

VALORISATION D'UN SOL GROSSIER PAR TRAITEMENT A LA CHAUX : APPLICATION AUX PROBLEMES D'EROSION INTERNE. COARSE SOIL VALORIZATION BY LIME TREATMENT: APPLICATION TO INTERNAL EROSION PROBLEMS.

Radja Elandaloussi¹, Abdelkrim Bennabi², Jean Claude Dupla¹, Jean Canou¹, Ahmed Benamar³, Philippe Gottland⁴.

¹ *Ecole des Ponts ParisTech, UR Navier, CERMES, 6 et 8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, Champs-sur-Marne, 77455 Marne-la-Vallée cedex 2, France.*

² *Université Paris-Est, Institut de Recherche en Constructibilité, ESTP, F-94230, France*

³ *Normandie Université, UNIHAVRE, CNRS, LOMC, 76600 Le Havre, France.*

⁴ *Fédération Nationale des Travaux Publics*

RÉSUMÉ – La présente étude porte sur l'amélioration du comportement d'un sol grossier vis-à-vis de l'érosion interne. Ce sol, constitué de 20% d'éléments fins dont 8% d'argile, a été traité à la chaux puis soumis à un ensemble d'essais d'érosion et d'observations microstructurales. La résistance à l'érosion interne semble être améliorée, grâce aux changements microstructuraux malgré le faible pourcentage d'argile présent dans le sol.

ABSTRACT –The present study focuses on the improvements in the erosion behavior of coarse soil. This soil, consisting of 20% of fine elements including 8% of clay, was treated with lime then subjected to a set of erosion tests and microstructural observations. The resistance to internal erosion seems to be improved thanks to microstructural changes in spite of the low percentage of clay.

1. Introduction

Dans la construction d'ouvrages hydrauliques, les matériaux utilisés sont souvent apportés de région lointaine. Les matériaux excavés à proximité du chantier sont considérés comme des sols grossiers impropres à l'utilisation en corps de digue car souvent ils présentent une susceptibilité à l'érosion interne par suffusion. Cette dernière est testée en se basant sur les critères suivants Terzaghi (1922), Kezdi (1979), Kenney and Lau (1985) et Burenkova (1993). Valoriser ces sols reviendrait donc à réduire l'enveloppe financière du projet et à respecter le délai de construction de ce dernier.

Le traitement à la chaux est une solution potentielle qui peut être envisagée pour le réemploi de ces sols. Technique classique utilisée depuis quelques décennies dans le domaine des terrassements. Elle permet d'améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques de certains sols fins.

L'objectif principal de cette étude est de montrer que la technique de traitement à la chaux peut être appliquée à un sol grossier. A cet effet, une campagne d'essais d'érosion a été réalisée. Elle mettra en évidence l'influence du dosage de chaux (1 et 3 %) et du temps de cure (1, 7, 28 et 90 jours). A cette campagne se greffe une étude microstructurale, elle permettra d'étayer les hypothèses émises concernant les améliorations observées.

2. Matériaux

Pour assurer une bonne répétabilité des essais envisagés dans cette étude, le sol utilisé, représentatif d'un sol de référence, est reconstitué au laboratoire à partir de

matériaux naturels. Le sol de référence, originaire des stocks de Saint Pierre de Bœuf de la région Lyonnaise, est un sol de classe B (sableux- graveleux avec présence de fines). Ce sol se caractérise essentiellement par une courbe granulométrique discontinue (Figure 1). Il couvre une large gamme granulométrique, caractérisée par un pourcentage de fines ($< 80 \mu\text{m}$) d'environ 20 % et une discontinuité entre 1 et 4 mm. Par ailleurs, ce sol présente une instabilité vis-à-vis de la suffusion, ce qui le rend impropre à l'utilisation en corps de digue.

