour cette durée de cure, quelle que soit la pression de consolidation appliquée, le déviateur maximal est supérieur pour les éprouvettes non immergées.

Le Tableau 5 montre les paramètres de résistance  $c'$  et  $\varphi'$  obtenus après 90 et 270 jours de cure. Comme attendu, la cohésion augmente bien entre 90 et 270 jours. Cette augmentation est généralement attribuée à la formation de liaisons cimentaires, dont le nombre augmente avec le temps de cure (Le Runigo 2008). L'angle de frottement varie peu. Plus le temps d'immersion est grand, plus son effet négatif sur les valeurs des paramètres de déformabilité et de rupture s'amplifie.

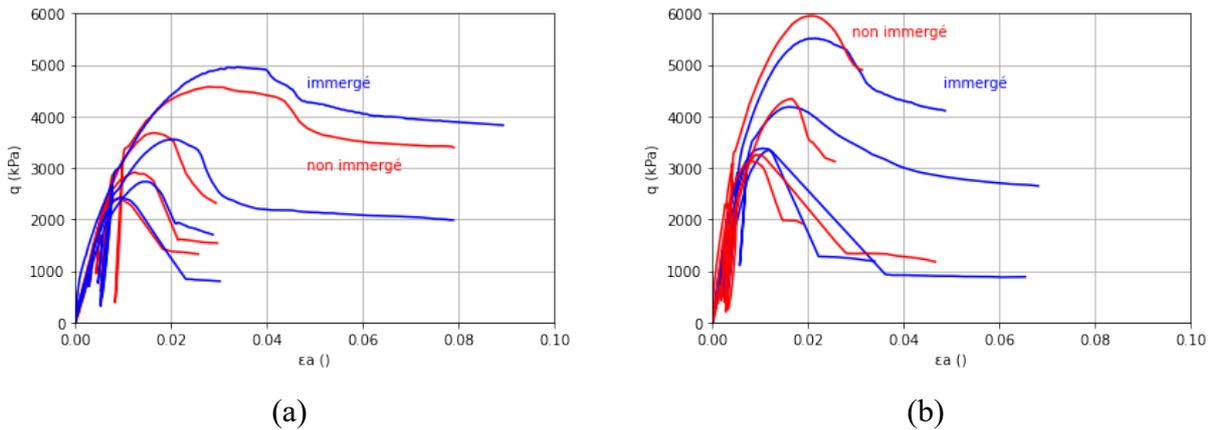


FIGURE 5. Évolution du déviateur  $q$  en fonction de la déformation axiale  $\epsilon_a$   
 Cure sans immersion (rouge) et cure avec immersion (bleu) – Essais CD  
 (a) après 90 jours de cure (b) après 270 jours de cure.

TABLEAU 5. Paramètres de résistance après cure de 90 et 270 jours à 20 °C.

| Cure                     | c' (kPa) | $\phi'$ (°) | Cure                      | c' (kPa) | $\phi'$ (°) |
|--------------------------|----------|-------------|---------------------------|----------|-------------|
| 90 j à 20 °C             | 643      | 30,2        | 270 j à 20 °C             | 817      | 31,5        |
| 90 j à 20 °C (immersion) | 552      | 33,3        | 270 j à 20 °C (immersion) | 810      | 31,3        |

### Courbes de dégradation du module et amortissement

La Figure 6a montre la variation du module de cisaillement  $G$  en fonction de la distorsion  $\gamma$ . Les courbes ont été obtenues à partir des résultats des essais de résonance en torsion (triangle), et des essais triaxiaux cycliques (\* pour les mesures locales par capteurs à effet Hall et rond pour les mesures globales pour le dixième cycle (Serratrice 2016)). Les courbes jaunes correspondent aux éprouvettes non saturées, soumises à une pression de confinement de 150 kPa, les courbes vertes aux éprouvettes non saturées, soumises à une pression de confinement de 300 kPa, les courbes rouges aux éprouvettes saturées, soumises à une pression de confinement de 500 kPa et les courbes bleues aux éprouvettes immergées pendant leur cure, soumises à une pression de confinement de 500 kPa. Les modules et distorsions pour les essais triaxiaux cycliques ont été calculés avec un coefficient de Poisson  $\nu=0,4$ . La Figure 6b montre son pendant en termes de module adimensionnalisé  $G/G_{max}$ ,  $G_{max}$  étant la valeur maximale du module de cisaillement mesurée en laboratoire à la colonne résonante. Les résultats sont présentés pour un seul temps de cure, après 90 jours.

