

# Durabilité d'un sol traité à la chaux en environnement maritime : Méthodologie de l'étude et premiers résultats

## *Durability of lime treated soil in marine environment: methodology for a laboratory study*

M. De Baecque<sup>1</sup>, C. Chevalier<sup>1</sup>, M. Le Feuvre<sup>1</sup>, S. Palma Lopes<sup>1</sup>, P. Reiffsteck<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFSTTAR, 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.

### Mots-Clés

Chaux, digue, durabilité, méthodologie, salinité

### Abstract

In order to study the lime-treated soil durability in marine environment, 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.

### Key Words

Lime, dike, durability, methodology, salinity

### 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 [1][2][3][4][5]. 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 [5][6]. 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. C'est pourquoi une étude multiphysique de la durabilité du matériau est menée au laboratoire. Cette étude s'inscrit dans le projet CPER-FEDER PACA Digue 2020 qui vise à éprouver la durabilité d'une plateforme maritime en sol-chaux à l'échelle 1. Ce projet se décline en quatre axes :

- Conception de la plateforme en sol traité (*axe 1* porté par Irstea et le Symadrem),
- Surveillance géophysique de l'ouvrage (évolutions des propriétés du matériau, détection de fuites ou de défauts : *axe 2* porté par le Cerema),
- Durabilité du matériau en environnement maritime-côtier (*axe 3* porté par l'Ifsttar)
- Perception du risque submersif par les populations côtières (*axe 4* porté par l'UMR ESPACE).

Cet article porte sur les recherches menées au laboratoire dans le cadre de l'axe 3. 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.

## Matériaux

### 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 [7][8][9]. Quelques résultats sont présentés dans le TABLEAU 1 et sur la FIGURE 1.

TABLEAU 1. QUELQUES CARACTERISTIQUES DU LIMON DE SALIN DE GIRAUD

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

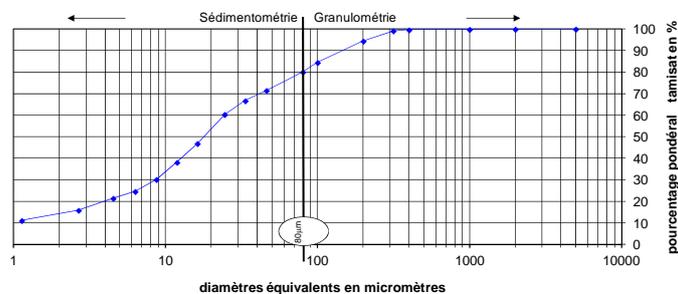


FIGURE 1. RÉPARTITION GRANULOMÉTRIQUE DU LIMON DES SALINS DE GIRAUD. LA FRACTION ARGILEUSE EST ÉGALE À 15 % EN MASSE.

### 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 : CARACTERISTIQUES DE LA CHAUX VIVE UTILISEE

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

### Formulation des mélanges

Le choix de la formulation des mélanges est basé sur l'évaluation de la quantité minimum requise pour saturer en chaux une solution sol-eau. Il s'agit de l'essai de 'Point de fixation de la chaux' (PFC) réalisé d'après la norme ASTM D6276 (Figure 2). La quantité minimale requise est 1 % de la masse sèche de sol à traiter. Pour connaître l'influence de la teneur en chaux l'étude est réalisée pour deux teneurs en chaux différentes, à 1 % et 2 % de la masse sèche de sol à traiter.

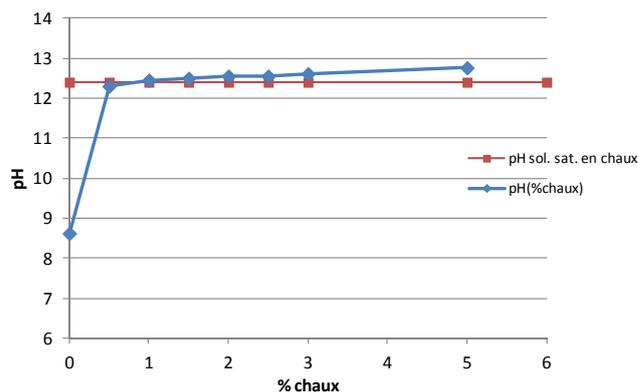


FIGURE 2: ÉVOLUTION DU PH EN FONCTION DU POURCENTAGE MASSIQUE DE CHAUX AJOUTÉE DANS LES SOLUTIONS SOL+EAU DISTILLÉE. DÉTERMINATION DU POINT DE FIXATION DE LA CHAUX.

