



**HAL**  
open science

## Comportement mécanique d'un limon traité soumis à une pression de confinement.

Lucile Pigeot, Nathalie Dufour, Hélène Calissano, Laurent Batilliot, Fabienne Dermenonville, Anthony Soive

► **To cite this version:**

Lucile Pigeot, Nathalie Dufour, Hélène Calissano, Laurent Batilliot, Fabienne Dermenonville, et al.. Comportement mécanique d'un limon traité soumis à une pression de confinement.. 12èmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Jun 2024, Poitiers, France. hal-04700105

**HAL Id: hal-04700105**

**<https://hal.science/hal-04700105v1>**

Submitted on 17 Sep 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN LIMON TRAITE SOUMIS À UNE PRESSION DE CONFINEMENT PENDANT SA CURE.

## **MECHANICAL BEHAVIOR OF A TREATED SILT SUBJECTED TO CURING STRESS.**

Lucile PIGEOT<sup>1,2</sup>, Nathalie DUFOUR<sup>2</sup>, Hélène CALISSANO<sup>2</sup>, Laurent BATILLIOT<sup>2</sup>, Fabienne DERMENONVILLE<sup>3</sup>, Anthony SOIVE<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Nantes Université, École Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000, Nantes, France

<sup>2</sup> GéoCoD, Cerema, Aix-en-Provence, France

<sup>3</sup> Egis Structures et environnement, Seyssins, France

<sup>4</sup> Cerema, Aix-en-Provence, France

**RÉSUMÉ** – Un protocole expérimental avec une colonne résonante est proposé pour simuler la cure d'un limon stabilisé avec 1 % de chaux et 5 % de liant hydraulique lorsqu'il est placé dans un remblai de grande hauteur. Les courbes de dégradation du module de cisaillement mesuré sur des éprouvettes reconstituées montrent qu'un gain mécanique est apporté par une cure sous pression de confinement isotrope de 500 kPa.

**ABSTRACT** – An experimental protocol using a resonant column is proposed to simulate the curing of a silt stabilized with 1 % lime and 5 % hydraulic binder when placed in a high embankment. Shear modulus degradation curves measured on reconstituted soil specimens show that a mechanical gain is provided by curing under isotropic confining pressure of 500 kPa.

### 1. Introduction

Dans les projets d'infrastructures linéaires actuels (lignes ferroviaires, routes et canaux), des solutions d'amélioration chimique et mécanique sont utilisées pour les sols n'ayant pas les performances mécaniques requises. Ils sont d'abord stabilisés à la chaux pour améliorer leur maniabilité, puis au liant hydraulique et compactés ce qui leur confère plus de rigidité, de cohésion et de résistance. Les dosages typiques pour ces projets sont 1 % de chaux et 4 ou 5 % de liant hydraulique. Afin de réduire leur impact carbone, les liants utilisés sont de plus en plus composés de ciment Portland associé à un substitut à faible teneur en carbone (laitier de haut fourneau, cendres volantes, etc.). La connaissance croissante de ces matériaux et de leur durabilité encourage leur utilisation dans des solutions innovantes pour les structures géotechniques telles que les remblais de grande hauteur (> 10 m).

Dans différentes phases des projets d'infrastructure, des essais mécaniques en laboratoire sont réalisés après différentes périodes de cure sur des éprouvettes de sol afin de s'assurer que la stabilisation apporte les propriétés mécaniques attendues. Les éprouvettes peuvent être prélevées sur un remblai expérimental traité ou reconstituées en laboratoire à partir d'un mélange de sol et traitement (Bell, 1996; Makki-Szymkiewicz et al., 2015; Sariosseiri & Muhunthan, 2009; Wild et al., 1998). Les périodes de cure correspondent aux temps nécessaires à l'avancée des réactions d'hydratation. Ces réactions décrivent la transformation des phases cimentaires anhydres de la chaux et du liant en des phases hydratées qui forment des coques autour des agrégats de sol. Pour assurer les phénomènes d'hydratation, les normes actuelles préconisent des conditions de cure en laboratoire pour les éprouvettes traitées : stockées hermétiquement à une température de 20°C et à pression atmosphérique (LCPC/SETRA, 2000).

