



HAL
open science

Caractérisation multi-physique de la durabilité d'un sol traité à la chaux pour une application aux digues maritimes

Margot de Baecque

► **To cite this version:**

Margot de Baecque. Caractérisation multi-physique de la durabilité d'un sol traité à la chaux pour une application aux digues maritimes. Géotechnique. Université Paris-Est, 2019. Français. NNT : 2019PESC2078 . tel-02899988

HAL Id: tel-02899988

<https://theses.hal.science/tel-02899988v1>

Submitted on 15 Jul 2020

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

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

UNIVERSITÉ PARIS-EST

École Doctorale Sciences, Ingénierie et Environnement

Thèse de doctorat

Présentée pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université Paris-Est

Spécialité : Géotechnique

Par :

Margot DE BAECQUE

Sujet :

**Caractérisation multi-physique de la durabilité d'un sol traité à la chaux
pour une application aux diges maritimes**

Thèse publiquement soutenue le 17 décembre 2019 devant le jury composé de :

Cyrille FAUCHARD, Rapporteur, Directeur de recherche, CEREMA Normandie-Centre

Didier MAROT, Rapporteur, Professeur, Université de Nantes, UIT de Saint-Nazaire

Nadia BENAHMED, Examinatrice, Chargée de recherche, IRSTEA Aix-en-Provence

Anne PANTET, Examinatrice, Professeure, Université du Havre

Anthony SOIVE, Examineur, Chargé de recherche, CEREMA Méditerranée

Philippe REIFFSTECK, Directeur de thèse, Directeur de Recherche, IFSTTAR GERS-SRO

Christophe CHEVALIER, Encadrant, Invité, IPEF, IFSTTAR GERS-SRO

Sergio PALMA LOPES, Encadrant, Invité, ITPE, IFSTTAR GERS-GeoEND

A ma famille

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé à l'IFSTTAR, au sein du laboratoire SRO (Sols, Roches et Ouvrages géotechniques) et en collaboration avec les laboratoires GeoEND (Géophysique et Évaluation Non Destructive) et GMG (Géomatériaux et Modèles Géotechniques). Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet CPER FEDER-PACA Digue2020.

Je souhaite remercier Philippe REIFFSTECK, mon directeur de thèse, ainsi que Christophe CHEVALIER et Sergio PALMA LOPES, mes encadrants, pour m'avoir fait confiance pour mener cette thèse et pour m'avoir accordé une grande autonomie.

Je remercie les membres du jury d'avoir accepté de rapporter ou d'examiner cette thèse : Cyrille FAUCHARD, Didier MAROT, Nadia BENAHMED, Anne PANTET et Anthony SOIVE.

Je remercie les chercheurs et techniciens des laboratoires GeoEND et GMG avec qui j'ai pu échanger lors de mes déplacements, qui m'ont permis d'avancer dans mes réflexions et qui ont mis à ma disposition le matériel nécessaire à la réalisation de mon programme expérimental : Mathieu LE FEUVRE, Olivier DURAND, Gautier GUGOLE, Thierry DUBREUCQ, Andry RAZAKAMANANTSOA et Jean-Pierre DAVID.

Je remercie bien évidemment tous mes collègues de SRO avec qui j'ai partagé de bons moments de vie et de travail. Merci spéciale à Louis BATTIST pour les quelques 200 éprouvettes compactées ensemble, à Carlos MINATCHY pour avoir monté la nouvelle version du HET, et à Sonia FANELLI pour m'avoir formé aux subtilités des différents essais géotechniques. Merci aussi à Myriam DUC pour son aide apportée sur les questions physico-chimique des matériaux.

Je souhaite également remercier les différents acteurs du projet Digue2020 pour les échanges riches d'enseignement que l'on a pu avoir au cours de ces trois années. Vous êtes nombreux, je ne vous citerai pas tous, mais je nommerai Thibaut FAISANT qui a coordonné ce projet ambitieux.

Je remercie Gontran HERRIER et Tamer OZTURK, de m'avoir accueilli quelques jours au début de ma thèse, au laboratoire du groupe Lhoist à Nivelles, et pour les échanges qui ont suivi.

Je remercie également Julien GANCE de chez Iris Instrument pour avoir rendu techniquement possible mon étude sur la résistivité électrique du matériau sol-chaux.

Un grand merci à tous ceux qui ont aidé à l'aboutissement de ce mémoire de thèse par leurs conseils ou leurs relectures attentives, il y en a que j'ai déjà cité dans ces remerciements et qui se reconnaîtront, je nommerai les autres : Sylvine GUEDON, Thibault BADINIER, Flora GALLAIS, Estelle CROS, Henry DE BAECQUE, Joëlle MASSON et Arthur MASSON.

Merci à mes collègues doctorants et post-doctorant de SRO, Hiba, Emma, Youssef, Yvon, Chi-Wei, Yaghkob, Abdel-Karim, Loren, Stefania, Carolina, et aussi Scarlett du Cerema, pour les bons moments passés au laboratoire et ailleurs.

Merci à mes amis et amies pour vos précieux soutiens, et tout le bonheur apporté depuis de nombreuses années.

Et pour finir un grand merci à ma famille, Martine, Henry, Léon, et Anatole pour leur soutien inconditionnel depuis toujours, et à Arthur pour notre nouvelle vie à deux.

Résumé

Dans le cadre de la construction de digues, le traitement à la chaux permet d'améliorer les performances des sols argileux en place pour éviter leur mise en décharge, et de réduire ainsi le coût économique et écologique du transport de matériaux d'apport de plus grande qualité. Des études antérieures ont montré que le traitement à la chaux augmente les performances mécaniques du sol et sa résistance à l'érosion. En revanche, l'impact du milieu environnant sur la durabilité de ce type de matériau n'a que très peu été étudié. Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet CPER-FEDER PACA Digue2020 dont l'objectif est la construction d'une plateforme de recherche instrumentée au sein d'une nouvelle digue en sol traité à la chaux, soumis à un environnement maritime pour en évaluer la durabilité. L'objectif de la thèse est d'évaluer au laboratoire la durabilité d'un sol préalablement choisi et traité à la chaux lorsqu'il est soumis à un environnement marin. Un protocole de cycles accélérés de séchage et d'humidification à l'eau de mer standardisée est mis en place pour reproduire les alternances des phases d'immersions-émersions d'une digue maritime. La résistance mécanique en compression, la résistance à l'érosion interne, la résistance à l'érosion externe et la répartition de la porosité du matériau sont les propriétés évaluées, car d'elles dépend la capacité d'une digue à exercer sa fonction de protection. La résistivité électrique et les vitesses des ondes sismiques sont évaluées au cours de cycles dans l'objectif de les relier aux propriétés d'état et aux propriétés géomécaniques du matériau. L'évolution de ces propriétés n'est pas linéaire, les premiers cycles hydriques sont très dégradants puis le matériau acquiert un état plus stable vis-à-vis des propriétés géomécaniques qui diminuent plus lentement sous l'action de cycles. La salinité initiale du sol n'est pas dommageable pour la durabilité du matériau traité. La complémentarité des méthodes géophysiques pour la caractérisation du matériau sol-chaux est démontrée. Les perspectives majeures de cette thèse sont : de mener des études croisées entre l'échelle du laboratoire et celle de l'ouvrage réel Digue2020 pour évaluer la représentativité de l'étude de laboratoire ; et de suivre à long terme, par des méthodes géophysiques, l'évolution du matériau sol-chaux et du matériau non traité au sein de l'ouvrage Digue2020.

