

IMPACT DES SOLlicitATIONS CLIMATIQUES SUR UN SABLE TRAITÉ AU CIMENT

IMPACT OF WEATHERING ON A CEMENT-TREATED SAND

Alice WASSERMANN¹, Adel ABDALLAH¹ et Olivier CUISINIER¹

¹ Université de Lorraine, LEMTA, UMR 7563 - Université de Lorraine - CNRS - LEMTA – Nancy - France

RÉSUMÉ – L'objectif de cet article est de quantifier l'impact de l'intensité de cycles hydriques sur le comportement mécanique d'un sable cimenté. Une approche originale basée sur une théorie en contrainte-dilatance a été mise en place pour quantifier macroscopiquement la dégradation d'éprouvettes. Les résultats mettent en évidence le rôle primordial de l'intensité et du nombre de cycle en fonction du dosage.

ABSTRACT – This paper aims to quantify the impact of wetting and drying cycles on the mechanical behavior of cemented sand. The mechanical degradation as a function of the number and the characteristics of the cycles was evaluated through stress-dilatancy approach. The results highlight the fundamental role of the intensity and the number of cycles as a function of the dosage.

1. Introduction

Plusieurs auteurs (par ex., Brandl, 1981 et Bell, 1996) ont montré que le traitement des sols à la chaux et/ou au ciment améliore généralement les caractéristiques des sols comme la maniabilité, la résistance à la compression simple et la résistance au cisaillement. Une question essentielle porte sur l'évolution des performances des sols traités tout au long de la durée de vie de l'ouvrage en raison des sollicitations externes qu'ils subissent. Certaines études in situ de structures de chaussées stabilisées à la chaux ont montré qualitativement que l'exposition aux conditions climatiques peut avoir un impact négatif sur le comportement des sols stabilisés à long terme (par exemple, Kelley, 1988). Cela a également été mis en évidence par des études en laboratoire qui ont montré que des périodes successives séchage-humidification (Khattab et al., 2007; Chittoori et al., 2008) ou des gels/dégels répétés (par ex., Consoli et al., 2017) peuvent conduire à une diminution significative des caractéristiques hydromécaniques des sols traités. La durabilité des performances des sols traités est donc essentielle à prendre en compte dans le processus de conception de tels ouvrages, et il est de premier intérêt de comprendre l'impact des conditions climatiques sur le comportement à long terme des sols stabilisés. L'objectif de cette étude est d'apprécier l'impact de sollicitations thermo-hydriques sur le comportement mécanique d'un sol traité.

Plusieurs méthodes d'imposition des cycles de séchage/humidification sont recensées dans la littérature selon la durée des phases de séchage et d'humidification, leur intensité (par exemple en augmentant la température lors du séchage), et le mode d'humidification (par capillarité, par immersion etc.). Cependant, de nombreuses études se basent sur des cycles qui dérivent de la norme D559 (ASTM, 2015) qui préconise pour chaque cycle, 5h d'immersion dans une eau à température ambiante puis 42h dans une étuve à 71°C. Certains auteurs ont montré l'impact de l'intensité des cycles sur l'ampleur de l'altération des éprouvettes. Par exemple Cuisinier et Masrouri (2020) ont trouvé que l'importance de la diminution de la résistance à la compression simple était fonction de la technique d'imposition des cycles, du dosage et du type de traitement.

Au-delà des protocoles expérimentaux pour imposer les cycles hydriques, un aspect essentiel est la quantification des effets mécaniques de ces cycles. La plupart des études