Cependant, dans les domaines d'application où les matériaux cimentaires sont couramment placés à grande profondeur, les études en laboratoire qui permettent d'anticiper leurs propriétés mécaniques prennent en compte les pressions qui s'exercent sur les matériaux pendant leur phase de cure. En effet, au même titre que l'augmentation de la température, l'augmentation de pression aurait un effet catalyseur sur les réactions d'hydratation. Cela a notamment été observé dans le cadre d'études mettant en œuvre la technique du « soil mixing » (Åhnberg, 2007) ou des CPB (Cement Paste Backfill) (Zhao et al., 2021).

Pour ces raisons, la présente étude propose un protocole expérimental qui permet de simuler les conditions de cure d'un limon traité à la chaux (1 %) et au liant hydraulique (5 %) quand il est placé à 25 m de profondeur dans un remblai de grande hauteur tout en mesurant de manière régulière l'augmentation de son module de cisaillement (G). En utilisant une colonne résonante qui offre la possibilité d'effectuer des mesures de résonance en torsion sans endommager le matériau, les phases de cure et d'essai peuvent être couplées.

Deux conditions de cure sont comparées : une cure normalisée et une cure sous pression de confinement de 500 kPa. La différence entre ces cures sur le comportement mécanique du limon stabilisé est quantifiée par la comparaison des courbes de dégradation du module de cisaillement en fonction de la distorsion. L'évolution temporelle du module G à très petite déformation (G<sub>max</sub>) montre que la pression de cure permet d'accélérer et d'améliorer les propriétés du limon stabilisé. Une loi de puissance basée sur la valeur mesurée du G<sub>max</sub> après deux jours de cure est proposée pour prédire l'évolution temporelle du G<sub>max</sub> (au moins jusqu'à 270 jours) avec ou sans pression de cure.

## 2. Matériaux

### 2.1. Sol et traitement

Le matériau utilisé est un sol limoneux prélevé dans le Nord de la France. Une fois au laboratoire, il a été tamisé à 0,2 mm puis quarté. Une analyse granulométrique réalisée par diffraction laser sur le tamisât a montré que 80 % des grains étaient inférieurs à 0,08 mm et que le diamètre maximal des grains était de 0,1346 mm (ISO 13320:2020, 2020). L'analyse de sa composition minéralogique a été réalisée par diffraction des rayons X (DRX). Elle a indiqué qu'il était majoritairement composé de Quartz, de phases carbonatées (calcite et dolomite), de silicates (muscovite, microcline et clinocllore), de feldspaths (albite), de minéraux argileux (kaolinite) et d'hématite. Le Tableau 1 indique les propriétés géotechniques du sol qui amènent à sa classification ML (limon de faible plasticité) (ASTM D2488, 2020).

Tableau 1. Propriétés géotechniques du sol.

Propriétés	Valeur au bleu de Méthylène VBS [g/100 g] (NF P94-068, 1998)	Limite de liquidité [%] (NF EN ISO 17892-12, 2018)	Limite de plasticité [%] (NF EN ISO 17892-12, 2018)	Indice de plasticité [%] (NF EN ISO 17892-12, 2018)
Valeurs	2,2	28	21	7

Afin de reproduire les étapes de traitement sur chantier, le sol a préalablement été traité avec 1% de chaux. Sur site, cela facilite sa maniabilité et la traficabilité en diminuant sa teneur en eau et modifiant sa texture. La chaux utilisée est composée à 90% de chaux vive (CaO). Dans un deuxième temps, l'ajout de 5 % de liant hydraulique routier (RocAS) va permettre une amélioration des propriétés mécaniques du sol en formant des coques cimentaires autour des agrégats de sol. Le liant utilisé a une composition semblable à un CEM III/A, c'est-à-dire 35 % de ciment Portland et 65 % de laitier de haut fourneau.