Mot clés : Traitement à la chaux, durabilité, digue maritime, salinité, cycles hydriques, caractérisations multi-physiques

Abstract

In the context of dike construction, the lime treatment of clayey soils improves their properties and avoids importing other high quality materials. Such treatment could reduce the environmental and economic cost of the raw material carriage. Several studies in the literature showed that the lime treatment of soil increases the mechanical strength and the resistance to erosion. However, the impact of the environmental stress on the material durability, especially in marine environment, was not taken into account in these studies. The work presented in this thesis dissertation is part of the CPER-FEDER PACA Digue2020 project, of which the purpose is to build a marine dike using a lime treated soil and to monitor the dike sustainability. The goal of our work is to evaluate in the lab the durability of the lime treated soil by reproducing a marine environment. Wetting-drying accelerated cycles using standardized sea water are defined to reproduce the alternate phases of emersion and immersion of the dike. The uniaxial mechanical strength, the resistance to internal and external erosion, and the porosity are evaluated. These properties are chosen in order to assess the durability of the dike. The material electrical resistivity and seismic wave velocities are evaluated during the hydric cycles to correlate these material properties with the state of degradation due to the cycles. The effect of the hydric cycles is a non-linear decrease of the geomechanical properties. The reduction of the properties is fast during the first cycles then it slows down. Geophysical properties prove complementary in characterizing the lime-treated soil properties. The perspectives of this work are to perform in situ testing on the Digue2020 dike. On-site results could be compared with lab test results in order to evaluate the representativeness of lab tests and their protocol. A long term geophysical instrumentation is planned to monitor the properties of the lime-treated and non-treated materials within the Digue2020 earthwork.

Keywords: lime treatment, durability, marine dike, salinity, hydric cycles, multiphysic characterization

Sommaire

_Toc32871232

Remerciements	5
Sommaire	8
Table des illustrations	12
Introduction	21
I. Chapitre 1: Traitement des sols à la chaux pour des digues durables: Etat de l'art	25
I.1. Les digues en terre : structure et fonctions	26
I.1.1. Définitions	26
I.1.2. Structure d'une digue en relation avec ses fonctions	27
I.1.3. Amélioration des matériaux pour les digues maritimes	28
I.2. Propriétés mécaniques et hydromécaniques des sols traités.....	29
I.2.1. Définition d'un sol et de ses paramètres d'états	29
I.2.2. Réactions chimiques entre la chaux et un sol	31
I.2.3. Comportement mécanique des sols traités à la chaux	34
I.2.4. Comportement hydraulique des sols traités à la chaux.....	37
I.3. Résistance à l'érosion des sols traités à la chaux	40
I.3.1. L'érosion, risque principal de défaillance d'une digue.....	40
I.3.2. Classification de l'érosion des sols et des roches.....	42
I.3.3. Erodabilité des sols traités à la chaux	45
I.4. Réponses géophysiques des sols.....	48
I.4.1. Généralités sur les méthodes géophysiques.....	48
I.4.2. Résistivité électrique des sols.....	49
I.4.3. Vitesses de propagation des ondes sismiques dans le sol	53
I.5. Durabilité des matériaux et des ouvrages.....	57
I.5.1. Durabilité d'une digue.....	57
I.5.2. Durabilité des ouvrages hydrauliques en sol traité à la chaux : ouvrages anciens et expérimentations récentes	58
I.5.3. Evaluation au laboratoire de la durabilité des sols traités.....	60

I.6.	Conclusion du chapitre 1.....	64
II.	Chapitre 2: Méthodologie de caractérisation au laboratoire de la durabilité d'un limon traité à la chaux en environnement maritime.	66
II.1.	Matériaux de l'étude paramétrique.....	67
II.1.1.	Sol support de l'étude	67
II.1.2.	Définition de l'étude paramétrique : variabilité de la teneur en chaux, de la densité et de la salinité.	70
II.1.3.	Synthèse des gammes de variation des paramètres des matériaux de l'étude	73
II.1.4.	Réalisation des éprouvettes de sol.....	74
II.1.5.	Bilan de l'étude paramétrique sur matériaux	77
II.2.	Etablissement du protocole de reproduction des sollicitations environnementales	78
II.2.1.	Définition.....	78
II.2.2.	Sollicitations environnementales spécifiques à une digue maritime.....	78
II.2.3.	Etablissement des cycles de séchage-humidification à l'eau de mer	79
II.2.4.	Suivi des cycles	81
II.3.	Protocole d'étude de l'influence du temps de cure sur la durabilité.....	83
II.4.	Dispositifs expérimentaux pour la caractérisation des propriétés du matériau selon l'approche multi-physique.....	85
II.4.1.	Caractérisation de la résistance en compression simple.	85
II.4.2.	Etude de l'érosion interne par l'essai d'érosion de trou (HET)	86
II.4.3.	Caractérisation de l'érosion externe par l'essai d'érosion à jet mobile (MoJET).....	99
II.4.4.	Détermination de la porosité totale et la répartition de la taille des pores par la mesure de porosimétrie au mercure.	101
II.4.5.	Caractérisation de la résistivité électrique des matériaux	105
II.4.6.	Caractérisation de la vitesse des ondes sismiques dans le matériau.....	113
II.5.	Conclusion du chapitre 2.....	118