À court terme, l'amélioration de performance mécanique des sols est optimale pour un dosage égal au PFC [5][10][11]. En revanche à long terme les performances des sols peuvent être améliorées en augmentant le dosage en chaux [12]. 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.

L'effet de la densité du matériau et de la présence d'eau de mer au moment de la préparation sur la durabilité de matériau est également étudié. Le tableau 3 résume les différentes caractéristiques de traitement et de compacité des 5 lots d'échantillons.

TABLEAU 3 : CARACTÉRISTIQUE DE TRAITEMENT ET DE COMPACITÉ DES 5 LOTS D'ÉCHANTILLONS.

Densité\chou x	0 %	1 %	2 %	2 % + eau de mer
95 % de l'OPN*			X	
98 % de l'OPN*	X	X	X	X

\*Optimum Proctor Normal (NF P94-093)

## Propriétés de compactage

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

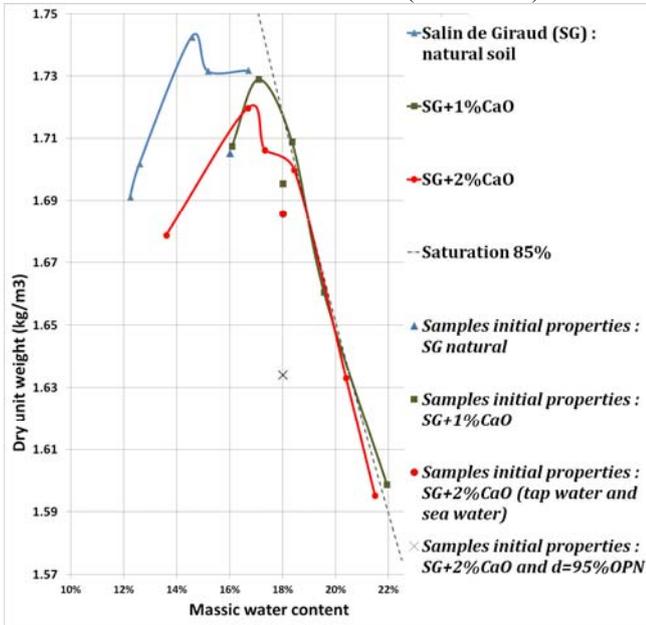


FIGURE 3. COURBE PROCTOR NORMAL POUR LE LIMON SG NATUREL ET TRAITÉ À 1 % ET 2 % DE CHAUX

Les éprouvettes dans notre étude sont compactées dynamiquement en 7 couches de 20 mm d'épaisseur dans des moules de 70 mm de diamètre et de 140 mm de hauteur, avec un objectif de 98 % de  $\gamma_{dOPN}$  à  $w_{OPN+1}$ , conditions pour lesquelles la perméabilité du matériau est la plus faible [13][14][15].

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

## Vieillessement accéléré au laboratoire

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

### 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 4 ans 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. À 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.

## 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 ( $T = 20\text{ °C}$ , 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 4). 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.

Par la suite, 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 en mars 2019.

## Caractérisation multiphysique du matériau et durabilité

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

### Résistance à l'érosion

La résistance à l'érosion interne est caractérisée par l'essai d'érosion de trou (Hole Erosion Test, 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 ( $\tau_c$ ) pour laquelle l'érosion de conduit est initiée, et la cinétique d'érosion (coefficient d'érosion  $k_{er}$ ) [5][16][17][18]. La loi d'érosion du matériau est déterminée pour différents temps de cure et après deux à huit cycles hydriques.