## 2.2. Confection des éprouvettes

Un essai Proctor Normal (NF P94-093, 2014) réalisé au-préalable sur le limon stabilisé et compacté a permis de déterminer sa teneur en eau optimale notée  $w_{OPN}$  [%] et sa masse volumique sèche optimale notée  $\rho_{OPN}$  [Mg/m<sup>3</sup>] (OPN : Optimal Proctor Normal). La Figure 1 présente les résultats de l'essai, les cinq points de la courbe correspondent aux cinq échantillons compactés à des teneurs en eau différentes. Les lignes de saturation tracées en gris correspondent à des degrés de saturation  $S_r$  [%] de 100 %, 90 % et 80 %. La densité sèche optimale mesurée ( $\rho_{dOPN} = 1,75$  Mg/m<sup>3</sup>) à la teneur en eau optimale  $w_{OPN} = 17,5$  % est représentée par un carré bleu.

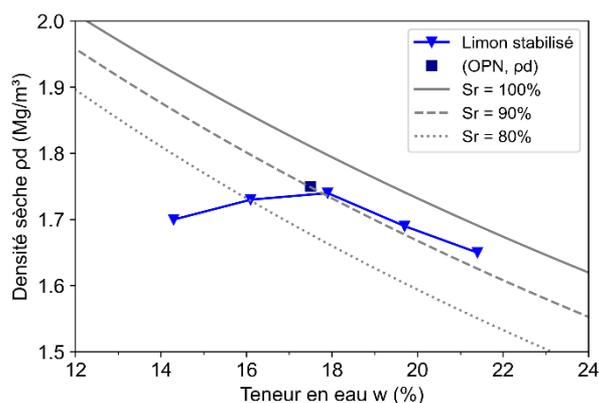


Figure 1. Courbes Proctor et lignes de saturation ( $S_r = 80\%$ ,  $90\%$  et  $100\%$ ).

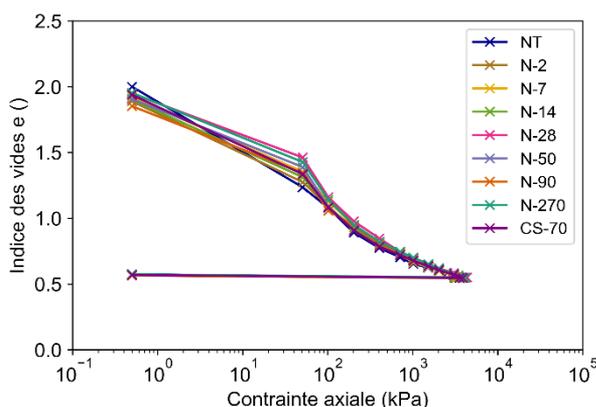


Figure 2. Courbes de compactages.

Pour l'étude, les éprouvettes ont été reconstituées en laboratoire à une densité de  $19,9$  KN/m<sup>3</sup> (soit 96 % de la densité sèche maximale) par compactage statique (Serratrice, 2018). Le sol fraîchement stabilisé, à une teneur en eau  $w = w_{OPN} + 1$  %, est placé en une seule couche dans un moule cylindrique. Une force est appliquée à ses deux extrémités jusqu'à former des éprouvettes de 50 mm de diamètre et de 100 mm de hauteur. L'évolution de l'indice des vides  $e$  est suivie en fonction de la force appliquée [kPa] et permet de tracer les courbes de compactage de chaque éprouvette (Figure 2). Une fois compactées, l'indice des vides moyen des 9 éprouvettes est de  $e = 0,58$  et il varie entre 0,55 et 0,59 selon un écart-type 0,014.

## 2.3. Conditions de cure et d'essais

Les conditions de cure et d'essais des 9 éprouvettes confectionnées pour l'étude sont répertoriées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Conditions de cure et d'essai des éprouvettes testées.

Éprouvette	Temps de cure (jours)	Pression de cure (kPa)	Pression durant l'essai (kPa)	Nombre d'essai par éprouvette	Module $G_{max}$ en fin de cure (MPa)
NT	Non traité		500	1	175
N-2	2	Patm	500	1	512
N-7	7	Patm	500	1	571
N-14	14	Patm	500	1	632
N-28	28	Patm	500	1	860
N-50	50	Patm	500	1	966
N-90	90	Patm	500	1	1127
N-270	270	Patm	500	1	1114
CS-70	70	500	500	29	1267

\*Patm : Pression atmosphérique, N : normalisée, CS : Curing stress.

