

DURABILITE D'UN SOL TRAITÉ A LA CHAUX EN ENVIRONNEMENT MARITIME: METHODOLOGIE DE L'ETUDE

DURABILITY OF LIME TREATED SOIL IN MARINE ENVIRONMENT: METHODOLOGY FOR A LABORATORY STUDY

M. De Baecque¹, C. Chevalier¹, M. Le Feuvre¹, S. Palma Lopes¹, P. Reiffsteck¹
¹IFSTTAR, GERS, Marne-la-vallée, Bouguenais & Salon de Provence, France

RÉSUMÉ – Dans le but d'étudier la durabilité du matériau 'sol-chaux' une méthode de vieillissement accéléré reproduisant les contraintes environnementales s'appliquant sur une digue maritime est proposée. Les évolutions des propriétés mécaniques, microstructurales et de la résistance à l'érosion sont suivies sur des échantillons au laboratoire, par des essais destructifs et géophysiques.

ABSTRACT – In order to study the lime-treated soil durability, a method of accelerated aging is proposed. It reproduces the environmental stress applied on a marine dike. Mechanical properties, microstructural properties and resistance to erosion are parameters followed on lab samples during the aging. Destructive tests and geophysical test are performed.

1. Introduction

Le traitement des sols fins trop humides à la chaux est une technique de valorisation des matériaux éprouvée et reconnue dans le domaine du terrassement. Cependant, son application dans le domaine des ouvrages hydrauliques reste marginale du fait de la méconnaissance du comportement au long terme du matériau « sol-chaux » dans ce type d'ouvrage.

L'étude de la durabilité d'un matériau s'appuie sur l'évaluation de la vitesse d'évolution de ses propriétés dans un environnement donné. En environnement maritime et côtier, la salinité et les alternances immersions-émersions sont deux sollicitations majeures susceptibles de détériorer les propriétés initiales d'un matériau. Dans la littérature, les travaux sur la durabilité des sols traités ciblent l'impact du temps de cure et parfois des cycles hydriques sur les propriétés mécaniques et hydromécanique du matériau (Guney et al. 2007; Khattab et al. 2007; Le Runigo et al. 2011; Stoltz et al. 2014; Mehenni 2015). Or d'autres propriétés du matériau sont également à prendre en compte, comme la résistance à l'érosion interne ou externe, ces processus d'érosion étant à l'origine de 98% des ruptures d'ouvrages hydrauliques (Foster et al. 2000; Mehenni 2015). De plus, dans le cas des sols traités à la chaux, très peu de travaux existent quant à l'influence de la salinité sur le comportement au long terme du matériau. Dans la perspective de la construction d'une digue maritime expérimentale en sol-chaux (projet CPER-FEDER PACA Digue 2020), une étude multiphysique de la durabilité du matériau est menée au laboratoire. L'objectif est d'accélérer le vieillissement du matériau par l'imposition cyclique des sollicitations environnementales et de caractériser le matériau à différents stades. L'influence des paramètres initiaux du matériau sur son comportement au cours du temps et sur sa durabilité est étudiée pour établir des critères de durabilité.

Les caractéristiques du sol brut et les formulations des mélanges sont présentées dans une première partie, suivie dans une seconde partie de la description des sollicitations appliquées sur le matériau. Les sollicitations environnementales sont simplifiées et limitées à l'étude de l'impact de l'eau salée et des cycles hydriques sur les propriétés du matériau. La dernière partie présente les types de caractérisations du matériau (érosion, mécanique, microstructure, géophysique) et les premiers résultats de l'étude.

2. Matériaux

2.1 Sol naturel

L'étude est menée sur un limon prélevé dans la commune de Salin de Giraud proche de l'embouchure du Grand Rhône. Le matériau a été homogénéisé en chantier et stocké dans des Big-bag à l'air libre. Ce sol est commun pour toutes les études réalisées dans le cadre du consortium Digue2020.

Les caractéristiques géotechniques et physico-chimiques du limon ont été déterminées à partir des différentes normes d'identification en vigueur dans le domaine des terrassements (XP P94.041; XP P94.057; NF P94-052-1; NF P94-068). Quelques résultats sont présentés dans le Tableau 1 et sur la Figure 1.