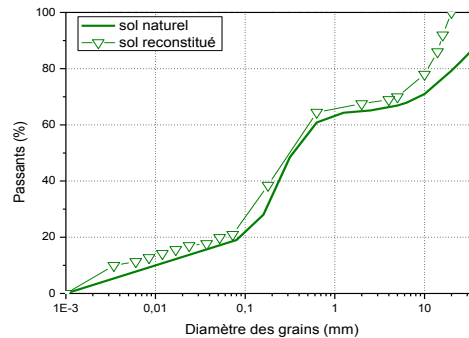


Figure 1. Courbe granulométrique du sol utilisé.

3. Dispositif d'essai d'érosion

Le dispositif expérimental, développé lors des travaux de Elandalousi (2015), consiste à établir un écoulement d'eau vertical à travers un échantillon de sol mis en place dans une colonne cylindrique. Ce dispositif est constitué d'une colonne de suffusion en plexiglas, d'un système de collecte de l'effluent, d'un dispositif de chargement hydraulique automatisé, d'un système de mesure et d'un dispositif de commande et d'acquisition des données. Un schéma général est présenté sur la Figure 2.

La colonne de suffusion permet la réalisation d'essais sur des échantillons de 250 mm de diamètre et 500 mm de hauteur maximale (160 mm dans le cas de cette étude).

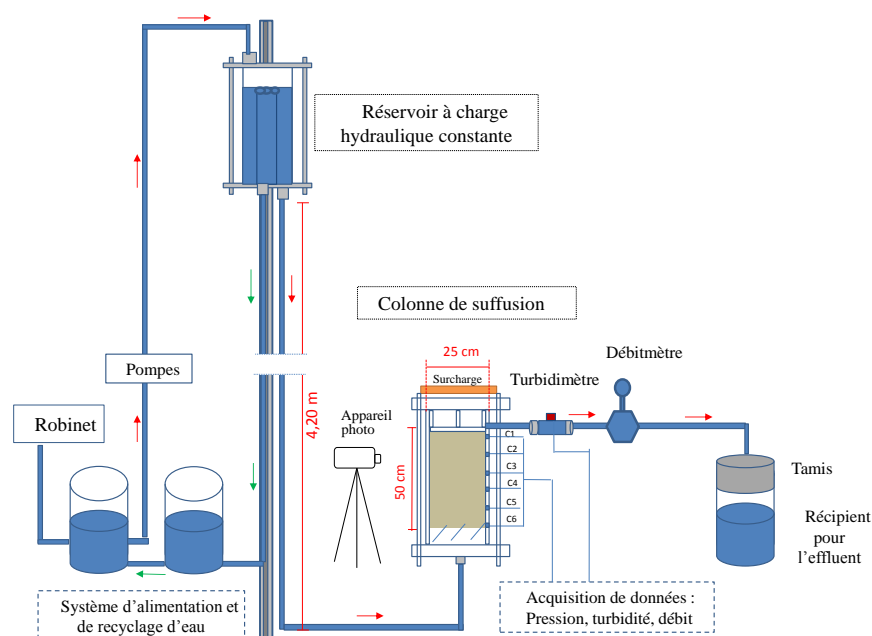


Figure 2. Schéma général du dispositif d'essai de suffusion (Elandalousi, 2015).

4. Essais microstructuraux

L'évolution au cours du temps de la microstructure du sol traité à la chaux en comparaison avec celle du sol non traité a été réalisée en effectuant des analyses de la distribution porale par la technique de porosimétrie à intrusion de mercure (PIM). Afin de mieux connaître la gamme granulométrique des échantillons étudiés, des essais de granulométrie laser ont été effectués au préalable.

Pour des raisons techniques, les échantillons utilisés durant cette campagne microstructurale ont été lyophilisés au préalable.

5. Résultats et discussion

Dans un premier temps nous allons tenter de décrire et expliquer les phénomènes observés lors des essais sur colonne d'érosion, puis d'étayer les hypothèses émises avec les résultats obtenus lors de l'analyse microstructurale.

5.1. Essais d'érosion

On rappelle que dans un premier temps une étude a été réalisée sur le sol non traité puis dans un second temps sur le sol traité en prenant en compte deux dosages en chaux s (1 et 3% de CaO) à différent temps de cure (1, 7, 28 et 90 jours). **Le Erreur ! Source du renvoi introuvable.** synthétise le programme expérimental réalisé.