disponibles dans la littérature ont basé leur analyse sur le suivi de la perte de masse des échantillons ou de la résistance à la compression simple en fonction du nombre de cycles appliqués (Packard et Chapman, 1963; Mehenni, 2015; Cuisinier et Masroui, 2020). Cependant, ces indicateurs macroscopiques ne permettent pas de comprendre le processus de dégradation associé aux cycles. Une compréhension plus fine du comportement des sols traités et en particulier des mécanismes de dégradation est nécessaire. Un point clé est la quantification des liaisons inter-particulaires associées aux traitements. Deux approches peuvent être trouvées dans la bibliographie. La première est basée sur une quantification explicite des produits cimentaires en fonction des conditions de traitement. Cette quantification peut être réalisée par des méthodes d'analyse chimique ou microstructurale. Dans quelques études, la relation entre les caractéristiques mécaniques et la quantité de produits cimentaires est étudiée (par ex., Chiu et al., 2009 ; Dadda et al., 2019). La deuxième approche prend le parti de quantifier les effets de la cimentation indirectement par l'analyse du comportement mécanique. Dans ce cas, le comportement du sol non traité est généralement pris comme référence (par ex., Leroueil et Vaughan, 1990) . Par exemple, les résultats des essais triaxiaux ont été interprétés en utilisant la théorie de la contrainte-dilatance de Rowe (1962) et Cuccovillo et Coop (1999) par Wang et al. (2021) pour comparer le comportement mécanique entre un sable traité par biocimentation et un sable traité au CEM I. Cette approche a permis d'analyser notamment le développement de la dilatance et la mobilisation des liaisons cimentaires par l'introduction d'un taux de liaison, η_{bond} . Cette étude a permis de valider l'approche et d'apporter une méthode d'analyse qui sera reprise dans le cadre de cette étude pour comparer les résultats d'essais.

L'étude de la bibliographie montre que la compréhension des mécanismes de dégradation des sols traités soumis à des cycles hydriques reste une question ouverte. L'objectif de cette communication est d'étudier l'impact du type et du nombre des cycles hydriques sur le comportement mécanique d'un sable traité au ciment en prenant notamment le taux de liaison η_{bond} comme indicateur de la dégradation. Dans un premier temps les matériaux et méthodes ainsi que le programme expérimental seront exposés. Les résultats seront divisés en 2 parties : les effets des cycles hydriques sur le comportement en contraintes-déformations puis les effets sur le taux de liaison suivis d'une discussion.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Matériaux d'étude

Le sol sélectionné est un sable classé comme un sol de type S1 selon le système de classification français.

Tableau 1: Propriétés géotechniques du sable d'étude

Propriété	Valeur
Indice des vides maximum /minimum	0,69 / 0,52
Diamètre maximal, D_{max} (mm)	4
Coefficient d'uniformité, C_u	5,88
Coefficient de courbure, C_c	1,24

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland (CEM I) 52,5 N contenant au moins 95% de clinker. La densité spécifique considérée pour ce type de ciment est de 3,15. Les essais de résistance à la compression de ce ciment ont montré que 97% de la résistance maximale était atteinte après 7 jours. Des essais de prise du ciment ont également été réalisés et le temps de prise mesuré a été de 2h50.

2.2. Description des protocoles expérimentaux

2.2.1. Essais triaxiaux

Un dispositif triaxial a été utilisé pour réaliser des essais consolidés et drainés (CD). Pour contrôler la saturation des spécimens, une contre-pression est appliquée pour atteindre une valeur du coefficient B de Skempton supérieure à 0,95. La vitesse d'écrasement choisie est de 0,1/mm.min⁻¹. Les variations volumétriques sont estimées par les variations d'eau dans l'échantillon et mesurées grâce à un contrôleur pression-volume. L'utilisation de capteurs internes n'était pas compatible avec le caractère fragile et friable des éprouvettes de sables peu cimentées.

2.2.2. Cycles d'humidification-séchage

Deux types différents de cycles humidification-séchage ont été employés pour étudier l'impact de l'intensité des cycles sur le comportement mécanique.

Le cycle de type I dérive de celui proposé par (ASTM, 2015). Le processus d'humidification consiste à immerger les échantillons dans l'eau à température ambiante pendant 8 heures. Ensuite, les échantillons sont placés pendant 16h dans une étuve à 65°C pour la phase de séchage.