III. Chapitre 3: Quantification expérimentale de la durabilité du limon traité à la chaux	121
III.1. Evaluation la durabilité vis-à-vis de la résistance en compression simple.....	121
III.1.1. Effet des cycles hydriques à l'eau de mer après 90 jours de cure	122
III.1.2. Effet du temps de cure	124
III.1.3. Effet de la salinité de l'eau sur l'évolution des Rc.....	128
III.1.4. Conclusion sur la durabilité vis-à-vis du paramètre résistance en compression simple.....	130
III.2. Evaluation de la durabilité vis-à-vis de l'érosion de conduit.....	131
III.2.1. Effets des cycles hydriques à l'eau de mer sur l'érosion.....	131
III.2.2. Effet du temps de cure sur l'évolution des lois d'érosion.....	143
III.2.3. Conclusion sur la résistance à l'érosion de conduit du sol traité à la chaux.....	146
III.3. Evaluation de la durabilité vis à vis de la résistance à l'érosion externe	147
III.3.1. Conséquence cycles hydriques à l'eau de mer sur la résistance à l'érosion externe.	147
III.3.2. Effet du temps de cure sur la résistance à l'érosion externe.....	153
III.3.3. Conclusion sur la durabilité vis-à-vis de la résistance à l'érosion externe du limon traité à la chaux	156
III.4. Caractérisation de la porosité et de son évolution	157
III.4.1. Effet de la cure sur la porosité et son organisation	157
III.4.2. Effet des cycles hydriques sur la porosité et son organisation	161
III.4.3. Conclusion sur l'étude de la porosité et de son organisation.....	165
III.5. Conclusion du chapitre III.....	166
IV. Chapitre IV : Caractérisation géophysique du limon traité à la chaux et de l'impact des cycles à l'eau de mer.....	168
IV.1. Evaluation de la résistivité électrique du limon traités à la chaux.....	168
IV.1.1. Influence de la teneur en eau proche de l'état de saturation sur la résistivité des matériaux	169
IV.1.2. Evolution de la résistivité en fonction du temps de cure	170
IV.1.3. Evolution de la résistivité en fonction du nombre de cycles	173
IV.1.4. Effet du temps de cure sur les variations de résistivité au cours des cycles d'humidification séchage.....	177

IV.1.5. Conclusion sur les mesures de résistivité électrique	180
IV.2. Evaluation de la vitesse de propagation des ondes sismiques dans le limon traité à la chaux	180
IV.2.1. Vitesse des ondes P et S fonction du temps de cure	181
IV.2.2. Vitesse des ondes P et S au cours des cycles hydriques	183
IV.2.3. Conclusion sur les mesures de vitesse des ondes P et S.....	186
IV.3. Synthèse sur la caractérisation géophysique du limon traité à la chaux	186
V. Chapitre 5 : Analyse comparée des phénomènes en vue d'une optimisation de l'auscultation des digues.	189
V.1. Durabilités relatives.....	189
V.1.1. Comparaison des vitesses de dégradation des différentes propriétés.....	189
V.1.2. Durabilité relative des matériaux : effet de la composition et de la densité.....	194
V.2. Relations entre résistance mécanique et érosion.....	197
V.2.1. Résultats.....	197
V.2.2. Discussion.....	198
V.3. Relations entre résistivité, érosion et résistance en compression simple	201
V.3.1. Résistivité et résistance en compression simple.....	202
V.3.2. Résistivité et érosion	204
V.3.3. Conclusion : influence prépondérante du sel sur la résistivité	207
V.4. Relation vitesses soniques et résistance en compression	208
V.4.1. Corrélations $R_c(V_p, V_s)$	208
V.4.2. Corrélations $R_c(E_0, G_{max})$	209
V.4.3. Conclusion : relation entre vitesse des ondes et résistance en compression simple.....	211
V.5. Conclusions du chapitre 5	212
Conclusion générale	215
Perspectives.....	218
Références bibliographiques.....	220
Annexes.....	227

Table des illustrations

Figure I.1 a) Portion de la digue à la mer de Camargue, protection du village des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) contre les submersions marines ; b) Digue d'un canal d'irrigation de Beaucaire (Gard).....	27
Figure I.2 : Représentation schématique d'une digue, des actions de l'environnement maritime qui modifient le niveau d'eau, et des fonctions de la digue et de ses matériaux.	27
Figure I.3 : Représentation théorique d'un sol. Dans un cas réel les différents volumes sont imbriqués.	29
Figure I.4: Variation du pH d'une solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans l'eau en fonction de la concentration en chaux (d'après Eades et Grim 1966).....	31
Figure I.5 : Evolution par RMN du silicium des minéraux d'une bentonite calcique en solution avec 10% de chaux (Pomakhina et al. 2012). Consommation des minéraux de la bentonite, et formation des composés cimentaires (CSH).....	33
Figure I.6: Observation au microscope électronique à balayage (MEB) d'une kaolinite Polwhite avant et après un traitement de 10% de chaux pendant 98 jours à 20°C, en suspension. D'après Maubec (2010).	34
Figure I.7 : Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive (GTS, 2000).	35
Figure I.8 : Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage dans le cas d'un sol de classe A2 traité à 2% de chaux vive. w_{in} la teneur en eau avant traitement, w_{fn} la teneur en eau après traitement (GTS, 2000).....	36
Figure I.9 : Synthèse de différentes études de résistance en compression simple (R_c), sur des sols de natures différentes et diverses teneurs en chaux.	37
Figure I.10 : Relation entre volume poreux et perméabilité pour une famille de pores dont le diamètre d'entrée est inférieur à $0.3\mu\text{m}$, et pour une famille de pores dont le diamètre d'entrée est supérieur à $3\mu\text{m}$. Il n'y a pas de relation entre le volume des pores de diamètre d'entrée inférieur à $0.3\mu\text{m}$ avec la perméabilité (Cuisinier et al., 2011).	38
Figure I.11 : Distribution de la taille des pores en fonction du mode de compactage et de la teneur en eau de compactage d'un limon traité à 3% de chaux. D'après Cuisinier et al. (2011).....	38
Figure I.12: Influence de la teneur en chaux sur la perméabilité des Argiles de Louiseville (Locat, et al. 1996) après 30 jours de cure. Les échantillons sont compactés statiquement.	39
Figure I.13 : Illustration de la contrainte de cisaillement et du taux d'érosion généré par un écoulement.....	43
Figure I.14 : Classification de l'érodabilité des sols et des roches basée sur la contrainte de cisaillement mesurée avec le EFA (Briaud, 2008).....	43
Figure I.15 : Classification de l'érosion pour les essais JET (Hanson and Simon, 2001)	44
Figure I.16: Classification de l'érodabilité des sol selon l'approche énergétique par corrélation des indices I_α obtenu par les essais HET et JET (Marot et al., 2011).....	45
Figure I.17: Masse érodée cumulée lors d'essai MoJET selon des protocoles de faible intensité (débit 600mL/min) et de forte intensité (2000mL/min). A gauche les résultats pour un limon non traité, à droite pour un limon traité à 2,5% de chaux.	46