Dans cette étude, les résultats sont exprimés en termes de débit d'écoulement, et de répartition des pressions le long de la colonne.

Tableau 1 : Paramètres géométriques et physiques des sols à l'état initial

| Essai | Paramètres géométriques | Paramètres physiques | | | Paramètres de traitement | |
|-------|-------------------------|----------------------|------------------------------|-------|--------------------------|-----------------------|
| | Hauteur (cm) | w_{opt} (%) | ρ_d (t/m ³) | W (%) | Dosage en chaux (%) | Temps de cure (jours) |
| A 01 | 16 | 95 | 2 | 13,0 | 0 | 0 |
| B 01 | 16 | 95 | 1,93 | 13,0 | 1 | 1 |
| B 02 | 16 | 95 | 1,93 | 13,0 | 1 | 1 |
| B 03 | 16 | 95 | 1,93 | 13,0 | 1 | 7 |
| B 04 | 16 | 95 | 1,93 | 13,0 | 1 | 7 |
| B 05 | 16 | 95 | 1,93 | 13,0 | 1 | 28 |
| B 06 | 16 | 95 | 1,93 | 13,0 | 1 | 90 |
| C 01 | 16 | 95 | 1,88 | 13,6 | 3 | 1 |
| C 02 | 16 | 95 | 1,88 | 13,6 | 3 | 1 |
| C 03 | 16 | 95 | 1,88 | 13,6 | 3 | 7 |
| C 04 | 16 | 95 | 1,88 | 13,6 | 3 | 7 |
| C 05 | 16 | 95 | 1,88 | 13,6 | 3 | 28 |
| C 06 | 16 | 95 | 1,88 | 13,6 | 3 | 90 |

5.1.1. Sol non traité – cas de l'érosion interne

La Figure 3-(a) présente l'évolution temporelle des pressions sur les trois capteurs C1, C2 et C3. Nous constatons une baisse générale de pression 5 minutes après l'application du gradient $i = 3$. Cette baisse est plus prononcée au niveau du capteur C3 situé à l'entrée de l'échantillon. La pression au niveau du capteur C3 passe de 5,3 à 1,7 kPa, alors que celle du capteur C2 passe de 1,5 à 1,0 kPa. Cette chute de pression à l'entrée de l'échantillon peut être expliquée par le départ de particules (débouillage local) laissant le

passage libre à l'eau. Le fort gradient local au début de l'essai en amont correspond à l'accumulation de particules érodées et filtrées par la matrice du sol.

La Figure 3-(b) illustre l'évolution du débit au cours de la phase de chargement. Lors de l'application du gradient $i = 3$, on constate une augmentation de débit, probablement dû à un départ de particules, la valeur du débit atteint $1,5 \text{ cm}^3/\text{s}$. Puis, on constate des fluctuations de débit révélatrices d'une restructuration du sol. Lors de l'application du gradient $i = 4$, la valeur du débit se stabilise autour de $1,9 \text{ cm}^3/\text{s}$ et au gradient $i = 5$ on constate une légère baisse du débit au cours des 30 premières minutes avant que ce dernier ne se stabilise autour de $2 \text{ cm}^3/\text{s}$. Ces résultats montrent que même si les gradients locaux se stabilisent, le débit continue à fluctuer en raison de la variation des perméabilités locales (formation de chemins préférentiels d'écoulement).

La Figure 4 illustre l'état de l'éprouvette à la fin de l'essai. On constate qu'il y a effectivement un débouillage local au niveau de deux zones différentes.