Le cycle de type II est basé sur des travaux antérieurs (Stoltz et al., 2014 ; Mehenni, 2015). Le processus d'humidification est similaire au cycle de type I mais la phase dure 48 heures. Cette méthode utilise une chambre climatique (SECASI technologies SH-600 ©) pour imposer la phase de séchage à l'échantillon sous une humidité relative de 50 % et une température de 20°C pendant 5 jours. Cette humidité a été choisie car elle correspond à l'humidité relative moyenne que l'on peut atteindre en été dans la partie nord de la France.

Ainsi le cycle de type I est un cycle plutôt intense alors que le cycle de type II correspond à des conditions d'intensité modérée pouvant être plus représentatives des conditions réelles subies par les ouvrages.

2.3. Quantification du taux de liaison

L'approche développée par Cuccovillo et Coop (1999), basée sur les travaux de Rowe (1962) et le modèle Cam-Clay, permet d'exprimer le travail total dissipé pendant le cisaillement d'un sol en une composante en friction pure et une autre liée à la dégradation progressive des liaisons cimentaires entre les grains du sol. Dans ce contexte, on peut écrire :

$$\Delta W = \Delta W_{fric} + \Delta W_{bond} \quad (1)$$

Avec ΔW_{bond} la perte d'énergie due à la rupture des liaisons cimentaires, ΔW_{fric} la perte d'énergie due à la friction, ΔW le travail total d'un échantillon de sol traité soumis à un cisaillement. En conditions axisymétriques, le travail total peut s'écrire :

$$\Delta W = q \delta \varepsilon_s^p + p' \delta \varepsilon_v^p \quad (2)$$

Dans le cadre théorique du modèle de Cam-Clay, ΔW_{fric} peut s'écrire :

$$\Delta W_{fric} = Mp' \delta \varepsilon_s^p \quad (3)$$

Ainsi en remplaçant dans (1), on peut écrire que :

$$q \delta \varepsilon_s^p + p' \delta \varepsilon_v^p = Mp' \delta \varepsilon_s^p + \Delta W_{bond} \quad \text{d'où} \quad \frac{q}{p'} = M - \frac{\delta \varepsilon_v^p}{\delta \varepsilon_s^p} + \frac{\Delta W_{bond}}{p' \delta \varepsilon_s^p} \quad (4)$$

Ces équations montrent que le rapport des contraintes $\eta = \frac{q}{p'}$ à l'état critique dépend de 3 composantes : de la pente de la ligne d'état critique M , du rapport de dilatance $d = - \frac{\delta \varepsilon_v^p}{\delta \varepsilon_s^p}$ et de la dissipation d'énergie due à la destruction des liaisons cimentaires, le taux de liaison. Le taux de liaison η_{bond} est calculé via l'équation (5) :

$$\eta_{bond} = \frac{\Delta W_{bond}}{p' \delta \varepsilon_s^p} \quad (5)$$

Avec p' la contrainte effective moyenne et $\delta \varepsilon_s^p$ l'incrément des déformations plastiques en cisaillement. On peut donc écrire l'équation (6) :

$$\eta = M + d + \eta_{bond} \quad (6)$$

2.4. Programme expérimental

Des éprouvettes traitées à 1 et 4% de ciment ont été soumises à des cycles d'humidification et de séchage. Les essais triaxiaux ont été réalisés sous des contraintes de confinement de 50, 100 et 200 kPa mais seuls les résultats sous le confinement intermédiaire de 100kPa seront présentés dans cette communication. Six essais ont été doublés afin de vérifier la répétabilité de la préparation des éprouvettes grâce aux résultats triaxiaux.

3. Résultats et discussion

3.1. Effet des cycles sur le comportement en contrainte-déformation

L'effet des différents types de cycles est d'abord étudié sur les courbes de contrainte-déformation et de déformation volumique pour une teneur en ciment de 1%. Une éprouvette témoin, qui n'a pas été soumise aux cycles hydriques, sert de référence pour apprécier l'ampleur de la dégradation. La contrainte déviatorique maximale, q_{max} , de l'éprouvette témoin est d'environ 590 kPa. Ce pic de résistance est diminué avec le type I, la contrainte déviatorique maximale diminue d'environ 30% (Figure 1.a.) lors de ces cycles contre seulement 12% après les cycles de type II (Figure 1.b.). Le module E_{50} diminue au-delà du 6^{ème} cycle de type I alors qu'il reste stable lors des cycles de type II. Les cycles de type I ne semblent pas modifier le comportement volumique pour les éprouvettes traitées avec 1% de ciment excepté pour le 9^{ème} cycle qui diminue l'angle de dilatance (Figure 1.a.). L'apparition de la dilatance semble retardée dans le cas des cycles de type II (Figure 1.b.).