Tableau 1. Quelques caractéristiques du limon de Salin de Giraud

pH du sol	Concentration ionique de l'eau interstitielle	Limite de liquidité	VBS
8,6	1,6 g/L	26,2	1,10g/100g

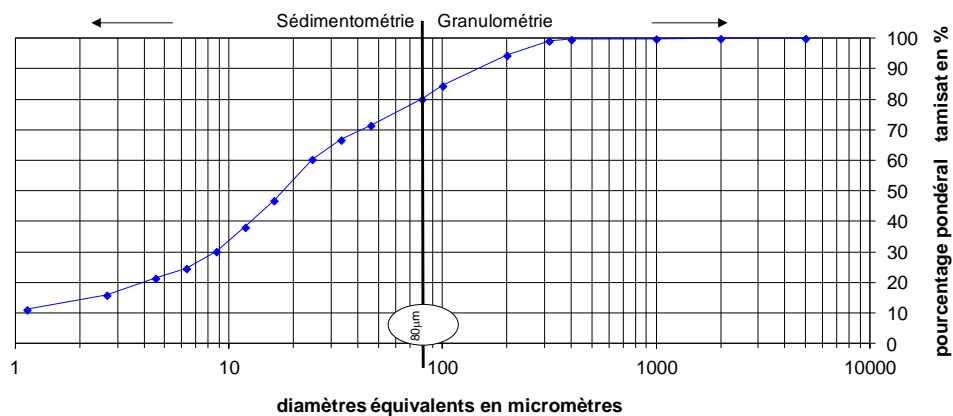


Figure 1. Répartition granulométrique du limon des Salins de Giraud. La fraction argileuse est égale à 15% en masse.

2.2 Chaux

La chaux vive utilisée répond à la norme NF EN 459-1 pour les chaux de construction. Il s'agit du produit Proviacal DD (classe CL 90 Q -R5, P2). Ces caractéristiques sont détaillées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques de la chaux vive utilisée

CaO libre	Réactivité (t_{60})
>80%	<10min

2.3 Formulation des mélanges

Le traitement est réalisé pour deux teneurs en chaux différentes, soit 1% et 2% de la masse sèche de sol. Le dosage à 1% correspond au point de fixation de la chaux (PFC) de ce sol, déterminée à partir d'un essai pH selon la norme ASTM D6276 (Figure 2).

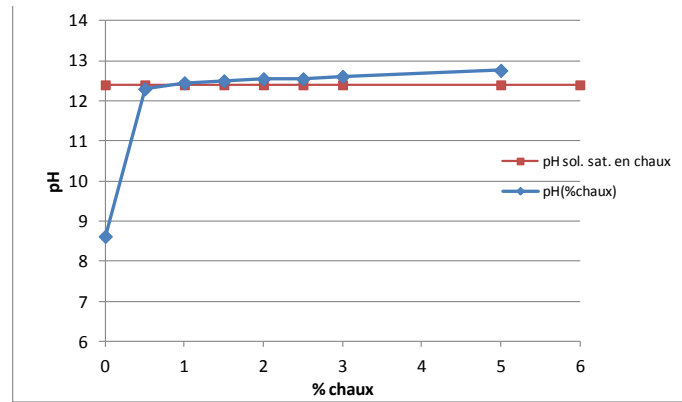


Figure 2. Evolution du pH en fonction du pourcentage massique de chaux ajoutée dans les solutions sol+eau distillée. Détermination du point de fixation de la chaux.

A court terme, l'amélioration de performance mécanique des sols est optimale pour un dosage égal au PFC (Le Roux et Rivière 1969; Bell 1996; Mehenni 2015). En revanche à long terme les performances des sols peuvent être améliorées en augmentant le dosage en chaux (Locat, Bérubé, et Choquette 1990; Nguyen 2015). Il est préconisé dans la profession de viser au moins 1% au dessus du PFC. Le dosage choisi à 2% correspond donc aux préconisations de la profession des terrassements (Technique, G. 2000) et a pour but de connaître l'influence d'un dosage supérieur au PFC sur la durabilité du matériau.