L'éprouvette de limon non traité (NT) n'a pas nécessité de temps de cure et a été testée sous une pression de confinement isotrope de 500 kPa, immédiatement après avoir été compactée. Les éprouvettes de sol stabilisé stockées selon des conditions de cure normalisées (protégées hermétiquement et placées dans une salle à température contrôlée à 20°C) sont notées N-2, N-7, N-14, N-28, N-50, N-90 et N-270. Les essais de torsion ont été réalisés après des temps de cure définis (2, 7, 14, 28, 50, 90 et 270 jours) et un seul essai a été réalisé par éprouvette, à une pression de confinement isotrope de 500 kPa. L'éprouvette CS-70 a été compactée puis directement placée dans la cellule de la colonne résonante sous une pression de confinement isotrope (curing stress, CS) de 500 kPa. Pendant 70 jours les phases de cure et d'essai ont été combinées : 29 essais ont été réalisés, ce qui a permis de suivre l'évolution des propriétés de l'éprouvette sans l'endommager.

### 3. Méthode expérimentale : la colonne résonante



Figure 3. Colonne résonante du laboratoire GeoCoD du Cerema.

Les courbes de dégradation du module de cisaillement en fonction de la distorsion sont obtenues par des essais de résonance en torsion réalisés avec une colonne résonante (ASTM D4015-21, 2021). Cet essai non destructif consiste à exciter le sommet de l'éprouvette, maintenue fixe à sa base, en effectuant un mouvement de torsion d'une amplitude prédéterminée sur un intervalle de fréquence donné jusqu'à ce que l'amplitude maximale de la réponse soit atteinte. Cette amplitude maximale  $A_{max}$  [V] correspond à la fréquence de résonance  $f_n$  [Hz] du matériau testé. Les essais sont menés en commençant par les amplitudes les plus faibles (0,005 V) jusqu'aux plus élevées (1 V), soit un ensemble d'environ 25 points de mesure par essai. À chaque point, la fréquence de résonance du matériau est utilisée pour calculer la fréquence angulaire  $\omega_n$  [rad/s] correspondante (Eq. 1). La fréquence de résonance est la fréquence la plus basse à laquelle l'onde émise est déphasée de 90° par rapport au déplacement

rotatif. La fréquence angulaire permet de calculer la vitesse de l'onde de cisaillement  $V_s$ , et ainsi calculer le module de cisaillement  $G$  [MPa] (Eq. 1).

$$\omega_n = 2\pi f_n \qquad V_s = \frac{\omega_n L}{\beta} \qquad G = \rho V_s^2 \qquad (1)$$

Où  $L$  [m] est la longueur de l'échantillon et  $\beta$  dépend des spécificités de l'appareil. La masse volumique de l'éprouvette est notée  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>].

Les valeurs du module de cisaillement correspondent à une valeur de distorsion  $\gamma$  [ ] qui est calculée avec l'amplitude maximale  $A_{max}$  [V] correspondant à la fréquence de résonance  $f_n$ , et les dimensions de l'éprouvette ( $D$ , son diamètre et  $L$  sa longueur [m]) (Eq. 2).

$$\gamma = \frac{4,596 \cdot A_{max} \cdot D}{f_n \cdot L} \qquad (2)$$

Le module  $G$  mesuré aux plus petites amplitudes (0,005 V) et distorsions est appelé  $G_{max}$ .