Pour les échantillons traités à 4% de ciment, l'éprouvette témoin présente un q_{max} d'environ 1550 kPa. La contrainte déviatorique maximale, q_{max} est réduite d'environ 27% avec les cycles de type I (Figure 2.a.). Pour les cycles de type II (Figure 2.b.), il y a une diminution de résistance -18%. Les cycles I n'ont pas d'effet significatif sur le module E_{50} et les cycles II ne permettent pas d'extraire une tendance claire (variations non linéaires avec le nombre de cycles). Le comportement volumique est modifié pour les échantillons traités avec 4% de ciment après les cycles de type I (Figure 2.a.) principalement en ce qui concerne l'angle de dilatance qui diminue. Ce comportement ne semble pas modifié par les cycles de type II comme présenté dans la figure 2.b.

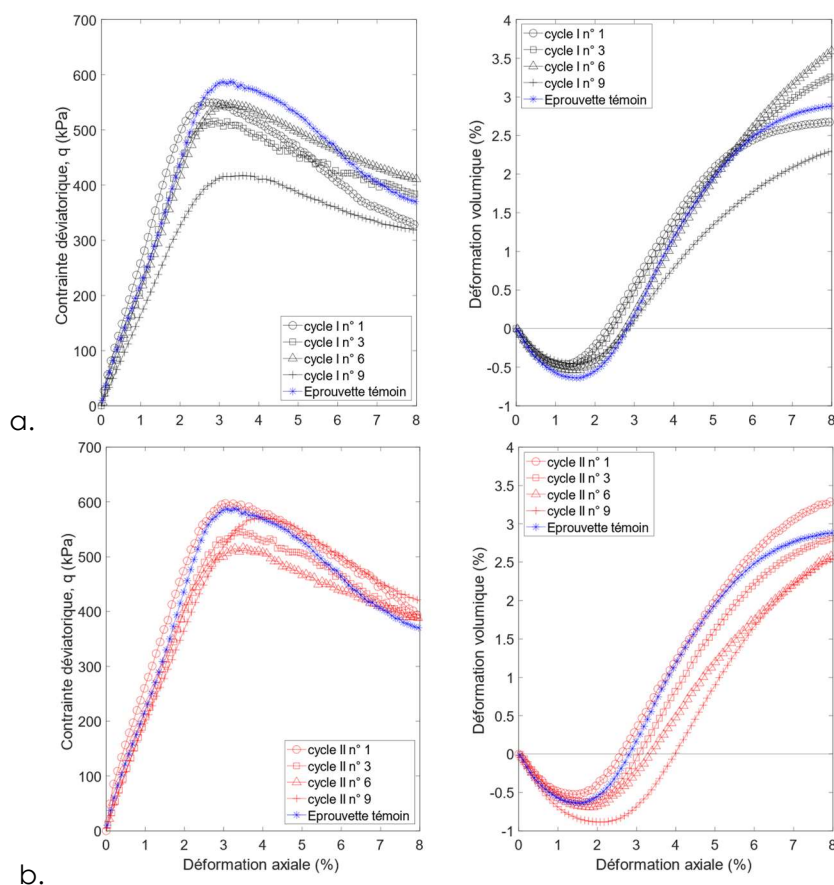


Figure 1: Résultats des essais triaxiaux pour les éprouvettes traitées à 1% a. Cycle I b. Cycle II