Un lot d'éprouvette est préparé sans traitement par ailleurs, pour connaître les propriétés du sol naturel et distinguer les performances liées au sol de celles liées au traitement.

2.4 Propriétés de compactage

Des courbes Proctor sont réalisées pour le sol naturel et pour les traitements à 1% et 2% de chaux (Figure 3).

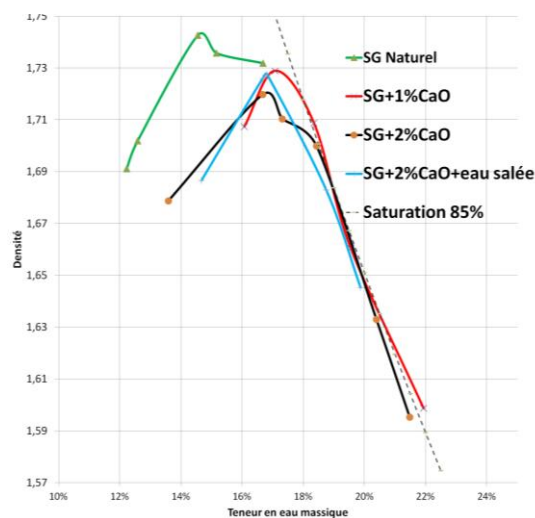


Figure 3. Courbe Proctor Normal pour le limon SG naturel et traité à 1% et 2% de chaux

Les éprouvettes dans notre étude sont compactées dynamiquement en 7 couches de 20mm d'épaisseur dans des moules de 70mm de diamètre et de 140 mm de hauteur, avec un objectif de 98% de γ_{dOPN} à w_{OPN+1} , conditions pour lesquelles la perméabilité du matériau est la plus faible (Le Runigo et al. 2011; Cuisinier et al. 2011; Herrier et al. 2013).

La densité, vérifiée sur plusieurs échantillons par gamma-densimétrie, s'avère homogène entre les différentes couches compactées.

3. Vieillissement accéléré au laboratoire

Dans cette partie, le terme vieillissement décrit la fatigue du matériau engendré par l'environnement.

3.1 Évaluation des variations environnementales et conséquences sur les paramètres d'état hydrique du matériau.

Le protocole de vieillissement accéléré des matériaux tend à reproduire au laboratoire les contraintes environnementales s'appliquant sur une digue maritime (protection contre les submersions marines). L'instrumentation des digues (sondes TDR, monitoring géophysique) est récente et ponctuelle ce qui rend difficile la connaissance précise de l'intensité, de la fréquence et des conséquences sur le matériau des variations météorologiques. Le projet TerDOUEST (ANR-07-PGCU-0006) avait permis de suivre l'évolution de la teneur en eau à différentes profondeurs dans un remblai en sol traité à la chaux. L'ouvrage se trouve à Héricourt (Haute-Saône). Les données acquises sur 4an montrent que sur les premiers centimètres les teneurs en eau varient à hautes fréquences (journalier à hebdomadaire) de $\pm 5\%$ en restant autour de $W=30\%$ durant l'année. A la différence de cet ouvrage, la situation géographique et le rôle de l'ouvrage Digue 2020 (climat méditerranéen, exposition au mistral, montée des eaux ou submersion) amènent à poser l'hypothèse d'une variation hydrique plus intense que dans l'ouvrage d'Héricourt, notamment vis-à-vis du phénomène de séchage-humidification.

3.2 Imposition des cycles hydriques : protocole

Il est choisi, pour réaliser les cycles d'humidification-séchage, de se placer dans les conditions les plus défavorables pour le matériau. Durant la cure et les cycles hydriques, les éprouvettes ne sont pas confinées, les éprouvettes représentant le matériau en surface de la digue. Le séchage en chambre climatique ($T=20^{\circ}\text{C}$, humidité de l'air = 60%) est poussé jusqu'au point d'entrée d'air (soit dans le cas de notre matériau $W=5\%$). L'humidification des échantillons se fait par montée capillaire. Les éprouvettes sont posées sur une pierre poreuse recouverte d'un papier filtre et plongées dans l'eau (figure 5). Pour accélérer l'homogénéisation de l'humidité dans les éprouvettes, la face de l'éprouvette au contact de la pierre poreuse est inversée à 50% de la durée de l'humidification.