Plus les pressions de confinement augmentent, plus les modules augmentent. Ils décroissent avec la distorsion. Les courbes adimensionnalisées  $G/G_{max}$  des éprouvettes immergées et non immergées ( $p_c = 3\ 000$  et 500 kPa) sont quasi-identiques. La pression de confinement semble avoir un impact plus fort sur la forme de ces courbes, plutôt que les conditions de cure. Notons que ces courbes sont primordiales dans les études de site sismique et sont très peu documentées pour les sols traités.

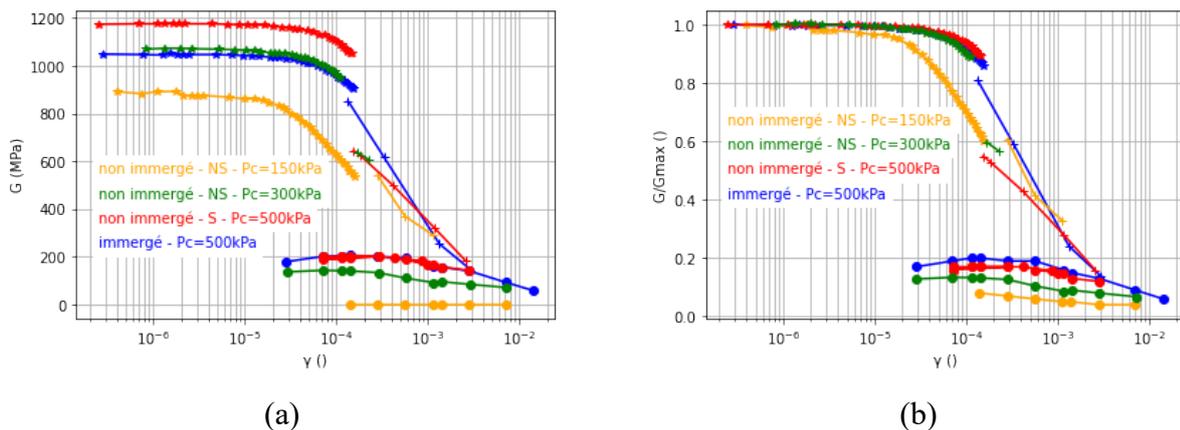


FIGURE 6. Évolution du module de cisaillement  $G$  (a) de  $G/G_{max}$  en fonction de la distorsion (b) – Mesures locales et globales (triaxial cyclique) – 10ème cycle – Essai à la colonne résonante.

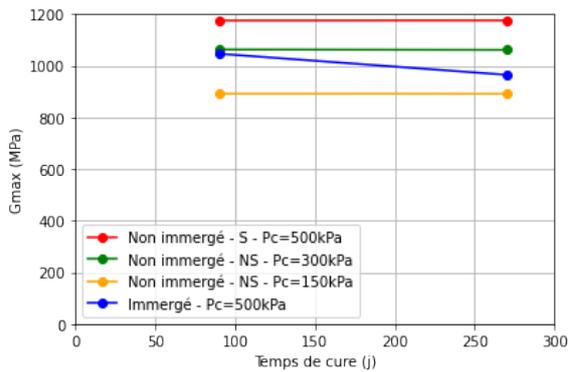


FIGURE 7. Évolution des modules de cisaillement maximaux  $G_{max}$  en fonction du temps et des conditions de cure.

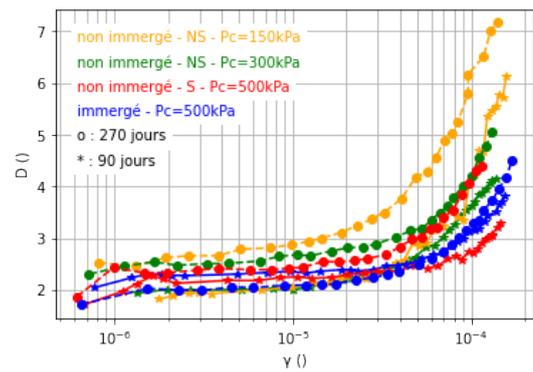


FIGURE 8. Évolution de l'amortissement  $D$  en fonction du temps et des conditions de cure.