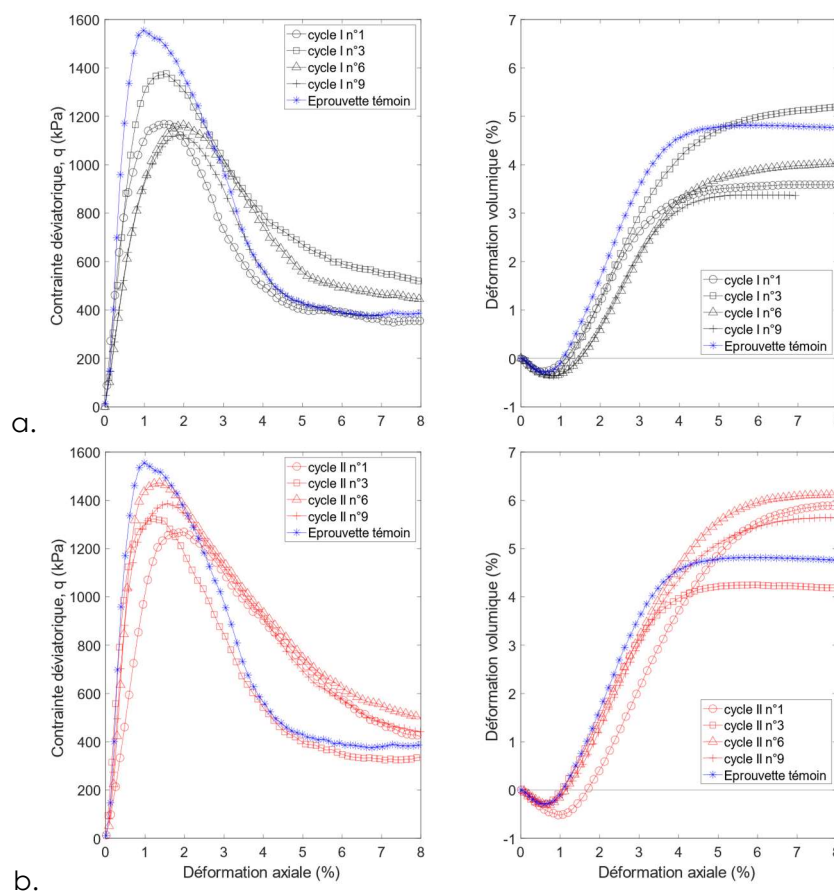


Figure 2: Résultats des essais triaxiaux pour les éprouvettes traitées à 4% a. Cycle I b. Cycle II

3.2. Effet des cycles sur le taux de liaison

Le taux de liaison permet d'estimer la mobilisation des liaisons cimentaires par rapport au frottement pur au cours de l'écrasement, puis leur rupture progressive. Ainsi, à la valeur maximale du taux de liaison, les liaisons seront le plus sollicitées et lors du retour à 0 du taux de liaison, on considère que les liaisons ont été détruites. L'éprouvette témoin traitée à 1% de ciment présente un taux de liaison maximal η_{bond} , d'environ 0,6 alors que l'éprouvette témoin traitée à 4% de ciment a un η_{bond} maximal d'environ 1,8. La figure 3.a. montre que les cycles de type I abaissent le taux de liaison maximal pour une éprouvette avec 1% de ciment. En revanche, les cycles de type II ne semblent pas vraiment diminuer le taux de liaison et aucune tendance claire ne peut être identifiée. Pour les éprouvettes traitées avec 4% de ciment, les mêmes observations que pour les éprouvettes traitées avec 1% de ciment peuvent être faites. Les cycles de type I réduisent le taux de liaison maximal de -30% environ (Figure 3.b.) alors qu'aucune tendance claire n'est perceptible pour les cycles de type II (-15% mais non liée à l'accumulation du nombre de cycles).