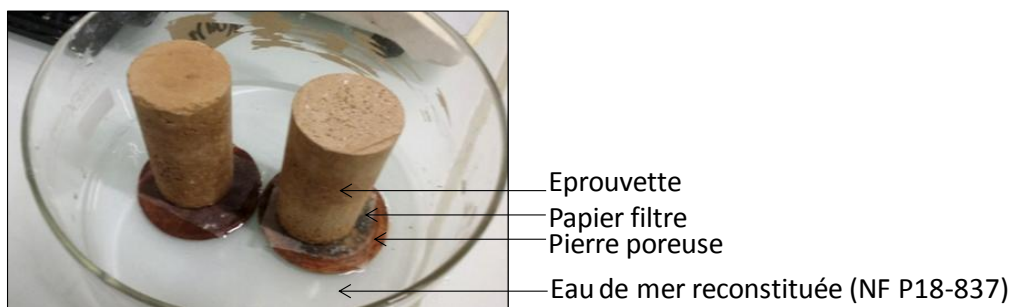


Figure 4. Dispositif expérimental pour l'humidification par montée capillaire

Pour simuler l'immersion par l'eau de mer lors des tempêtes, l'humidification est réalisée avec une solution d'eau de mer reconstituée (norme NF P18-837). La même eau est utilisée par l'ensemble des laboratoires travaillant dans le cadre du projet Digue2020 (comparaison des sollicitations exercées, comparaison des propriétés des sols démontrées). La teneur en sels dans l'échantillon est suivie par mesure de la résistivité électrique de l'échantillon, au fil des cycles.

A posteriori, les conditions de sollicitations au laboratoire seront mises en regard avec les données issues de l'instrumentation de l'ouvrage Digue 2020 dont la construction est prévue à l'automne 2018.

4. Caractérisation multi-physique du matériau : étude de la durabilité

4.1 Caractérisation du matériau & dispositifs d'études

Le matériau est étudié sous l'angle de sa résistance à l'érosion, ses performances mécaniques, sa microstructure et sa caractérisation géophysique.

4.1.1 Résistance à l'érosion

La résistance à l'érosion interne est caractérisée par l'essai d'érosion de trou (HET) (Figure 5). Cet essai est destiné à reproduire l'érosion de conduit et à le modéliser. Les paramètres déterminés sont la contrainte tangentielle critique (τ_c) pour laquelle l'érosion de conduit est initiée, et la cinétique d'érosion (coefficient d'érosion ker) (Chevalier et al. 2012; Chevalier et Bonelli 2016; Haghghi 2013; Mehenni 2015). La loi d'érosion du matériau est déterminée pour différents temps de cure et après deux à huit cycles hydriques.

L'essai d'érosion à jet mobile (MoJET) est un essai permettant de caractériser la sensibilité à l'érosion externe (Chevalier et al. 2012; Haghghi 2013). Six jets rotatifs exercent une contrainte perpendiculaire au sol, l'eau et les effluents sont collectés pour connaître la quantité de matière érodée par unité de temps (figure 6). Le taux d'érosion est déterminé sur les échantillons pour différents temps de cure et après deux à huit cycles hydriques.