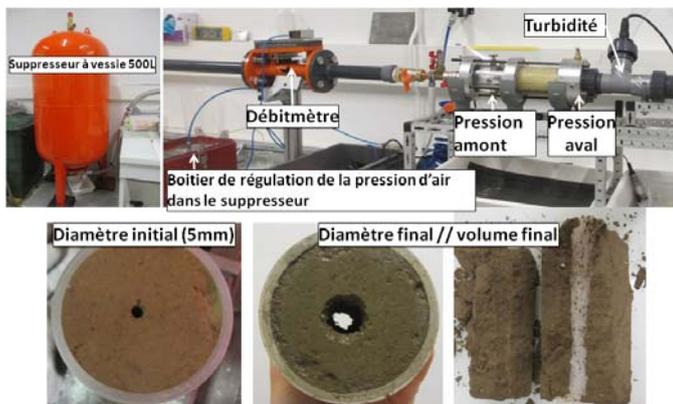


FIGURE 5: PRÉSENTATION DU DISPOSITIF D'ESSAI HET ET EXEMPLE D'UNE ÉPROUVETTE AVANT ET APRÈS ESSAI.

L'essai d'érosion à jet mobile (MoJET) est un essai permettant de caractériser la sensibilité à l'érosion externe [16, 18]. 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 6: DISPOSITIF MOJET POUR L'ÉVALUATION DE LA SENSIBILITÉ À L'ÉROSION EXTERNE

## Résistance mécanique, étude de la résistance en compression simple

La valeur de résistance en compression simple ( $R_c$ ) du matériau est un paramètre facile à obtenir et dont les références dans la littérature sont nombreuses [5][10][11][19]. 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.

### Étude 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.

## 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 7). 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 [20]. 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.

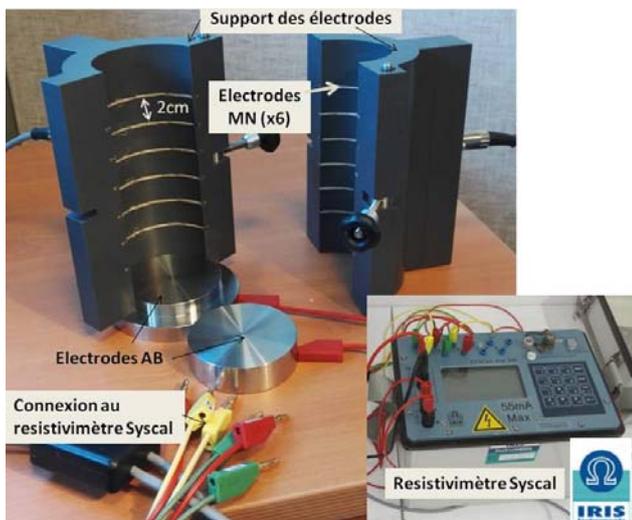


FIGURE 7: CELLULE DE MESURE DE LA RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE DU MATÉRIAU

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 construction) les vitesses de propagation mesurées pourront être reliées aux modules en compression et en cisaillement (E&G) du matériau. L'enjeu est ensuite de corréler ces propriétés géophysiques aux propriétés mécaniques et érosives du matériau au cours du temps et des sollicitations

## 1. Quelques résultats

### Resistance en compression uniaxiale en fonction de la composition des matériaux, du nombre de cycles hydriques subits et du temps de cure.

Sur les figures 8, 9 et 10 de cette partie, chaque point représente la valeur moyenne de 3 essais et la barre d'erreur indique l'écart type à la moyenne.

Après 28 jours de cure, les échantillons traités à 2 % de chaux avec ajout d'eau de mer lors de leur fabrication présentent la valeur de  $R_c$  la plus grande : 350 kPa contre 250 kPa pour les échantillons préparés avec de l'eau douce (Figure 8). À 28 jours de cure, les échantillons traités sans sel présentent une résistance inférieure de 50 kPa au sol naturel, tandis que les échantillons traités avec ajout d'eau de mer ont une résistance supérieure de 50 kPa au sol naturel. En revanche après 2 et 4 cycles hydriques, les valeurs de  $R_c$  pour les échantillons traités à 2 % de chaux chutent et s'égalisent (aux barres d'erreurs près) indépendamment de la présence de sel dans l'échantillon initial. Deux hypothèses sont à discuter :

- À court terme, le traitement serait défavorable du fait d'une densité maximale plus faible dans le cas du sol traité. À long terme, les réactions pouzzolaniques (cimentation) entre les argiles du sol et la chaux se développent pour compenser la perte de résistance liée à la densité.