Figure I.18: Digue expérimentale en limon traité et non traité, sur laquelle ont été réalisés des essais de surverse. D'après (Herrier et al., 2018).	46
Figure I.19: Erosion unitaire en fonction du temps et de la zone du talus. Comparaison de l'érosion du sol traité et non traité (Bonelli et al., 2018).	47
Figure I.20: Essais HET : Taux d'érosion fonction de la contrainte de cisaillement pour un limon de Camargue non traité et traité à 2% de chaux pour différent temps de cure (Herrier et al., 2012).....	47
Figure I.21 : Résistivité et conductivité électrique des sols et roches naturelles ((Palacky, 1988).	50
Figure I.22 : Evolution de la résistivité électrique d'un sol limoneux en fonction de la teneur en eau de compactage pour différentes masses volumiques sèches (Richard et al., 2005).	51
Figure I.23 : Influence de la fraction granulométrique grossière sur la résistivité électrique d'échantillons argileux compactés à l'optimum Proctor (Abu-Hassanein et al., 1996)	51
Figure I.24 : Relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau volumique pour trois salinités de fluide contenus dans la porosité d'un sol sans argiles (Kalinski and Kelly, 1993).	52
Figure I.25 : a) Variation de la résistivité électrique des mélanges ciment Portlandite avec différents composants ; b) Quantification par une méthode de diffraction des rayons X (DRX) de la diminution de la quantité de Portlandite pour les différents mélanges (modifié d'après Tashiro et al., 1994).	53
Figure I.26 : Polarisation des ondes de volume: (a) les ondes de compression / dilatation P; (b) les ondes de cisaillements S. (Lay and Wallace, 1995).	53
Figure I.27 : Les deux principaux types d'ondes de surface (Lay and Wallace, 1995).....	54
Figure I.28 : Vitesses typiques des ondes P et S dans les sédiments et dans les roches (source web :US-EPA)	54
Figure I.29: Evolution des modules élastiques E et G pendant 28 jours après le traitement à la chaux et la confection des éprouvettes. (a) et (b) correspondent au limon traité à la chaux, (c) et (d) à l'argile traité à la chaux. L'essai est reproduit pour 5 spécimens de chaque composition. (Toohey and Mooney, 2012).....	56
Figure I.30 : Représentation graphique de la notion de durabilité (interprétée d'après la norme NF EN 1990).	57
Figure I.31 : Photographie lors de la vidange en 2010 du canal Frian-Kern d'une des berges traité à la chaux (Gontran Herrier et al., 2012)	59
Figure I.32: Influence de l'eau de mer sur la densité de deux sols naturels compactés de natures différentes. D'après Otoko 2014.	62
Figure II.1 Localisation du site de prélèvement du sol de l'étude et de la plateforme Digue2020.....	67
Figure II.2: Coupe géologique de l'emprunt.....	67
Figure II.3 : Répartition granulométrique des grains du limon de Salin de Giraud, pour deux prises d'essai.	68
Figure II.4 : Classe du sol Salin de Giraud d'après la classification du GTR (2000).	69
Figure II.5 : Réalisation de l'essai PFC avec le limon de salin de Giraud. Le PFC est atteint entre 0.75 et 1% de chaux.	70
Figure II.6: Courbes de compactage Proctor pour différentes formulations (NF EN 13286-2).....	74
Figure II.7 : A gauche, épandage de la chaux sur le sol dans le malaxeur ; A droite, aspect du matériau après le malaxage.	75

Figure II.8 : Projection sur le diagramme des courbes Proctor des caractéristiques de densité et de teneur en eau des échantillons fabriqués au laboratoire. Les croix représentent les valeurs moyennes de l'ensemble des échantillons fabriqués pour chaque type d'échantillon. Les écarts types donnent la dispersion des valeurs autour de ces moyennes. La légende des courbes est donnée Figure II.6.	77
Figure II.9 : Suivi de la teneur en eau d'une éprouvette en condition de séchage jusqu'à une stabilisation de sa teneur en eau, puis en condition d'humidification pendant 24h. Essai réalisé sur 12 jours.	80
Figure II.10 : Illustration des conditions de séchage et d'humidification des éprouvettes. Un suivi photographique des éprouvettes est effectué à la fin de chaque phase pour contrôler visuellement l'homogénéité des éprouvettes, et notamment à leurs extrémités.	81
Figure II.11 : Exemple comparatif de la variation de teneur en eau au cours de 4 cycles hydriques après 28 jours de cure pour trois matériaux différents.	82
Figure II.12 : Exemple comparatif de la variation de teneur en eau au cours des cycles hydriques pour le matériau TW2% $\text{d}98$ en fonction du temps de cure précédant les cycles.	82
Figure II.13 : Photographie légendée de l'appareil HET.	87
Figure II.14 : Assemblage de la cellule d'érosion avec la grille percée placée en aval de l'échantillon.	89
Figure II.15 : Echantillon avant et après essai.	90
Figure II.16 : Schéma des grandeurs décrites par les lois d'érosion (Haghighi, 2012).	91
Figure II.17 : Représentation de la loi d'érosion empirique.	91
Figure II.18 : Schéma du conduit dans la cellule d'érosion et les pertes de charge associées.	92
Figure II.19 : Répartition granulométrique des effluents en fonction de la contrainte de cisaillement τ , pour un sol traité à 2% de chaux, après 90 jours de cure et 12 cycles hydriques.	96
Figure II.20 : Relation entre la masse sèche érodée pour différentes tailles de particule et la valeur du produit $Q \cdot T$ cumulé sur les intervalles de temps durant lesquels les effluents sont collectés.	97
Figure II.21 : Exemple des données acquises au cours d'un essai HET sur un échantillon TW2% $\text{d}98$ après 12 cycles, et définition de l'intervalle sur lequel sont définies les lois d'érosion.	98
Figure II.22 : Signal de turbidité lors d'un essai sur un échantillon en plexiglass donc non érodable. La turbidité initiale ne traduit pas l'érosion.	98
Figure II.23 : Schéma et photographie du module d'érosion du MOJET. En amont de cette partie se trouvent le réservoir d'eau et la pompe qui permet de contrôler le débit lors d'un essai (modifié d'après Haghighi, (2012).	99
Figure II.24 : Exemple d'un échantillon avant (à gauche) et après l'essai (à droite).	100
Figure II.25 : Exemple des résultats issus d'un essai MOJET. Le graphique de gauche permet de vérifier que le débit est bien constant au cours de l'essai.	100
Figure II.26 : Caractéristique concernant le de temps de cure et le de nombre de cycles hydriques imposés aux échantillons soumis à l'essai MOJET. Ce graphique est valable uniquement pour les essais MoJET.	101
Figure II.27: géométrie d'un ménisque dans un capillaire de rayon r	102
Figure II.28 : Résultat typique d'un essai de porosimétrie au mercure sur un sol traité à la chaux (1)	103
Figure II.29 : Résultat typique d'un essai de porosimétrie au mercure sur un sol traité à la chaux (2)	104