## 4. Résultats et discussion

### 4.1. Courbes de dégradation du module de cisaillement

Les Figure 4 et Figure 5 présentent respectivement les résultats des essais de torsion réalisés sur les éprouvettes en cure normalisée et en cure confinée (voir conditions de cure et d'essai dans le Tableau 2). Sur ces deux figures, les graphiques (a) rassemblent les courbes de dégradation du module G en fonction de la distorsion et les graphiques (b) les courbes G/Gmax en fonction de la distorsion. La légende de la Figure 5 détaille les jours de cure correspondants aux courbes. Sur l'ensemble des graphiques la courbe de l'essai réalisé sur l'éprouvette de limon non traité est représentée par des croix bleues, le Gmax a été mesuré à 175 MPa pour une déformation en cisaillement de  $5 \cdot 10^{-6}$ . Globalement, l'évolution mécanique en fonction du temps de cure est visible à plusieurs niveaux : l'évolution de la forme des courbes, l'augmentation de la valeur de Gmax en fonction du temps, et le déplacement de la courbe vers de plus petites déformations (indiqués par les flèches noires). La forme des courbes pour les deux conditions de cure est semblable, seule la mesure à 270 jours se démarque par une dégradation du module plus importante à déformation égale. Cette évolution est également visible sur les graphiques du G/Gmax en fonction de la déformation où globalement les courbes pour les mêmes conditions de cure avaient des formes similaires tout en se déplaçant selon la flèche noire, vers des plus petites distorsions (Figure 4 (b) et Figure 5 (b)).

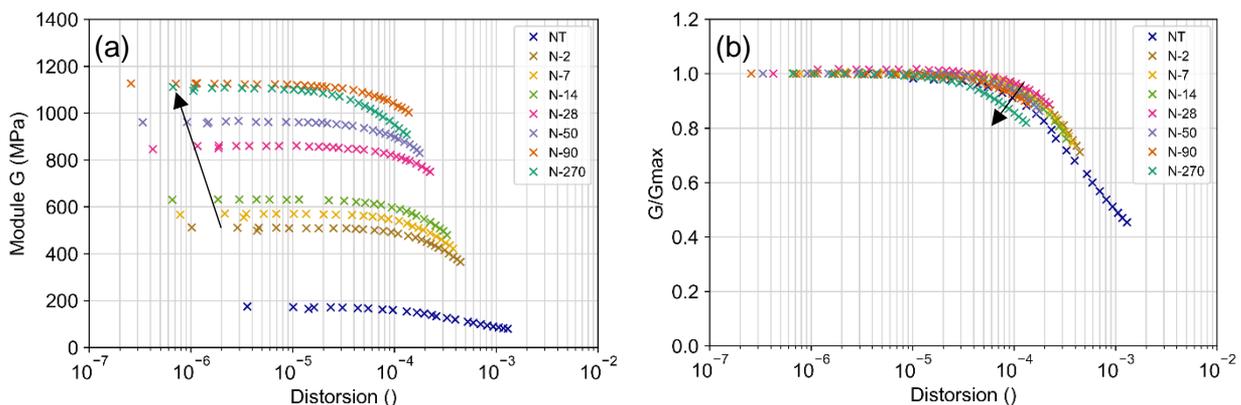


Figure 4. (a) Courbes de dégradation du module G en fonction de la distorsion. (b) Courbes G/Gmax en fonction de la distorsion. Éprouvettes en cure normalisée.

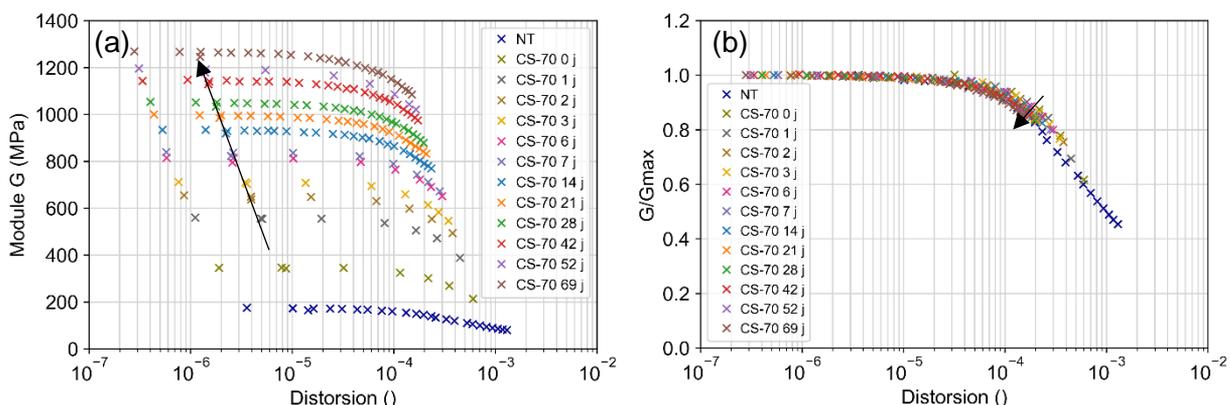


Figure 5. (a) Courbes de dégradation du module G en fonction de la distorsion. (b) Courbes G/Gmax en fonction de la distorsion. Éprouvette avec cure confinée de 500 kPa.