- La présence de sel accélérerait la prise de la chaux mais pas la durabilité du matériau

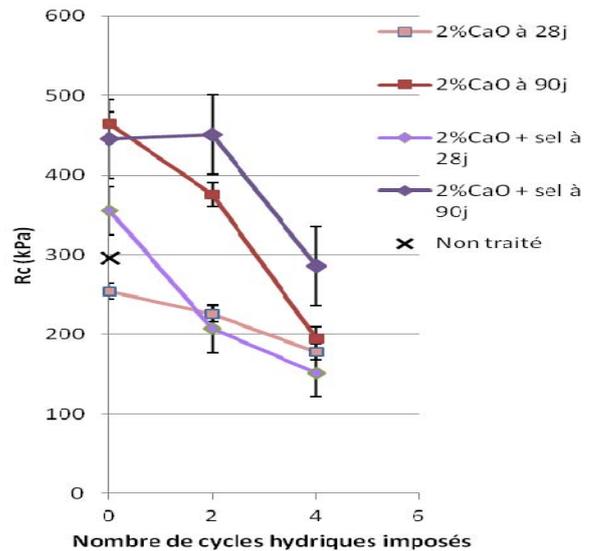


FIGURE 8: RESISTANCE EN COMPRESSION SIMPLE POUR LES MATÉRIEAUX TRAITÉS À 2 % DE CHAUX, AVEC OU SANS SEL LORS DE LA PRÉPARATION. ÉVOLUTION DE LA  $R_c$  A DIFFÉRENTS TEMPS DE CURE ET POUR UN NOMBRE DE CYCLES HYDRIQUE IMPOSÉS CROISSANTS.

À 90 jours de cure (Figure 8), les échantillons salés et non salés présentent la même résistance en compression (environ 450 kPa). Après 4 cycles la résistance des échantillons salés a chuté de 150 kPa et une chute de 250 kPa pour les échantillons non salés. Contrairement à ce que l'on observe à 28 jours, la salinité de l'eau de préparation semble améliorer la durabilité du matériau par rapport à un échantillon équivalent préparé avec de l'eau douce.

Cette tendance se confirme après 6 cycles hydriques (figure 10)

Dans le cas du sol traité à 1 % de chaux (figure 9), la résistance en compression à 28 et 90 jours est la même et correspond également à la résistance de l'échantillon non traité. La stagnation des valeurs de  $R_c$  montrerait que les réactions pouzzolaniques n'évoluent pas entre 28 et 90 jours. L'hypothèse la plus probable est la consommation de l'ensemble de la chaux avant 28 jours, le traitement à 1 % de chaux est donc insuffisant pour accroître les performances mécaniques du sol.

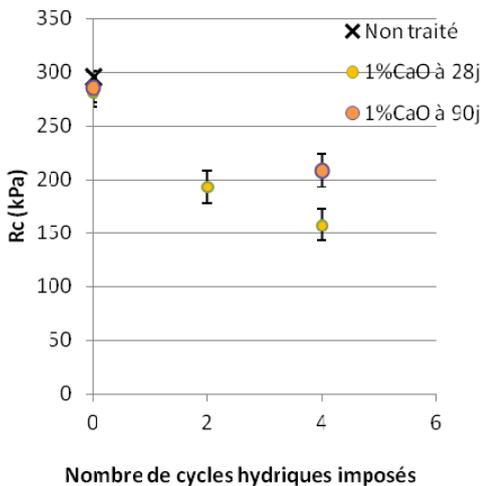


FIGURE 9: RESISTANCE EN COMPRESSION SIMPLE POUR LES MATÉRIEAUX TRAITÉS À 1% DE CHAUX. ÉVOLUTION DE LA Rc À DIFFÉRENTS TEMPS DE CURE ET POUR UN NOMBRE DE CYCLES HYDRIQUES IMPOSÉS CROISSANT.