Figure II.30 : Essai de répétabilité sur un même échantillon de sol traité à 1% de chaux. A droite, les courbes du volume cumulé de mercure introduit dans l'échantillon à chaque essai et la valeur de porosité associée. A gauche les courbes donnant la répartition des tailles de pore dans le matériau.	104
Figure II.31 : Essai de répétabilité sur un même échantillon de sol traité à 2% de chaux. A droite, les courbes du volume cumulé de mercure introduit dans l'échantillon à chaque essai et la valeur de porosité associée. A gauche les courbes donnant la répartition des tailles de pore dans le matériau.	105
Figure II.32 : Présentation de la cellule de résistivité.	106
Figure II.33 : a) Branchement des différents éléments du dispositif de mesure de la résistivité électrique du matériau; b) Schéma des différents volumes investigués par les 5 paires successives d'électrodes annulaires de réceptions.	108
Figure II.34: Variation du rapport U/I en fonction de l'intensité traversant les échantillons.	111
Figure II.35 : Dispositif de mesure des temps de propagation des ondes P et S dans les éprouvettes de sol traité à la chaux.....	113
Figure II.36 : Exemple d'un signal acquis sur un échantillon type TW2% $\text{d}98$, pour les ondes P, après de 1 an de cure + 2 cycles hydriques. Ici le signal est stacké 256 fois	114
Figure II.37 : Même mesure que la figure précédente mais ici avec 3x256 stacks (ondes P)	115
Figure II.38 : Exemple de superposition des oscillogrammes pour les ondes S avec une inversion de polarité entre les sources, et la détection d'ondes S deux fois converties.....	116
Figure II.39 : Ratio signal sur bruit fonction du nombre de stacks.....	117
Figure II.40 : Bilan de la méthodologie d'étude de la durabilité d'un matériau d'une digue maritime.....	119
Figure II.41 : Tableau récapitulatif de l'ensemble des essais réalisés	120
Figure III.1 : Valeurs des résistances en compression simple (R_c) pour les différents matériaux étudiés en fonction du nombre de cycles hydriques.	122
Figure III.2 : Evolution de la résistance en compression simple en fonction du temps de cure pour les différents matériaux. Les courbes en pointillé entre 90 et 365 indiquent qu'en l'absence de mesures intermédiaires sur cet intervalle, la pente de ces droites est à prendre avec précaution.....	124
Figure III.3 : Comparaison de l'évolution de la R_c en fonction du temps de cure de différents sols traités à la chaux dont les valeurs sont issues de la littérature avec les résultats de nos essais.	126
Figure III.4 : Evolution de la R_c en fonction du nombre de cycles et du temps de cure pour le matériau TW2% $\text{d}98$	127
Figure III.5 : Evolution de la R_c en fonction du nombre de cycles et du temps de cure pour le matériau SW2% $\text{d}98$	127
Figure III.6 : Evolution de la R_c en fonction du nombre de cycles et du temps de cure pour le matériau TW2% $\text{d}95$	128
Figure III.7 : Evolution de la R_c en fonction du nombre de cycles et du temps de cure pour le matériau TW1% $\text{d}98$	128
Figure III.8 : Comparaison de l'évolution de la résistance en compression simple dans le cas de cycles à l'eau douce (Mehenni, 2015) et à l'eau de mer. La différence de limon et des durées de réalisation des cycles est à prendre en compte dans l'interprétation.	129
Figure III.9 : Résultats comparés des essais d'érosion HET pour le matériau TW2% $\text{d}98$, après 90 jours et un nombre croissant de cycles hydriques.....	132

Figure III.10 : Moyennes des valeurs des contraintes de cisaillement critique et du coefficient d'érosion en fonction du nombre de cycles pour le matériau TW2%d98.	133
Figure III.11 : Projection des essais HET après 0 et 12 cycles pour le matériau TW2%d98 après 90 jours de cure, dans le graphique de la classification de l'érosion de Briaud (2002). Comparaison avec l'érosion du sol non traité.....	134
Figure III.12 : Résultats comparés des essais d'érosion HET pour le matériau SW2%d98, après 90 jours et un nombre croissant de cycles hydriques.....	135
Figure III.13 : Moyennes des valeurs des contraintes de cisaillement critique et du coefficient d'érosion en fonction du nombre de cycles pour le matériau SW2%d98	135
Figure III.14 Projection des essais HET après 0 et 12 cycles pour le matériau SW2%d98 après 90 jours de cure, dans la classification de l'érosion de Briaud et al (2002). Comparaison avec l'érosion du sol non traité, non salé.	136
Figure III.15 : Résultats comparés des essais d'érosion HET pour le matériau TW1%d98, après 90 jours et un nombre croissant de cycles hydriques.....	137
Figure III.16 : Synthèse des valeurs des contraintes de cisaillement critique et du coefficient d'érosion en fonction du nombre de cycles pour le matériau TW1%d98.	138
Figure III.17 : Projection dans la classification de l'érosion de Briaud (2008) des essais HET après 0 et 10 cycles pour le matériau TW1%d98 après 90 jours de cure. Comparaison avec l'érosion du sol traité à 2% de chaux et celui non traité.....	139
Figure III.18 : Moyennes comparées des essais d'érosion HET pour le matériau TW2%d95, après 90 jours et un nombre croissant de cycles hydriques.	139
Figure III.19 : Synthèse des valeurs des contraintes de cisaillement critique et du coefficient d'érosion en fonction du nombre de cycles pour le matériau TW2%d95.	140
Figure III.20 : Projection des essais HET après 0 et 12 cycles pour le matériau TW2%d95 après 90 jours de cure, dans la classification de l'érosion de Briaud et al (2002).....	140
Figure III.21 : Résultats comparés des essais d'érosion HET pour les différents matériaux, après 90 jours de cure.	141
Figure III.22 : $k_{er} = f(\tau_c)$ pour les 4 matériaux étudiés après 0 à 12 cycles de séchage-humidification à l'eau de mer. Le sens des flèches indique la tendance d'évolution des paramètres de l'érosion avec l'augmentation du nombre de cycles.	142
Figure III.23 : Comparaison pour les 4 matériaux traité à la chaux de l'évolution des paramètres de l'érosion k_{er} et τ_c avec les cycles en fonction du temps de cure.	145
Figure III.24 : Masse cumulée du sol érodé au cours de l'essai MOJET, après 28 jours de cure, avec et sans cycles hydriques.	148
Figure III.25 : Photographie des échantillons à l'issue des essais MOJET. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.24.	148
Figure III.26 : Masse cumulée du sol érodé au cours de l'essai MOJET, après 90 jours de cure, de 0 à 6 cycles hydriques.	149
Figure III.27 : Photographie des échantillons à l'issue des essais MOJET. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.26.	149