La Figure 7 montre avec les mêmes couleurs l'évolution de  $G_{max}$  en fonction du temps et des conditions de cure. Cette valeur est constante entre 90 et 270 jours pour toutes les éprouvettes exceptées pour les éprouvettes immergées pour lesquelles elle décroît.

Enfin, la Figure 8 présente l'évolution de l'amortissement  $D$  en fonction de la distorsion  $\gamma$ . L'amortissement est mesuré par la méthode des vibrations libres (Semblat et al. 2011). Plus la pression de confinement est basse, plus l'amortissement mesuré est élevé. Entre 90 et 270 jours de cure, les amortissements augmentent pour toutes les éprouvettes exceptées celles immergées pendant leur cure. Les conditions d'immersion pendant la cure jouent ainsi un rôle fondamental sur la rigidité des éprouvettes.

## Conclusion

La campagne expérimentale présentée dans cet article a permis de mettre en lumière les paramètres de déformabilité et de résistance d'éprouvettes de limon traité à la chaux et au liant hydraulique en fonction des conditions de saturation avant essai et des conditions d'immersion prolongée pendant la cure. Il apparaît que les conditions de saturation et de drainage des éprouvettes jouent un rôle important sur la rigidité de celles-ci. Le contact prolongé à l'eau pendant la cure diminue les paramètres de résistance et les modules de cisaillement en très petites déformations.

## Références

- AFNOR (1994). NF P 94-070 Sols : Reconnaissance et Essais - Essais à l'appareil Triaxial de Révolution - Généralités - Définitions.
- AFNOR (2014). NF P94-093 Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié.
- ASTM (2012). ASTM D3999-11 Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus.
- ASTM (2018). ASTM D2488-17e1 Standard Practice for Description and Identification of Soils.
- ASTM (2021). ASTM D4015 - 21 Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices ». <https://doi.org/10.1520/D4015-21>.

- Bizien C., Queste O., Berche V., Fanelli S., Boussafir Y., Reiffsteck P., Szymkiewicz F., Matras R., Lecoeur M. (2022). Les limons du canal Seine Nord Europe : des traitements étudiés pour un emploi optimal en bajoyer d'écluse. In *11èmes journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur*. Lyon, France, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon [INSA Lyon], CFMS, CFMR, CFGI.
- Bufalo M., Berche V., Matras R., Mollier T., Queste O. (2022). Blocs techniques des écluses : Chantier expérimental. Présenté à Symposium CFBR.
- Hoyos, Laureano R., Anand J. P., Phonlawut C. (2004). Dynamic Properties of Chemically Stabilized Sulfate Rich Clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130 (2): 153-62.
- Le Borgne T. (2019). Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols. Doctorat, Université de Lorraine.
- Le Runigo B., Ferber V. , Cui Y.J. , Cuisinier O., Deneele D. (2011). Performance of Lime-Treated Silty Soil under Long-Term Hydraulic Conditions. *Engineering Geology* 118 (1-2): 20-28.
- Le Runigo B. (2008). Durabilité du limon de Jossigny traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydriques : comportements hydraulique, microstructural et mécanique. Doctorat, Ecole Centrale de Nantes (ECN)/ Université de Nantes.
- Lemaire K. (2012). Evolution des caractéristiques physico-chimiques, microstructurales et hydromécaniques de limon traités aux liants lors d'une circulation d'eau. Doctorat.
- Miyashita Y., Dayani S., Reiko K. (2019). Effect of Curing Conditions on Long Term Mechanical Property of Improved Surplus Soils. Édité par A. Tarantino et E. Ibraim. *E3S Web of Conferences* 92: 11001.
- Saussaye L. (2013). Traitement des sols aux liants hydrauliques: aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification. Doctorat, Université de Caen.
- Semblat J.-F., Lenti L., Jacqueline D., Leblond J.J., Grasso E. (2011). Railway vibrations induced into the soil: experiments, modelling and isolation. *Revue Française de Géotechnique*, n° 134-135 (août): 23-26.
- Serratrice J.-F. (2016). Mesures des propriétés cycliques des sols limoneux ou argileux au laboratoire. *Revue Française de Géotechnique*, n° 148: 1.
- Wang, Min, Lingwei Kong, Chong Zhao, et Meng Zang. 2012. Dynamic Characteristics of Lime-Treated Expansive Soil under Cyclic Loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 4 (4): 352-59.