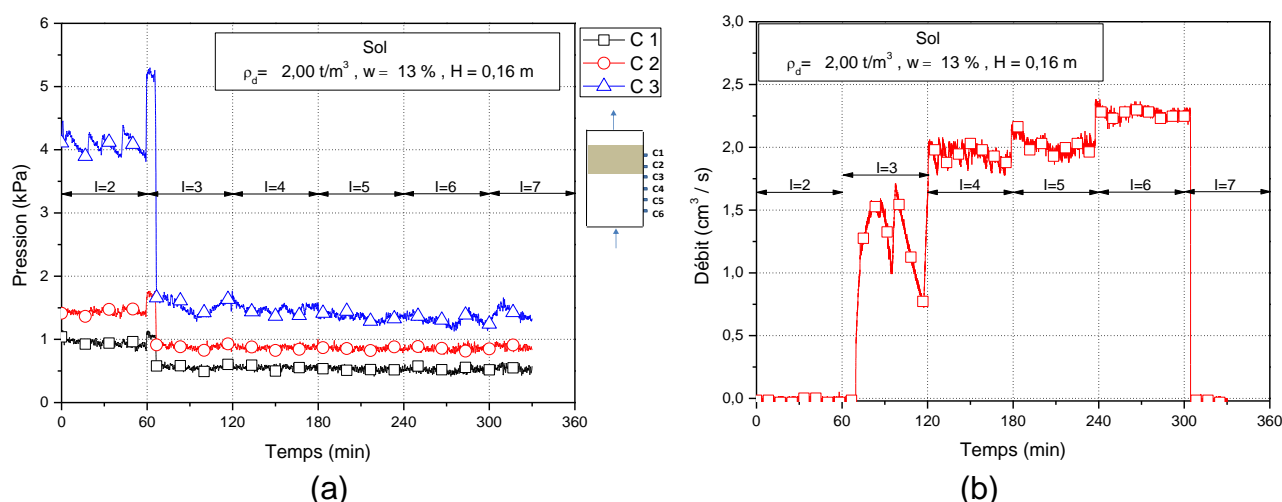


Figure 3. Résultats obtenus pendant la phase de chargement (cas du sol non traité) : (a) Évolution des pressions, (b) Évolution du débit.

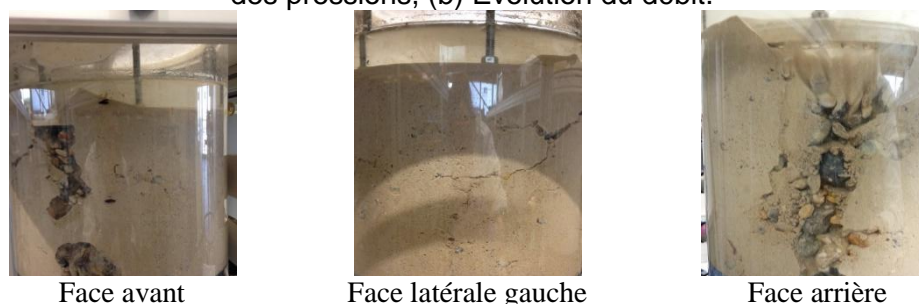


Figure 4. Images de l'éprouvette prises à la fin de l'essai ($i = 6$) : cas du sol non traité sous écoulement ascendant.

5.1.2. Sol traité – comportement hydromécanique

Pour mieux comprendre, le comportement du sol traité, nous nous sommes intéressés dans un premiers temps au sol traité à 1% de chaux pour 24h de cure (Figure 5).

Comme on peut le voir sur la Figure 5-(a), une baisse de la pression est constatée au niveau du capteur C1 lors de l'application du gradient $i = 5$. On suppose que cette baisse de pression est la conséquence directe de l'amorçement de la fracturation. A ce stade de chargement hydraulique les fissures ne sont pas visibles à l'œil mais il existe probablement des micro-fissures qui favorisent le chemin préférentiel de l'eau réduisant

ainsi la pression dans l'éprouvette (Figure 6-a). La pression qui correspond au début de ce phénomène sera appelée pression de fracturation mesurée ($P_{\text{frac.mesur}}$). Au palier correspondant à $i = 6$, des petites fracturations deviennent visibles dans l'échantillon (Figure 6-b) et sont suivies d'un décollement soudain d'une partie de l'échantillon créant ainsi une poche d'eau (Figure 6-c), la pression correspondant à la création de la poche d'eau sera appelée ($P_{\text{Poche d'eau}}$).