## 4.2. Évolution du $G_{max}$ en fonction du temps

Des courbes des Figure 4 et Figure 5 peuvent être extraits les  $G_{max}$ , c'est-à-dire les modules  $G$  à très petite déformation. Il est intéressant d'étudier l'évolution du  $G_{max}$  de matériaux cimentaires car son augmentation peut être associée à l'évolution des réactions chimiques d'hydratation (Di Sante et al., 2022). L'évolution comparative de ce paramètre pour les deux conditions de cure est présentée dans la Figure 6. Les essais réalisés sur les éprouvettes en cure normalisée sont figurés par des croix violettes. La courbe verte correspond aux  $G_{max}$  mesurés sur l'éprouvette CS-70. Le  $G_{max}$  de l'éprouvette NT qui sert de référence est représenté par un losange bleu. La différence de cinétique d'augmentation du  $G_{max}$  est largement mise en évidence. Par exemple le  $G_{max}$  après 90 jours en cure normalisée est comparable au  $G_{max}$  après 41 jours de cure confinée à 500 kPa (N-90 :  $G_{max} = 1127$  MPa et CS-70-41 jours :  $G_{max} = 1137$  MPa).

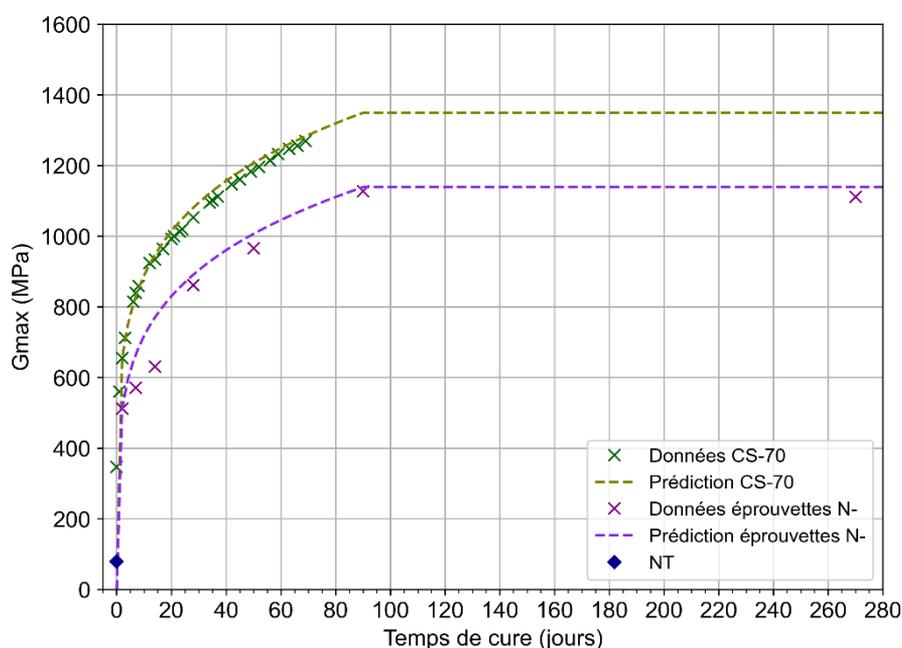


Figure 6. Évolution du  $G_{max}$  en fonction du temps : données expérimentales et prédictions d'après l'équation 3.

Tableau 3. Gain du module  $G_{max}$  en fonction du temps pour les deux conditions de cure, d'après la Figure 6.