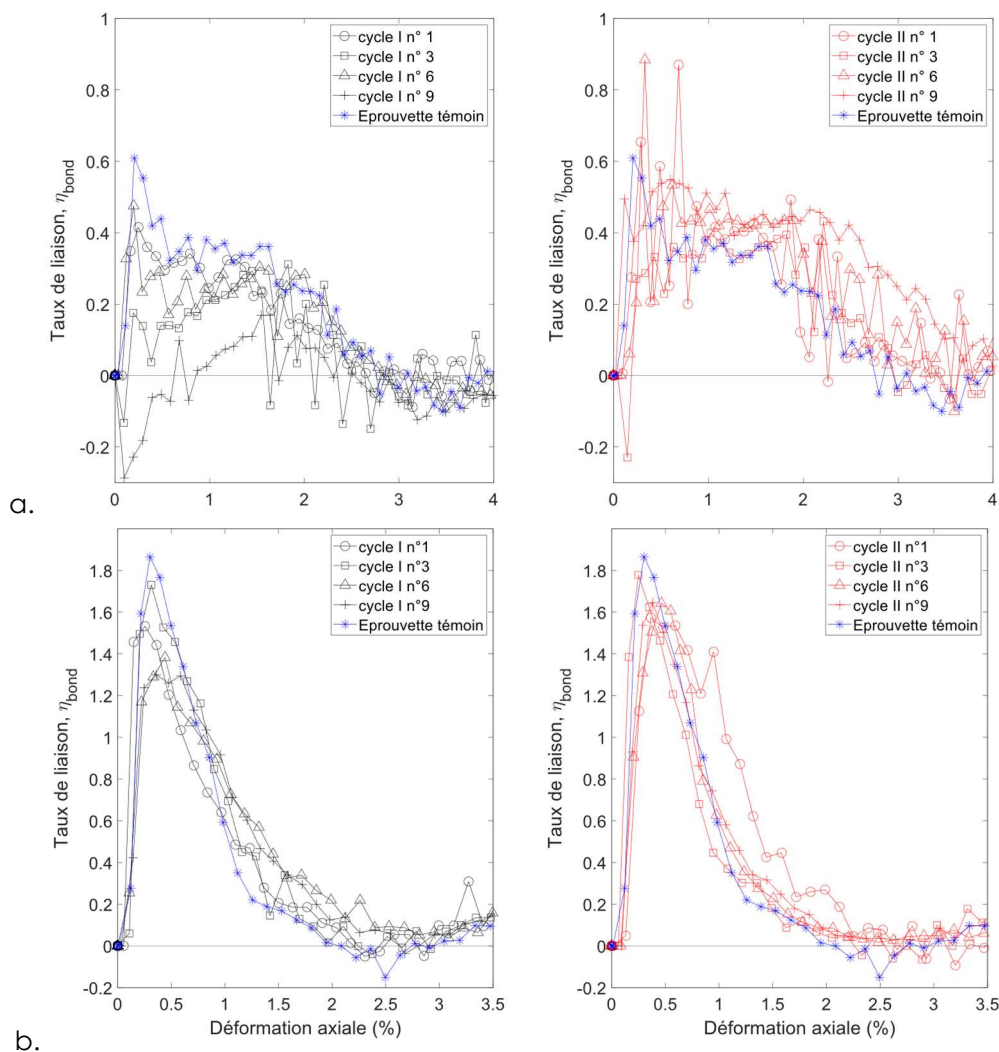


Figure 3: Évolution du taux de liaison a. Traitement à 1% et b. Traitement à 4%

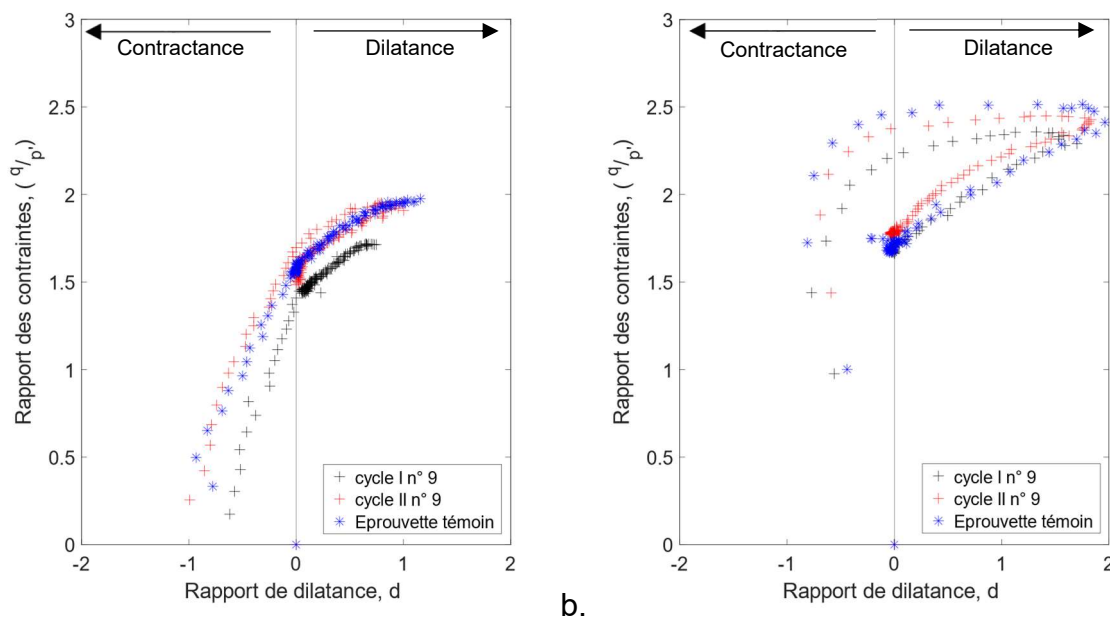
3.3. Discussion

Les résultats obtenus permettent d'évaluer l'impact du type et du nombre de cycles sur le comportement des sols traités au ciment.

Les résultats montrent que pour les éprouvettes traitées à 1% les derniers cycles (type I) semblent imposer une dégradation majeure. Le η_{bond} maximal passe de 0,609 pour l'éprouvette témoin puis s'annule après 9 cycles. Pour 4% de ciment, le premier cycle (type

l) semble conditionner le comportement des échantillons puisque la contrainte déviatorique maximale diminue fortement après un cycle et reste constante ensuite. Le η_{bond} maximal passe de 1,865 pour l'éprouvette témoin à 1,533 après 1 cycle puis 1,383 après 6 cycles. Aucune tendance claire ne se dégage de l'accumulation des cycles de type II.

Il est possible d'apprécier l'altération subie par les éprouvettes en représentant les courbes en contrainte-dilatance et en comparant les éprouvettes témoin avec les résultats après 9 cycles des 2 types. Le rapport des contraintes (q/p') est tracé en fonction du rapport de dilatance (d). Que ce soit pour les éprouvettes traitées à 1% (Figure 4.a.) ou à 4% (Figure 4.b.), on peut voir que les cycles II ne modifient pas significativement le maximum de dilatance, le déviateur des contraintes maximal ou encore la limite d'élasticité. Pour les cycles type I et dans le cas des éprouvettes avec 1%, le maximum du rapport de dilatance passe de 1,2 à 0,75 et la limite d'élasticité est atteinte pour un rapport de contraintes plus faible. Les observations sont identiques pour 4% mais dans de moindres proportions. Le maximum du rapport de dilatance passe de 1,97 à 1,7.



a. b.
Figure 4: Rapport des contraintes (q/p') en fonction du rapport de dilatance (d) a. 1% de ciment
b. 4% de ciment

4. Conclusions

Cette étude a permis d'évaluer l'impact de l'intensité et du nombre de cycles hydriques sur la durabilité des performances des échantillons traités au ciment après l'imposition de ces cycles hydriques. Cette évaluation est basée sur une approche en contrainte-dilatance et notamment sur le taux de liaison qui mesure le gain de performances mécaniques apporté par le traitement et son évolution après deux types de cycles d'intensités différentes.