L'évolution du débit (Figure 5-b) montre une valeur pratiquement constante pour les premiers paliers de chargement, autour de $0,5 \text{ cm}^3/\text{s}$. Lors de l'application du gradient $i = 5$, une légère augmentation du débit est observée ($0,7 \text{ cm}^3/\text{s}$), elle peut être expliquée par l'initiation du processus de fracturation, invisible à l'œil nu à ce stade de chargement. Au gradient $i = 6$, l'augmentation du débit est importante ($1,5 \text{ cm}^3/\text{s}$) avec apparition des premières fracturations. Ce débit baisse au cours du temps jusqu'à l'application du dernier gradient $i = 7$, moment où la poche d'eau se forme. Le débit maximal enregistré atteint $2,7 \text{ cm}^3/\text{s}$.

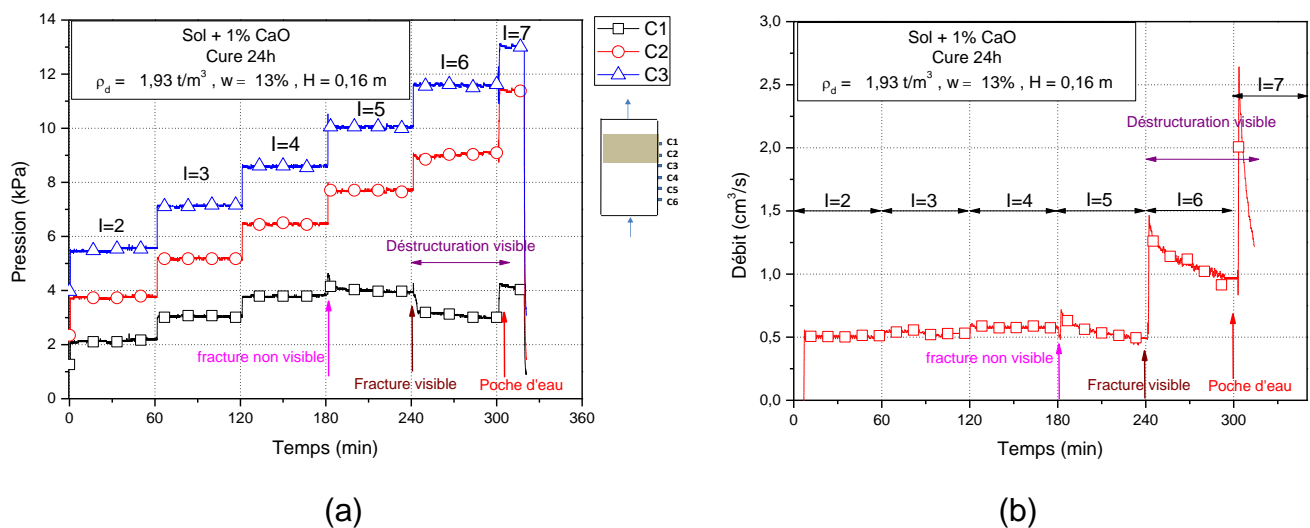


Figure 5- Résultats obtenus pendant la phase de chargement (cas du sol traité) : (a) Évolution des pressions, (b) Évolution du débit.

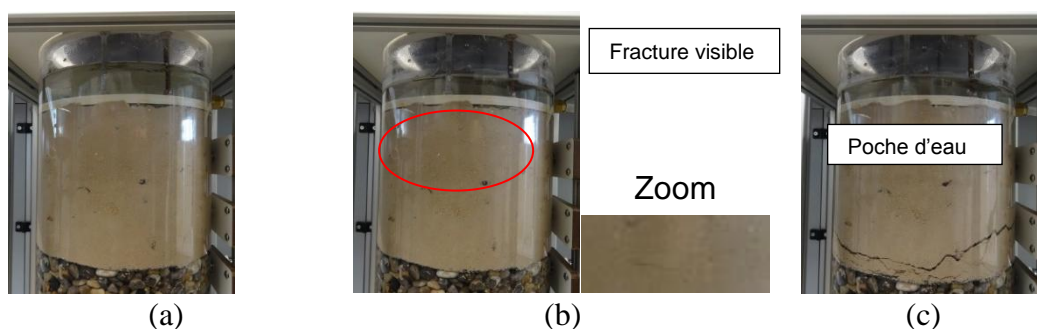


Figure 6 - Évolution de la fracturation au cours du temps : (a) $i = 5$, (b) $i = 6$, (c) $i = 7$