Figure III.28 : Masse cumulée du sol érodé au cours de l'essai MOJET, après 1 an de cure, de 0 à 4 cycles hydriques.	150
Figure III.29 : Photographie des échantillons à l'issue des essais MOJET. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.28.	150
Figure III.30 : Masse cumulée du sol érodé au cours de l'essai MOJET, après 28 jours de cure, avec et sans cycles hydriques. Le matériau est traité à 2% de chaux et préparé avec de l'eau de mer.	151
Figure III.31 : Photographie des échantillons à l'issue des essais MOJET. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.30.	151
Figure III.32 : Masse cumulée du sol érodé au cours de l'essai MOJET, après 90 jours de cure, avec et sans cycles hydriques. Le matériau est traité à 2% de chaux et préparé avec de l'eau de mer.	152
Figure III.33 : Photographie des échantillons à l'issue des essais MOJET. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.32.	152
Figure III.34 : Comparaison des masses érodées totales au cours des essais MoJEt à 90 jours en fonction de la salinité initiale du sol et du nombre de cycles hydriques à l'eau de mer appliqués. Les étiquettes à côté des points indiquent la teneur en eau.	153
Figure III.35 : Masse cumulée de sol érodé au cours de l'essai MOJET (temps d'essai 12 min), en fonction du temps de cure et de la présence d'un traitement à la chaux, pour un sol ne contenant pas d'eau de mer. Pour les matériaux traités à la chaux, deux essais sont réalisés dans chaque cas mais la variabilité des résultats est inférieure à la taille des points sur le graphique.	154
Figure III.36 : Photographies des échantillons à l'issue des essais MOJET, en fonction du temps de cure. Comparaison avec le sol non traité. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.35.	154
Figure III.37 : Masse cumulée de sol érodé au cours de l'essai MOJET (temps d'essai 12 min), en fonction du temps de cure et de la présence d'un traitement à la chaux, pour un sol contenant de l'eau de mer. Pour les matériaux traités à la chaux, deux essais sont réalisés dans chaque cas mais la variabilité des résultats est inférieure à la taille des points sur le graphique.	155
Figure III.38 : Photographie des échantillons à l'issue des essais MOJET, en fonction du temps de cure. Comparaison avec le sol non traité. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.37.	155
Figure III.39 : Masse érodée totale à l'issue de l'essai MoJET, en fonction du temps de cure et de la présence d'eau de mer dans le sol.	156
Figure III.40 : Répartition de la taille des pores pour les 4 matériaux en fonction du temps de cure.	160
Figure III.41 : Répartition de la taille des pores des différents matériaux en fonction du nombre de cycles appliqués après 90 jours de cure.	162
Figure III.42 : Répartition de la taille des pores du matériau de référence en fonction du nombre de cycles appliqués après 1 an de cure.	163
Figure III.43 : Evolution de la répartition de la taille des pores sous l'effet du séchage puis de la ré-humidification au cours des premiers cycles de sollicitations.	164

Figure IV.1 : Résistivité fonction de la teneur en eau sur l'intervalle de teneur en eau 15 - 19 %. Les valeurs présentées sont issues des mesures sur plusieurs éprouvettes de chacun des différents matériaux traités à la chaux, dont le temps de cure est de 90 jours.	169
Figure IV.2 : Résistivité électrique des différents matériaux en fonction du temps de cure. La teneur en eau des échantillons traités à la chaux est d'environ 18 %, celle du sol naturel d'environ 16 %.....	171
Figure IV.3 : Résistivité électrique des 4 matériaux traités à la chaux en fonction du nombre de cycles hydriques à l'eau de mer réalisés. Comparaison avec le matériau de référence TW2%d98.	176
Figure IV.4 : Résistivité électrique des 4 matériaux traités à la chaux en fonction du temps de cure et du nombre de cycles hydriques à l'eau de mer réalisés.	179
Figure IV.5 : Suivi de la vitesse des ondes P pour les différents matériaux entre 150 et 365 jours.....	181
Figure IV.6 : Suivi de la vitesse des ondes S pour les différents matériaux entre 150 et 365 jours.	183
Figure IV.7 : Vitesse de propagation des ondes P et S dans les différents matériaux au cours des 6 cycles hydriques à l'eau de mer après 365 jours.	185
Figure V.1 : Evolution des propriétés normalisées par leurs valeurs à 0 cycle en fonction du nombre de cycles dans le cas du matériau de référence (cure 90 jours). La signification des légendes est donnée dans le texte.	191
Figure V.2 : Evolution des propriétés normalisées par leurs valeurs à 0 cycle en fonction du nombre de cycles dans le cas du matériau préparé à l'eau de mer SW2%d98 (cure 90 jours). La signification des légendes est donnée dans le texte.	192
Figure V.3 : Evolution des propriétés normalisées par leurs valeurs à 0 cycle en fonction du nombre de cycles dans le cas du matériau le moins dense TW2%d95 (cure 90 jours). La signification des légendes est donnée dans le texte.	192
Figure V.4 : Evolution des propriétés normalisées par leurs valeurs à 0 cycle en fonction du nombre de cycles dans le cas du matériau ayant la plus faible teneur en chaux TW1%d98 (cure 90 jours). La signification des légendes est donnée dans le texte.....	193
Figure V.5 : Variation de τ_c normalisée (à gauche) et de $1/k_{er}$ normalisé (à droite) en fonction du nombre de cycles hydriques imposés et des matériaux.	195
Figure V.6 : Variation de R_c normalisée par la valeur à 0 cycles du matériau une référence, en fonction du nombre de cycles hydriques imposés et des matériaux.....	196
Figure V.7 : Contrainte de cisaillement critique en fonction de la résistance en compression simple. Les valeurs présentées sont issues des mesures réalisées après 0 à 12 cycles hydriques à l'eau de mer, après 90 jours de cure pour chacun des 4 matériaux traités.	197
Figure V.8 : Corrélations linéaires entre R_c et τ_c pour chacun des matériaux. Le sens des flèches indique l'augmentation du nombre de cycles subi par le matériau.	198
Figure V.9 : Résistance en compression simple (R_c) en fonction de la résistivité électrique du matériau de référence au cours des cycles hydriques après 90 jours de cure. Les chiffres sur le graphique indiquent les nombres de cycles après lesquels les mesures sont réalisées.....	202
Figure V.10 : Tracé des couples (résistivité ; résistance en compression simple (R_c)) en fonction de leur composition et mise en relation avec le nombre de cycles subis. Les droites bleues définissent une enveloppe empirique dans	