La comparaison des Rc en fonction du nombre de cycles hydriques appliqués et de la composition du matériau fait apparaître deux tendances (figure 10): pour les échantillons traités à 2% de chaux (3 lots) les Rc chutent puis se stabilisent à partir de 4 cycles ; pour les échantillons traités avec 1% de chaux la chute des Rc est continue et quasi linéaire.

Parmi les échantillons traités à 2%, ceux traités en présence d'eau de mer présentent une Rc de 300 kPa après 4 cycles, contre seulement 200 kPa pour les échantillons traités avec de l'eau douce. Les échantillons ayant une densité inférieure aux autres lots (95 % de l'OPN contre 98 % de l'OPN pour tous les autres échantillons) ont une Rc de 170kPa après 4 cycles. Conclusion : pour un dosage suffisant (>1%) les propriétés de résistance à la compression se stabilisent dès 4 phases de sollicitation hydrique à l'eau de mer. En termes de durabilité la présence de sel lors de la préparation est favorable et de même qu'une densité égale à 98 % de l'OPN. Plusieurs hypothèses sont posées pour expliquer la diminution de la Rc :

- le développement de composés cimentaires rigidifie le matériau qui subit une micro-fracturation durant les premières phases de séchage. Cette hypothèse de rigidité pourra être vérifiée par méthode sismique avec l'évolution des modules en petite déformation.
- une dissolution ou un arrêt du développement des phases cimentaires lors de la phase d'humidification

La stabilisation du paramètre Rc traduirait la stabilisation des deux phénomènes décrits ci-dessus.

L'évolution sera suivie jusqu'à 12 cycles pour confirmer la stabilisation de la Rc (résultats finaux en novembre 2018).

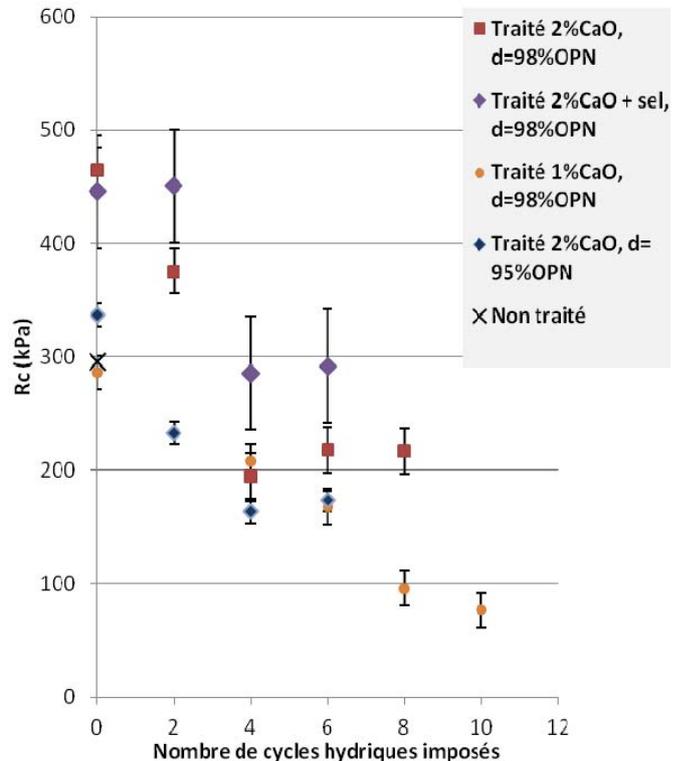


FIGURE 10: RC FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES ET DE LA COMPOSITION DU MATÉRIAU, APRÈS 90 JOURS DE CURE.

### Résistivité électrique

Pendant la durée de la cure la résistivité électrique du matériau est suivie (Figure 11). Pour un échantillon traité à la chaux, la résistivité électrique augmente de 2,45Ωm à 18 jours et jusqu'à 2,75 Ωm à 85 jours. La teneur en eau massique est constante. La résistivité du matériau dépend principalement de deux facteurs : la teneur en eau et la concentration en ions dissous en phase liquide. Ce résultat montre qu'une partie des ions en solution apportée par la chaux aurait été mobilisée en phase solide durant la cure, pour former des composés cimentaires. L'accroissement de la résistance en compression simple durant la cure vient étayer cette hypothèse.