5.1.3. Effet du dosage et du temps de cure

La Figure 7 présente l'effet du dosage en chaux et du temps de cure sur l'apparition de la fracturation.

L'augmentation du dosage en chaux semble ne pas apporter d'améliorations significatives à la pression de fracturation, une différence de seulement 2kPa entre les deux dosages est observée. Ceci montre que le traitement à 1% de chaux est efficace. Néanmoins le dosage semble affecter la résistance de formation de la poche d'eau. On constate une résistance plus importante pour un dosage de 3% de chaux.

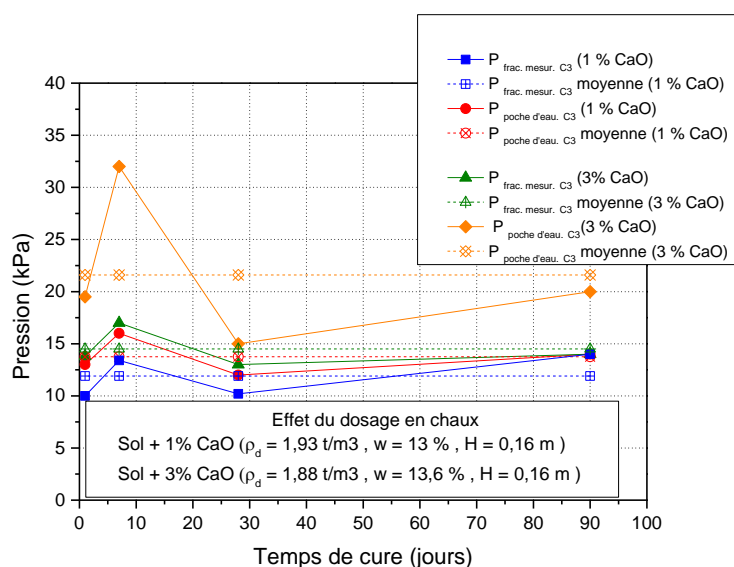


Figure 7 : Evaluation de la pression hydraulique de rupture en fonction du dosage et du temps de cure

5.2. Résultats des essais microstructuraux

5.2.1. Analyse au granulomètre laser

La granulométrie laser a été réalisée sur des échantillons dont le diamètre des plus gros grains est inférieur ou égal à 2 mm. La Figure 8-a montre les résultats de l'analyse granulométrique obtenus après 24 heures de cure. On constate un changement de granulométrie, le diamètre moyen D_{50} passant de 150 μm pour le sol non traité à 200 μm pour le sol traité quel que soit le pourcentage de chaux (1 % ou 3%), ceci vient confirmer le phénomène de floculation et d'agglomération qui se produit instantanément après l'échange cationique. Ce phénomène est vérifié dans la Figure 8-b par la disparition d'une famille de grains centrée autour de 20 μm de diamètre, car les grains de cette famille se sont rapprocher les uns aux autres pour former des floes de diamètre plus grands que les grains initiaux (Locat et al. 1996, Lasledj 2009).