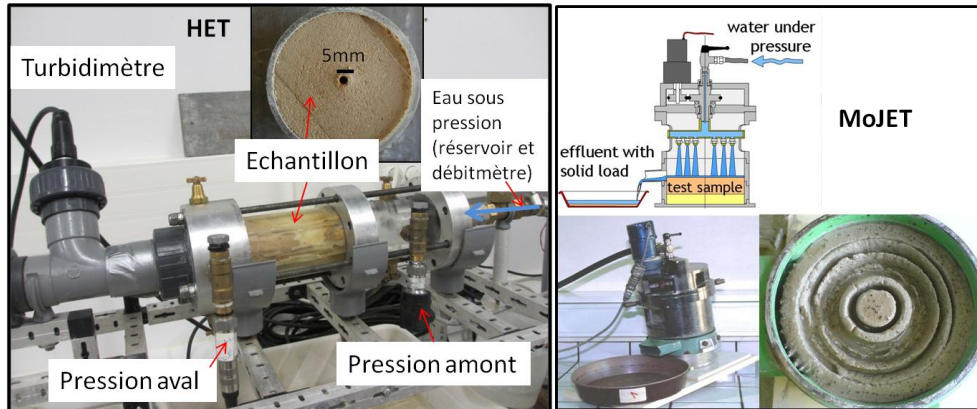


Figure 5. Dispositifs expérimentaux pour l'étude de l'érosion interne, à gauche (HET), et de l'érosion externe, à droite (MoJET)

4.1.2 Résistance mécanique, étude de la résistance en compression simple

La valeur de résistance en compression simple du matériau est un paramètre facile à obtenir et dont les références dans la littérature sont nombreuses (Le Roux et Rivière 1969; Bell 1996; Nguyen 2015; Mehenni 2015). L'essai est effectué après la cure de l'échantillon et son exposition à un nombre variable de cycles hydriques à l'eau salée. Les valeurs de R_c obtenues sont mises en relation avec les autres paramètres du matériau à l'échelle microstructurale ainsi qu'avec les données géophysiques.

4.1.3 Etude microstructurale

L'évolution de la distribution porale est suivie au cours de la cure et après sollicitation hydrique par la méthode de porosimétrie à intrusion au mercure (PIM). Cette distribution

est utilisée pour estimer par le modèle de la perméabilité du matériau et étudier les variations relatives de perméabilité entre le matériau soumis et non soumis aux sollicitations hydriques. L'observation au MEBE (Microscope Electronique à Balayage avec chambre Environnementale) permet de suivre qualitativement la forme et l'organisation des phases cimentaires dans le matériau.

4.1.4 Mesures géophysiques : méthodes électrique et ultra-sonore

Des mesures de résistivité électriques du matériau seront réalisées. Le dispositif expérimental est constitué d'un résistivimètre Syscal Pro (IRIS Instruments), et d'une cellule à électrodes annulaires qui vient se plaquer contre l'éprouvette (Figure 6). Un courant électrique d'intensité I (mA) connue est injecté dans l'échantillon, entre ses faces opposées, et les différences de potentiel U (mV) entre les anneaux sont mesurées. Le rapport U/I multiplié par un facteur géométrique (en m) donne la résistivité apparente du volume de matériau entre les électrodes considérées (Du Plooy et al., 2013). En prenant l'hypothèse d'un milieu homogène et isotrope, la résistivité effective du milieu est déduite. La multiplicité des électrodes permet de juger de l'homogénéité du matériau, et si cette homogénéité est avérée d'obtenir la résistivité moyenne de l'échantillon. Ces mesures sont réalisées durant la cure et les cycles hydriques.

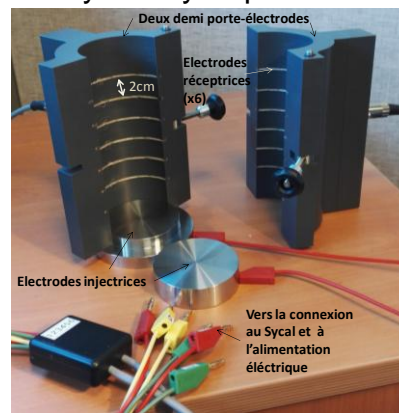


Figure 6. Cellule de mesure de la résistivité du matériau

Des mesures de vitesse de propagation des ondes mécaniques dans le matériau sont prévues (ondes P et S). Des éléments piézoélectriques capables de générer et recevoir préférentiellement des ondes de compression ou de cisaillement seront utilisés. Sous réserve d'homogénéité du matériau (vérifiable par les mesures électriques), et connaissant sa densité (par ...) les vitesses de propagation mesurées pourront être reliées aux modules en compression et en cisaillement (E&G) du matériau.