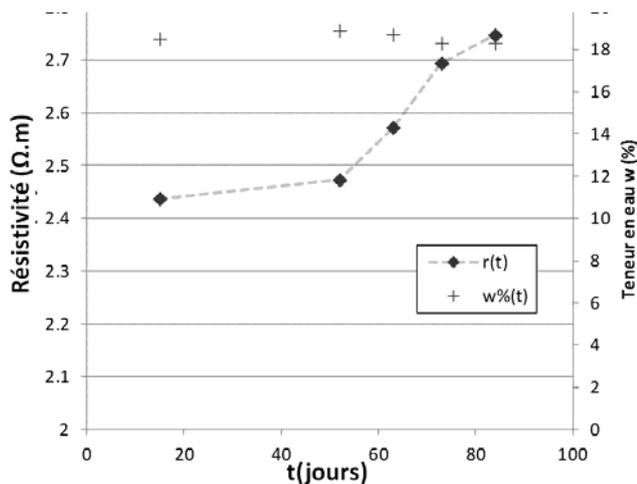


FIGURE 11: RÉSISTIVITÉ ET TENEUR EN EAU EN FONCTION DU TEMPS SUR UN ÉCHANTILLON TRAITÉ À 2 % DE CHAUX

### Porosité à intrusion au mercure : étude de la distribution porale du matériau.

La figure 11 présente la distribution porale après 28 jours de cure, du sol naturel compacté ainsi de celle du sol traité à 1 et 2 % de chaux, compacté également. Dans le cas du sol traité, les résultats sont présentés avant et après l'imposition de deux cycles d'humidification-séchage (Figure 12).

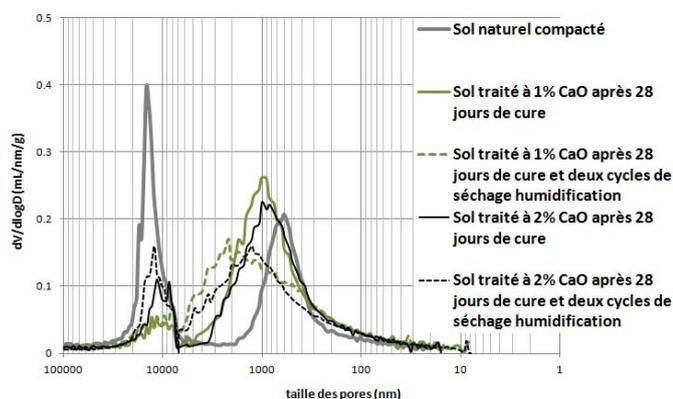


FIGURE 12: RÉSULTAT DE MESURES DE POROSIMÉTRIE AU MERCURE (EN ORDONNÉE, LA DERIVE DU VOLUME POREUX SUR LA DERIVE DU LOG DU DIAMÈTRE)

Le sol naturel contient deux familles de pores centrées sur 0,8 et 12  $\mu\text{m}$ . La porosité totale est de  $35,5 \pm 0,5$  %. Les échantillons traités présentent également deux familles de pores dont la plus grande centrée sur 12  $\mu\text{m}$  est plus faiblement représentée que dans le cas du sol non traité, et la plus petite famille est centrée autour de 1,1  $\mu\text{m}$ . La présence de cette dernière famille pourrait provenir d'une porosité au sein des agrégats d'argiles formés suite au traitement à la chaux. La famille la plus grande semble liée à la nature du sol car elle est présente quelle que soit la formulation. En revanche la plus faible proportion de cette famille suite au traitement et à 28 jours de cure pourrait indiquer une

précipitation des composés cimentaires dans cette porosité. En suivant cette hypothèse l'augmentation de la présence de ces pores après 2 cycles hydriques serait liée à la dissolution des composés cimentaires néoformés.

La vérification de ces hypothèses nécessite la poursuite de l'étude sur un plus grand nombre d'échantillons, à un temps de cure plus avancé et pour un nombre de cycles hydriques plus important. Ces données seront disponibles en décembre 2018

### Caractérisation de l'érosion interne et externe (HET et MoJET)

La campagne des essais d'érosion est en cours et les résultats sont en cours d'interprétation. Les résultats seront présentés lors de la conférence Digue 2019. Les essais ont pour but de définir des lois d'érosion en fonction de l'âge, de la formulation et de l'histoire des échantillons (nombre de sollicitations hydriques à l'eau de mer).