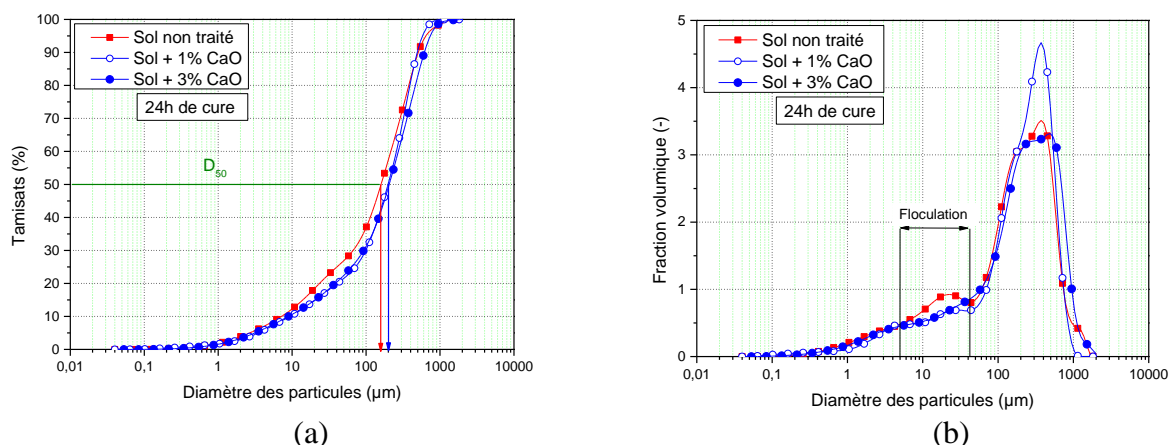


Figure 8. Analyse granulométrique : (a) Courbe granulométrique des sols étudiés à court terme, (b) Distribution de la taille des grains des sols étudiés à court terme

Afin d'étudier l'évolution de la taille des grains en fonction du temps de cure, d'autres essais ont été réalisés après 7 et 28 jours de cure. Les résultats obtenus dans la Figure 9 montrent que le changement de granulométrie s'effectue uniquement durant les 24 premières heures de cure.

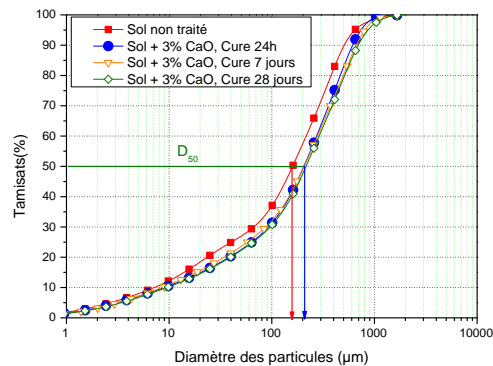


Figure 9 : Evolution de la granulométrie en fonction du temps de cure

5.2.2. Distribution de la porosité (Porosimétrie à mercure)

L'essai de PIM nous renseigne sur la distribution porale comprise entre $0,0072 \mu\text{m}$ et $400 \mu\text{m}$. Pour déterminer de façon quantitative l'effet du traitement à la chaux sur l'évolution de la porosité, trois familles de pores sont définies : les nanopores ($0,0072 - 4 \text{ nm}$), les mésopores (4 nm à $50 \mu\text{m}$) et les macropores ($>5 \mu\text{m}$).

La Figure 10 présente les courbes de l'intrusion cumulée de mercure en fonction du pourcentage de chaux et du temps de cure. Au bout de 24h de cure, on constate que le volume poral total passe de 38 % à 65% et 80% pour le sol traité respectivement à 1% et 3% de CaO. Ceci peut être la conséquence de la floculation et de l'agglomération des particules engendrant un vide inter et intra-particulaire plus important.

En fonction du temps de cure, le volume poral total diminue progressivement pour atteindre environ 50% au bout de 365 jours de cure et cela, quel que soit le dosage en chaux.