L'enjeu est ensuite de corréliser ces propriétés géophysiques aux propriétés mécaniques et érosives du matériau au cours du temps et des sollicitations

4.2 Quelques résultats

4.2.1 Effet des cycles hydriques et du sel sur la distribution porale.

Ce résultat fait partie d'une étude préliminaire réalisée sur un limon argileux, traité à 2,5% de chaux, compacté statiquement à 95% de l'OPN+1. L'échantillon B2 est soumis après 13 jours de cure à deux cycles séchage-humidification en utilisant de l'eau du robinet. Même protocole avec l'échantillon B3 mais avec de l'eau de mer reconstituée. L'échantillon A3 n'a subi aucun cycle hydrique. Pour ces trois échantillons, les essais de PIM montrent que la porosité totale reste la même, soit 34%. En revanche il y a un réarrangement de la distribution porale (figure 8). La famille de pore centrée sur 250nm n'est plus présente après deux cycles et il y a une augmentation du nombre de pores de

la famille d'environ 1100nm de diamètre. Il n'y a pas de différence notable de la répartition du diamètre des pores liée à l'exposition à l'eau salée.

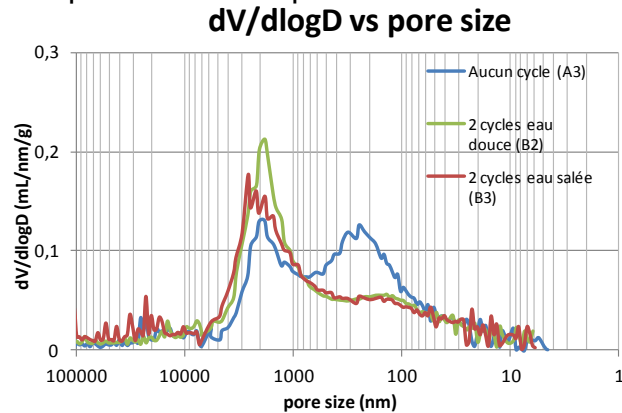


Figure 7. Courbes porosimétriques du matériau

4.2.2 Effet des cycles hydriques et du sel sur la résistance en compression simple

L'essai de compression simple est réalisé sur des échantillons après 28 jours de cure, ayant ou non subi deux cycles hydriques à l'eau de mer synthétique (figure 9). En moyenne, la valeur de résistance chute de 90 kPa après deux cycles, et de 90KPa supplémentaires au bout de 4 cycles. Des essais sur éprouvettes ayant subi 6 et 8 et 12 cycles sont prévus pour vérifier les hypothèses d'une stabilisation des valeurs de Rc ou d'une chute.

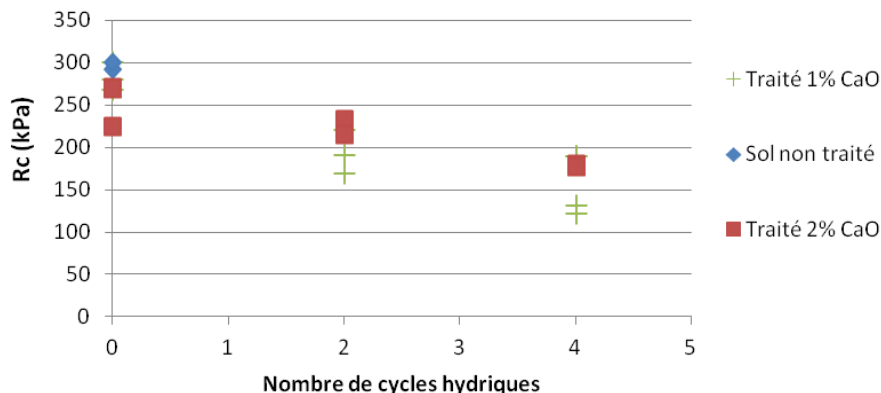


Figure 8: Evolution de la résistance en compression uniaxiale en fonction du nombre de cycles hydriques subi et de sa composition.