Conditions de cure	Gain entre 0 à 2 jours	Gain entre 2 à 28 jours	Gain entre 0 à 28 jours	Paramètre empirique $\alpha$	Coefficient $R^2$
Cure normalisée	-	+ 68 %	-	0,21	0,943
Cure confinée	+ 89 %	+ 61 %	+ 203 %	0,19	0,997

Le Tableau 3 présente une analyse des gains de  $G_{max}$  en fonction du temps. Pour le cas de l'éprouvette CS-70, le gain mécanique est plus important entre 0 et 2 jours de cure qu'entre 2 et 28 jours. Cette cinétique est intrinsèquement liée à la cinétique des réactions pouzzolaniques provoquées par l'ajout de liant hydraulique. Des essais de calorimétrie isotherme réalisés sur des mélanges de sols avec de la chaux et du ciment permettent de le justifier (Bouras, 2020). Deux pics distincts de dégagement de chaleur sont mesurés après l'ajout de traitement : un pic associé à la chaux dans les deux premières heures et au cours des 12 heures suivantes, un pic associé au ciment.

Par ailleurs, la Figure 6 montre qu'en cure normalisée le  $G_{max}$  se stabilise entre 90 et 270 jours de cure (N-90 et N-270). Bien que les réactions pouzzolaniques continuent à se

développer sur le long terme, la quantité d'anhydride diminue en fonction du temps et les réactions ralentissent (Bell, 1996). En cure confinée, les essais n'ont pas été prolongés au-delà de 70 jours, mais l'hypothèse qu'un plateau soit atteint après 90 jours de cure ne peut pas être exclue. L'un des objectifs de l'étude est de prédire les propriétés mécaniques d'une éprouvette de limon stabilisé en fonction du temps, et plus spécifiquement son  $G_{max}$ . Il est donc intéressant de pouvoir prédire le  $G_{max}$  à 90 jours qui semble correspondre au temps nécessaire pour atteindre les propriétés stabilisées du limon traité (LCPC/SETRA, 2000). En effet, la connaissance du  $G_{max}$  à 90 jours donne une indication sur le  $G_{max}$  sur le long terme (au moins jusqu'à 270 jours).

Des références antérieures ont montré qu'il était possible de prédire le comportement d'un sol traité jusqu'à 28 jours avec une loi de puissance en se basant sur son  $G_{max}$  mesuré après seulement deux premiers jours de cure (Toohey & Mooney, 2012). En se basant sur cette loi et sur les résultats expérimentaux présentés précédemment, une loi de puissance est proposée pour prédire le  $G_{max}$  jusqu'à 90 jours, à partir du  $G_{max}$  à 2 jours, puis le  $G_{max}$  jusqu'à 270 jours (Eq. 3).

$$\begin{aligned} 0 \leq t \leq 90 \text{ jours} : & \quad G_{max}(t) = G_{max t_1} \left( \frac{t}{t_1} \right)^{\alpha(Cp, CS \text{ ou } CN)} \\ t \geq 90 \text{ jours} : & \quad G_{max}(t) = G_{max}(t_{90}) \end{aligned} \quad (3)$$

Où le paramètre  $\alpha$  dépend de la pression de confinement à laquelle l'échantillon est soumis durant la cure (CS, curing stress ou CN, cure normalisée) et pendant l'essai de résonance en torsion (Cp),  $G_{max}(t_{90})$  est le module de cisaillement maximal  $G_{max}$  calculé après 90 jours de cure et  $G_{max}(t_1)$  le module  $G_{max}$  après 2 jours de cure.

Les résultats de cette loi de puissance sont présentés en courbes pointillées sur la Figure 6. Le paramètre alpha ( $\alpha$ ) optimisé pour chaque courbe en fonction des données expérimentales et la différence ( $R^2$ ) entre ces courbes et les données mesurées sont indiqués dans le Tableau 3. Les valeurs de  $R^2$  ( $> 0,94$ ) montrent que la loi de puissance est bien adaptée pour représenter l'évolution de  $G_{max}$  en fonction du temps. La faible différence entre tous les paramètres met en évidence l'homogénéité des éprouvettes produites et la reproductibilité des essais de résonance en torsion. La dispersion est légèrement plus importante pour les résultats des essais en cure normalisée car ils correspondent à des éprouvettes différentes testées après leurs temps de cure respectifs.