laquelle se trouvent tous les valeurs de résistance en compression simple correspondant à une valeur de résistivité.	203
Figure V.11 : Contraintes de cisaillement critique τ_c , déterminées par les essais HET, et la résistivité du matériau correspondante. Les numéros indiquent le nombre de cycles réalisés avant la mesure. Le temps de cure avant les cycles est de 90 jours.	205
Figure V.12 : Equation des régressions linéaires pour chacun des matériaux. Le point correspondant à l'état initial à 90 jours de TW1%d98, et ceux correspondants à l'état initial et après 2 et 4 cycles de TW2%d98 ne sont pas pris en compte pour les régressions.	205
Figure V.13 : Contraintes de cisaillement critique τ_c et résistivité des matériaux après 1 an de cure correspondante. Les numéros indiquent le nombre de cycles réalisés avant les mesures.	206
Figure V.14 : relation entre résistance en compression simple et vitesse des ondes P et S pour le limon de Salin de Giraud traité à 2% de chaux, compacté à une densité d'environ 1694 kg.m^{-3} , préparé avec ou sans eau de mer. Les mesures sont réalisées après 1 an de cure et 0 à 6 cycles hydriques à l'eau une mer.	209
Figure V.15 : Relation entre la résistance en compression simple et les module mécanique G_{max} et E_0	210
Figure V.16 : Relation entre la résistance en compression simple et les modules mécaniques G_{max} et E_0 d'après les travaux de Nguyen, (2015). Comparaison avec nos travaux.	211
Tableau I.1 : Fonctions géotechniques des différents composants d'une digue en lien avec les actions auxquelles doit résister l'ouvrage (d'après CFBR ,2015).	28
Tableau I.2 : Définition des paramètres d'état d'un sol.	30
Tableau I.3 : Propriété de nature d'un sol et techniques d'études associées.	30
Tableau I.4 : Description des différentes types d'érosion interne (d'après (ERINOH, 2016b)).	42
Tableau I.5 : Table de classification de l'érosion des sols basée sur l'essai HET (Wan and Fell, 2002).	44
Tableau I.6 : Synthèse des différentes situations pour lesquelles le traitement de sols à la chaux a été utilisé (d'après CFBR, 2014).	58
Tableau I.7 : Synthèse de travaux sur le comportement de sols traités à la chaux soumis à des cycles d'humidification-séchage.	61
Tableau I.8 : Synthèse des résultats de l'étude de Haghghi (2012) sur l'influence de la salinité sur l'érosion d'un sol argileux.	63
Tableau II.1 : Composition de l'eau de mer artificielle selon la norme NF P18837.	72
Tableau II.2 : Synthèse des caractéristiques des cinq matériaux étudiés.	73
Tableau II.3 : Valeur des masses volumique à l'OPN en fonction des matériaux	74
Tableau II.4 : Valeur des densités visées lors de la confection des éprouvettes.	76
Tableau II.5 : Caractéristiques des phases de séchage et d'humidification constituant les cycles hydriques.	80
Tableau II.6 : Temps de cure et nombre de cycles hydriques à l'eau de mer pour le matériau TW2%d98.	84
Tableau II.7 : Temps de cure et nombre de cycles hydriques à l'eau de mer pour le matériau SW2%d98.	84
Tableau II.8 : Temps de cure et nombre de cycles hydriques à l'eau de mer pour le matériau TW1%d98.	84
Tableau II.9 : Temps de cure et nombre de cycles hydriques à l'eau de mer pour le matériau TW2%d95.	84

Tableau II.10 : Synthèse des essais de répétabilité et de répétitivité. Les coefficients de variation (%) est le rapport de l'écart type sur la moyenne des mesures de résistivité sur un même échantillon.	112
Tableau III.1 : Vitesse de décroissance des valeurs de la résistance en compression simple par rapport à la valeur de R_c initiale (R_c à 0 cycle) et vitesse absolue par cycles (en kPa/cycle).	123
Tableau III.2 : Valeur du coefficient $I_{HET} = -\log(Ker)$, et description de l'érosion d'après la classification de Wan & Fell (2002) en fonction du nombre de cycle pour le matériau TW2% ϕ 98.	133
Tableau III.3 : Valeur du coefficient $I_{HET} = -\log(Ker)$, et description de l'érosion d'après la classification de Wan & Fell (2002) en fonction du nombre de cycle pour le matériau SW2% ϕ 98.	136
Tableau III.4 : Valeur du coefficient $I_{HET} = -\log(Ker)$, et description de l'érosion d'après la classification de Wan & Fell (2002) en fonction du nombre de cycle pour le matériau TW1% ϕ 98.	138
Tableau III.5 : Valeur du coefficient $I_{HET} = -\log(Ker)$, et description de l'érosion d'après la classification de Wan & Fell (2002) en fonction du nombre de cycle pour le matériau TW2% ϕ 95.	140
Tableau III.6 : Porosité totale des différents matériaux en fonction du temps de cure. Attention l'erreur instrumentale est de 1%.	159
Tableau III.7 : Porosité des 4 matériaux en fonction du nombre de cycles à l'eau de mer. Attention, un défaut de l'instrumentation nous oblige à considérer une incertitude de ± 1 points autour des valeurs présentées dans ce tableau.	164
Tableau III.8 : Synthèse sur les variations des propriétés caractérisées suite à l'application du protocole de reproduction des sollicitations environnemental d'une digue maritime.	167
Tableau IV.1 : Synthèse sur la sensibilité des mesures électriques et sismiques aux variations des matériaux (âge, composition, histoire...).	188