5. Conclusion

L'étude de la durabilité du matériau traité à la chaux s'appuie sur la reproduction et l'accélération des variations environnementales amenant à la modification de l'état du matériau sur un temps court (durée de l'étude moins de 2 ans). Les cinétiques d'évolution des propriétés du matériau seront traduites en termes de durabilité. Des critères de durabilité seront définis à partir de l'influence des paramètres initiaux du matériau sur sa durabilité.

Le vieillissement au laboratoire présente des limites en termes de représentativité des conditions climatiques réelles (fréquence d'immersion, température et humidité de l'air...) et de vitesses d'évolution des propriétés du matériau en place dans un ouvrage. Les mêmes caractérisations du matériau seront effectuées sur des échantillons prélevés in situ dans le futur ouvrage expérimental Digue2020 à l'issue de sa construction (état initial), et à plusieurs moments de la vie de l'ouvrage (paramètres climatiques et état hydrique du sol suivi par des capteurs en place).

La complémentarité des études destructives et non destructives au laboratoire doit permettre d'améliorer l'interprétation des données géophysiques acquises sur un ouvrage en sol traité en vraie grandeur.

Remerciements

Projet financé avec le concours de l'Union Européenne avec le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER).

La société IRIS Instruments pour la mise à disposition gracieuse d'un résistivimètre Syscal Pro Deep Marine.

G. Gugole et O. Durand (Lab. GeoEND) pour l'adaptation et la mise à disposition des systèmes géophysiques de laboratoire.

C. Minatchy pour l'adaptation du dispositif d'érosion de trou.

Références

- Bell, F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology* vol.42 pp. 223–237
- Chevalier, C., Bonelli S. (2016). *Méthodologie de caractérisation expérimentale, ERINOH ERosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques*. Presse des ponts. Vol. 1. ERINOH.
- Chevalier, C., Haghghi, I., Herrier, G. (2012). Resistance to erosion of lime treated soils: a complete parametric study in laboratory. *ICSE* vol. 6
- Du Plooy R., Palma Lopes S., Villain G., Dérobert X. (2013) Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. *NDT &E International*, vol.54, pp.27-36.
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal* vol. 37, pp.1000-1024.
- Guney, Y., Sari, D., Cetin, M., Tuncan, M. (2007). Impact of Cyclic Wetting–drying on Swelling Behavior of Lime-Stabilized Soil. *Building and Environment* vol. 42, pp.681–88.
- Haghghi, I. (2013). Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion : développement d'essais et applications pratiques. Thèse de l'Université Paris-Est.
- Herrier, G., Cuisinier O., Deneele D., et Puiatti D. (2013) Etude de la perméabilité d'un limon traité à la chaux. Colloque TerDOUEST 2013, pp. 91-101
- Khattab, S. A., Al-Mukhtar, M., Fleureau J.-M. (2007). Long-term stability characteristics of a lime-treated plastic soil. *Journal of materials in civil engineering*, vol. 19, pp.358–366.
- Le Roux A., et Rivière A. (1969). Traitements des sols argileux par la chaux. *Bulletin Liaison Labo. Routiers P. et Ch.*, n°40 pp.69-96.
- 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* vol. 118, pp.20–28.
- Locat, J., Bérubé, M.A., Choquette, M. (1990). Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal* vol. 27, pp.294–304.
- Mehenni, A. (2015). Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités. Thèse de l'Université de Lorraine.
- Nguyen, T.T.H. (2015). Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel . Thèse de l'Université Paris Est.
- Stoltz, G., Cuisinier, O., Masrouri, F. (2014). Weathering of a Lime-Treated Clayey Soil by Drying and Wetting Cycles. *Engineering Geology* vol.181, pp.281–89.
- Technique, G. (2000). Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. *Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC/Setra*.
- NF P94-057. (1992). Norme Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation.
- XP P94-041 . (1995) Norme Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide.
- NF P94-052-1 Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie1: limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration.
- 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.
- ASTM D6276 (2006) Standard test method for using pH to estimate the soil–lime proportion requirement for soil stabilization