### 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).

Durant la cure les performances mécaniques du sol de *Salin de Giraud* traité à 2 % de chaux augmentent. Cette amélioration est liée au développement de phases cimentaires dans le matériau suite à l'ajout de chaux (réactions pouzzolaniques). Ce résultat montre l'importance de la cure sur les propriétés du matériau. In-situ, la protection de la surface de la digue pendant la cure (durée à définir) est cruciale pour atteindre les performances optimales du matériau.

La mesure de résistivité électrique au laboratoire est une approche robuste pour suivre l'évolution des réactions pouzzolaniques à condition que la salinité et la teneur en eau restent constantes durant toute la période de l'étude.

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

Le projet DIGUE 2020 est un projet financé avec le concours de l'Union Européenne avec le Fonds Européen. Il s'inscrit également dans le contrat plan État-Région 2015-2020. Nous remercions l'ensemble des financeurs pour leur contribution au projet à savoir : l'Union Européenne, l'État, la Région PACA, le Département des Bouches-du-Rhône et le LABEX OT-Med (Initiative d'Excellence d'Aix-Marseille Université - A\*MIDEX).

Merci à IRIS Instrument pour la mise à disposition gracieuse d'un résistivimètre Syscal Pro Marine modifié pour les besoins du laboratoire.

## Références

- [1] Guney, Y., Sari, D., Cetin, M., Tuncan, M., 2007. Impact of Cyclic Wetting–drying on Swelling Behavior of Lime- Stabilized Soil. *Building and Environment* 42 : 681-88
- [2] 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* 19: 358–366.
- [3] 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: 20-28.
- [4] Stoltz, G., Cuisinier, O., Masroui, F., 2014. Weathering of a Lime-Treated Clayey Soil by Drying and Wetting Cycles. *Engineering Geology* 181: 281-89.
- [5] Mehenni, A., 2015. Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités. *PhD thesis* : Université de Lorraine.
- [6] Foster, M., Fell, R., Spannagle, M., 2000. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal* 37: 1000-1024.
- [7] NF P94-057. 1992. E : Soils investigation and testing - Granulometric analysis - Hydrometer method
- [8] XP P94-041. 1995. Soil: investigation and testing. Granulometric description. Wet sieving method.
- [9] NF P94-052-1 Soil investigation and testing. Atterberg limit determination. Part 1 : liquid limit. Cone penetrometer method.
- [10] Bell, F.G.,1996. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology* 42: 223–237
- [11] Le Roux A., et Rivière A., 1969. Traitements des sols argileux par la chaux. *Bulletin Liaison Labo. Routiers P. et Ch.*, 40 : 69-96.
- [12] Locat, J., Bérubé, M.A., Choquette, M., 1990. Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian Geotechnical Journal* 27 : 294–304.
- [13] 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: 20-28.
- [14] Cuisinier, O., Auriol, J.C., Le Borgne, T., & Deneele, D., 2011. Microstructure and Hydraulic Conductivity of a Compacted
- [15] Herrier, G., Cuisinier O., Deneele D., & Puiatti D., 2013. Etude de la perméabilité d'un limon traité à la chaux. *Seminar TerDOUEST Marne la vallée 18-19 juin 2013*.
- [16] Chevalier, C., Haghighi, I., Herrier, G., 2012. Resistance to erosion of lime treated soils: a complete parametric study in laboratory. *8th International Conference on Scour and Erosion Oxford, UK, 12-15 September 2016. London: CRC*
- [17] Chevalier, C., Bonelli S., 2016. Méthodologie de caractérisation expérimentale, ERINOH Erosion Interne dans les Ouvrages Hydrauliques. Paris: Presse des ponts.
- [18] Haghighi, I., 2013. Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion : développement d'essais et applications pratiques. *PhD thesis* : Université Paris-Est.
- [19] Nguyen, T.. 2015. Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel. *PhD thesis* : Université Paris Est.
- [20] 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* 54: 27-36.