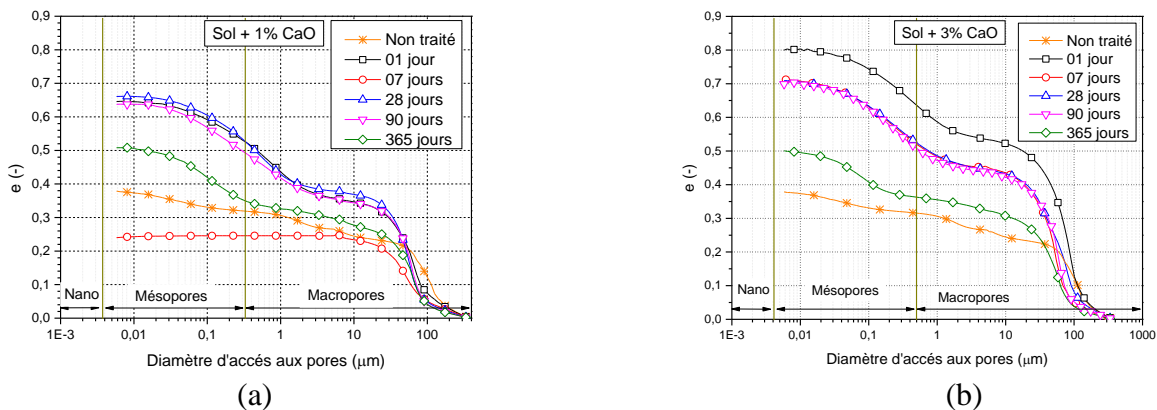


Figure 10 : Courbes de l'intrusion cumulée de mercure : (a) Sol + 1% CaO, (b) Sol + 3% CaO

Conclusion

Le travail réalisé a consisté à étudier les améliorations apportées par le traitement à la chaux sur un sol grossier afin de pouvoir l'utiliser en corps de digue. Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que l'efficacité du traitement apparaît après 24 heures de cure. En effet, à l'érosion interne du sol non traité pour une valeur du gradient hydraulique relativement faible ($i = 3$) se substitue une fracturation hydraulique du sol traité à 1% de chaux et 24 heures de cure, pour une valeur du gradient hydraulique beaucoup plus importante ($i = 5$). L'augmentation du temps de cure jusqu'à trois mois ne semble pas entraîner de changement significatif dans l'efficacité du traitement à la chaux.

Cette stabilisation relativement rapide semble être liée à l'agglomération des particules fines. Le traitement à 3 % de chaux semble apporter des améliorations en termes de pression-seuil d'apparition de poche d'eau, mais ne semble pas avoir d'influence sur la résistance à la formation des micro et petites fissures, condition importante pour conclure quant à la bonne tenue du sol vis-à-vis de l'érosion interne.

Les résultats de la microstructure montrent une augmentation du volume des pores en général et plus particulièrement dans la famille des microspores. Ce phénomène entraîne une augmentation des constriction, mais l'agglomération de fines particules autour des particules de sable semble empêcher ce départ et ainsi stabiliser le sol contre les problèmes d'érosion interne.

Afin d'étayer cette étude de faisabilité, il serait intéressant tester l'applicabilité du traitement à la chaux sur différents sols grossiers instables à l'érosion interne et d'établir une comparaison des comportements post traitement avant de passer aux études de stabilité des digues sur échelle réduite en utilisant des canaux à houle.

Références bibliographiques

- Burenkova V. (1993). Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils. In the 1st International Conference Geo-filters, 357-360. Karlsruhe, Germany, Belkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Elandaloussi (2015). Etude du renforcement/confortement des ouvrages de protection contre les inondations et l'érosion interne. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.
- Istomina V.S. (1957). Filtration Stability of Soils (in Russian). Gostroizdat, Moscow, Leningrad.
- Kenney T.C., Lau D. (1985). Internal Stability of Granular Filters. Canadian Geotechnical Journal 22, No. 2, 215-225.
- Kezdi A. (1969). Increase of Protective Capacity of Flood Control Dikes. Department of geotechnics, Technical university of Budapest.
- Lasledj A. (2009). Traitement des sols argileux à la chaux : processus physico-chimique et propriétés géotechniques. Thèse de doctorat. Université d'Orléans, France.
- Locat J, Tremblay H, Lerouel S. (1996). Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime. Canadian Geotechnical Journal. vol. 33, n° 4, pp 654 – 669.
- Terzaghi K. (1939). Soil Mechanics: A New Chapter in Engineering Science. Journal of civil Engineering No.12: 106-141.