## 5. Conclusions

Les principales conclusions de l'étude sont les suivantes :

- (1) L'article se concentre sur l'évolution en fonction du temps de cure des courbes de dégradation du module de cisaillement en fonction de la distorsion.
- (2) La rigidification du sol naturel, apporté par l'ajout de chaux, du liant hydraulique, puis du compactage, est illustrée par une augmentation du module de cisaillement et un décalage vers des plus petites déformations en distorsion.
- (3) La colonne résonante offre la possibilité de combiner les phases de cure et d'essai et donc de représenter l'évolution du sol stabilisé au sein d'un remblai en fonction de son temps de cure. En effet, cela permet un suivi continu depuis les premières heures jusqu'à des durées non atteintes dans la littérature (70 jours).
- (4) Basée sur des résultats d'essais exploratoires, une loi de puissance est proposée dans l'optique de prédire le  $G_{max}$  sur le long terme (270 jours) à partir de la valeur du  $G_{max}$  mesurée après 1 ou 2 jours de cure (pour les conditions de contraintes normalisées et de cure). Le paramètre empirique  $\alpha$  de la loi dépend de la cure et de la pression de confinement de l'essai.

Des travaux sont en cours pour étudier la microstructure et la composition chimique inhérentes à l'augmentation des propriétés mécaniques apportée par la cure confinée.

## 6. Remerciements

Le projet doctoral est financé par EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT et l'École Centrale de Nantes. Les institutions ainsi que les personnes ayant contribué à ce travail sont chaleureusement remerciées.

## 7. Références bibliographiques

- Åhnberg, H. (2007). On yield stresses and the influence of curing stresses on stress paths and strength measured in triaxial testing of stabilized soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(1), 54-66. <https://doi.org/10.1139/t06-096>
- ASTM D2488. (2020). *Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (USCS)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2487-17E01>
- ASTM D4015-21. (2021). *Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4015-21>
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223-237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Bouras, F. (2020). *Le traitement de sols argileux: Approches physico-chimique et géotechnique* [Doctoral dissertation]. Université d'Orléans.
- Di Sante, M., Bernardo, D., Bellezza, I., Fratolocchi, E., & Mazzieri, F. (2022). Linking small-strain stiffness to development of chemical reactions in lime-treated soils. *Transportation Geotechnics*, 34, 100742. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100742>
- ISO 13320:2020. (2020). *Particle size analysis—Laser diffraction methods*.
- 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)* (Réf. D9924; p. 79). LCPC.
- Makki-Szymkiewicz, L., Hibouche, A., Taibi, S., Herrier, G., Lesueur, D., & Fleureau, J.-M. (2015). Evolution of the properties of lime-treated silty soil in a small experimental embankment. *Engineering Geology*, 191, 8-22. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.03.008>
- NF EN ISO 17892-12. (2018). *Reconnaissance et essais géotechniques—Essais de laboratoire sur les sols—Partie 12: Détermination des limites de liquidité et de plasticité*. Normes nationales et documents normatifs nationaux.
- NF P94-068. (1998). *Sols: Reconnaissance et essais—Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache*. Normes nationales et documents normatifs nationaux.
- NF P94-093. (2014). *Sols: Reconnaissance et essais—Détermination des références de compactage d'un matériau—Essai Proctor Normal—Essai Proctor modifié*. Normes nationales et documents normatifs nationaux.
- Sariosseiri, F., & Muhunthan, B. (2009). Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils. *Engineering geology*, 104(1-2), 119-125.
- Serratrice, J.-F. (2018). Apport expérimental de la méthode de compactage statique des sols au laboratoire. *Revue Française de Géotechnique*, 156, 1. <https://doi.org/10.1051/geotech/2019001>
- Toohey, N. M., & Mooney, M. A. (2012). Seismic modulus growth of lime-stabilised soil during curing. *Géotechnique*, 62(2), 161-170. <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.122>
- Wild, S., Kinuthia, J. M., Jones, G. I., & Higgins, D. D. (1998). Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils. *Engineering geology*, 51(1), 37-53.
- Zhao, Y., Taheri, A., Karakus, M., Deng, A., & Guo, L. (2021). The Effect of Curing under Applied Stress on the Mechanical Performance of Cement Paste Backfill. *Minerals*, 11(10), 1107. <https://doi.org/10.3390/min11101107>