Le principal effet des cycles de séchage-humidification est d'altérer les liaisons cimentaires, et donc les caractéristiques mécaniques. Cette altération dépend du dosage en ciment mais aussi de l'intensité et du nombre de cycles. En effet, les cycles de type I, plus agressifs, entraînent une dégradation plus importante que les cycles de type II quel que soit le dosage. Pour les éprouvettes traitées à 4% de ciment, les tout premiers cycles semblent apporter l'altération des performances mécaniques la plus significative. Pour celles traitées à 1% en revanche, l'accumulation du nombre de cycles entraîne une dégradation plus progressive. Le taux de liaison a permis de quantifier l'effet du traitement et son évolution avec les cycles. Il faut noter toutefois que l'interprétation de ce taux est moins aisée quand le dosage en ciment est faible.

Afin de valider ces observations, une série d'éprouvettes est en cours de fabrication pour effectuer un plus grand nombre de cycles (12, 15 et 18 cycles). Cela permettra de confirmer ou d'infirmer les tendances constatées jusqu'à 9 cycles. Un troisième dosage intermédiaire, 2% de ciment, sera également soumis au même programme expérimental pour voir l'évolution de l'altération avec le nombre de cycles en fonction du dosage en ciment. Enfin, des analyses microstructurales (notamment à l'aide d'analyses au microscope) permettront de préciser le mécanisme de dégradation.

5. Remerciements

Ce travail a été réalisé en partie dans le cadre du projet MSCA-RISE GEORES financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne à travers l'accord de subvention n°778120.

6. Références bibliographiques

- ASTM, 2015. D559/D559M – 15: Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures.
- Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng. Geology* 42, 223–237.
- Brandl, H., 1981. Alteration of Soil Parameters by Stabilization with Lime. Presented at the 10th International Conference on Soil Mechanics and foundation Engineering, pp. 587–594.
- Chittoori, B.S., Puppala, A.J., Saride, S., Nazarian, S., Hoyos, L.R., 2008. Durability studies of lime stabilized clayey soils, in: *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Chiu, C.F., Zhu, W., Zhang, C.L., 2009. Yielding and shear behaviour of cement-treated dredged materials. *Engineering Geology* 103, 1–12.
- Consoli, N.C., Marques, S.F.V., Floss, M.F., Festugato, L., 2017. Broad-Spectrum Empirical Correlation Determining Tensile and Compressive Strength of Cement-Bonded Clean Granular Soils. *J. Mater. Civ. Eng.* 29, 1–7.
- Cuccovillo, T., Coop, M.R., 1999. On the mechanics of structured sands. *Géotechnique* 49, 741–760.
- Cuisinier, O., Masrouri, F., 2020. Impact of wetting/drying cycles on the hydromechanical behaviour of a treated soil. *E3S Web Conf.* 195, 1–6.
- Dadda, A., Geindreau, C., Emeriault, F., Rolland du Roscoat, S., Esnault Filet, A., Garandet, A., 2019. Characterization of contact properties in biocemented sand using 3D X-ray microtomography. *Acta Geotech.* 14, 597–613.
- Kelley, C.M., 1988. A long range durability study of lime stabilized bases at military posts in the southwest. *National Lime Association, Bulletin* 328.
- Khattab, S.A., Al-Mukhtar, M., Fleureau, J.-M., 2007. Long-Term Stability Characteristics of a Lime-Treated Plastic Soil. *J. Mater. Civ. Eng.* 19, 358–366.
- Leroueil, S., Vaughan, P.R., 1990. The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique* 40, 467–488.
- Mehenni, A., 2015. Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités. Université de Lorraine.
- Packard, R.G., Chapman, G.A., 1963. Developments in Durability Testing of Soil-Cement Mixtures. *Highway Research Record* 36, 97–123.
- Rowe, P.W., 1962. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proc. R. Soc. Lond. A* 269, 500–527.
- Stoltz, G., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2014. Weathering of a lime-treated clayey soil by drying and wetting cycles. *Engineering Geology* 181, 281–289.
- Wang, L., Chu, J., Wu, S., Wang, H., 2021. Stress–dilatancy behavior of cemented sand: comparison between bonding provided by cement and biocement. *Acta Geotech.* 16, 1441–1456.