Introduction

Contexte et problématique

Les digues de protection contre les submersions fluviales ou maritimes représentent plus de 10000 km et 1000 gestionnaires en France. Les enjeux sont considérables : une commune sur trois est concernée en moyenne et dans le contexte du dérèglement climatique, de l'élévation du niveau des océans et de l'urbanisation croissante ce chiffre ne fera qu'augmenter à l'avenir. Contrairement à d'autres types d'infrastructures, la moindre défaillance peut être lourde de conséquences. Le plus grand soin doit donc être apporté à la conception et à la réalisation de ces ouvrages, sans nécessairement recourir à des solutions souvent onéreuses, lorsque l'accès aux matériaux de qualité est difficile. Pour cela, dans le cadre du projet CPER et FEDER PACA Digue2020 (Faisant et al., 2019), il est prévu de permettre le déploiement opérationnel d'un concept innovant et économiquement intéressant de digue résistante à tous les mécanismes de rupture connus (stabilité, érosion interne, érosion de surface) : la digue en sol-chaux. Ce projet se décline en quatre axes : la conception de la plateforme en sol traité (*axe 1* porté par l'Irstea et le Symadrem), la surveillance géophysique de l'ouvrage (évolutions des propriétés du matériau, détection de fuites ou de défauts : *axe 2* porté par le Cerema) ; la durabilité du matériau en environnement maritime (*axe 3* porté par l'IFSTTAR) ; et la perception du risque submersif par les populations côtières (*axe 4* porté par l'UMR ESPACE).

La construction d'une digue de protection au moyen de cette technique exige une excellente connaissance du matériau sol-chaux. De nombreuses études ont permis de comprendre les réactions chimiques responsables des changements des propriétés physiques du sol à la suite du traitement à la chaux. Les conséquences du traitement à la chaux sur les propriétés mécaniques et hydromécaniques du sol sont connues mais l'effet à long terme de l'environnement sur ces propriétés du matériau a rarement été pris en compte. En particulier, le comportement à long terme de ce matériau lorsqu'il est confronté à l'action de la mer n'est pas connu. Lorsqu'un matériau est utilisé dans les digues, sa résistance à l'érosion est une propriété cruciale à caractériser. Pour une utilisation dans une digue maritime il faut donc déterminer l'évolution de cette propriété en prenant en compte les caractéristiques de l'environnement marin (salinité, périodes de submersion, périodes hors d'eau...). L'étude des conséquences de la salinité de l'eau et des variations d'état hydrique au niveau de l'organisation microstructurale du matériau devrait aider à la compréhension des mécanismes responsables de l'évolution des propriétés du matériau dans le temps en environnement marin côtier. Par ailleurs, les méthodes géophysiques sont

fréquemment utilisées pour la détection des points de faiblesse des digues. La caractérisation des propriétés géophysiques du sol traité à la chaux fait partie des connaissances à acquérir pour assurer la surveillance d'une digue en sol-chaux.

Ces travaux de thèse se focalisent donc sur une caractérisation multi-physique de la durabilité du matériau sol-chaux dans un environnement marin côtier.

Objectifs

L'objectif général de ce travail de thèse est de quantifier l'évolution, dans un environnement marin, des propriétés du matériau sol-chaux qui permettent à l'ouvrage de résister à différents mécanismes de rupture. Cette étude étant menée en laboratoire, le premier objectif est de reproduire de manière contrôlée et accélérée les sollicitations environnementales représentatives de celles s'exerçant sur une digue maritime. Ensuite il s'agit de définir les lois d'évolution des différentes propriétés du matériau sol-chaux en fonction des sollicitations environnementales reproduites au laboratoire. Les propriétés suivies sont choisies en fonction de leur importance dans une digue. L'étude des propriétés géophysiques du matériau vient en appui, pour caractériser de manière indirecte les conséquences de l'environnement sur les propriétés du matériau sol-chaux. L'objectif est de déterminer les valeurs des propriétés géophysiques d'un sol traité à la chaux dans ces différents états de dégradation consécutifs à l'exposition à un environnement marin.

Démarche scientifique

Pour répondre aux objectifs de cette thèse, nous avons caractérisé l'environnement par la salinité de l'eau et les alternances immersions-émersions qui sont deux sollicitations majeures susceptibles de détériorer les propriétés physiques et chimiques initiales des matériaux. Ces sollicitations ont été reproduites au laboratoire par des cycles de séchage et d'humidification (appelés aussi cycles hydriques) en utilisant de l'eau de mer reconstituée (norme NF P18837). Pour reproduire les hétérogénéités du matériau pouvant exister dans une digue en raison des contraintes de chantier (difficulté à contrôler l'homogénéité de la teneur en chaux) ou des choix de conception (choix de densité, choix de la nature de l'eau utilisée pour ajuster les teneurs en eau par rapport aux objectifs), quatre matériaux traités différents ont été reconstitués au laboratoire. L'un d'eux est considéré comme le matériau de référence par rapport auquel sont comparées les durabilités relatives des matériaux en fonction de leur composition (teneur en chaux, salinité) et de leur densité. Un cinquième lot d'éprouvettes de limon non traité est également étudié, servant de référence pour quantifier l'accroissement des performances du sol par le traitement à la chaux.

Le choix des propriétés des matériaux à évaluer est fait selon les deux critères suivants : i) propriétés liées à une des actions auxquelles le matériau d'une digue doit résister ; ii) essais classiquement utilisés dans la littérature. Les propriétés qu'il est choisi de caractériser sont la résistance mécanique en compression simple, l'érosion interne et externe, et la porosité au moyen de mesures en porosimétrie au mercure. Dans la perspective du monitoring de l'ouvrage Digue2020, les observables géophysiques sismiques et électriques sont choisies pour leur complémentarité qui semble intéressante pour la caractérisation d'une digue. Nous voulons vérifier cette hypothèse de complémentarité dans le cas d'un sol limoneux traité à la chaux. Cela justifie donc l'approche multi-physique adoptée au laboratoire. Par ailleurs, dans la perspective d'optimiser les essais à réaliser in situ sur une digue pour caractériser l'état de dégradation des matériaux constitutifs, des corrélations entre les différentes propriétés sont recherchées.

Contenu du mémoire

Ce mémoire s'articule en cinq chapitres.

Le premier chapitre contextualise les enjeux liés aux digues et à la durabilité de leurs matériaux constitutifs. En s'appuyant sur la littérature scientifique, les conséquences chimiques, mécaniques, hydromécaniques et de résistance à l'érosion du sol traité à la chaux des sols à court et long termes sont présentés. Il est constaté que peu d'études prennent en compte les effets de l'environnement lors de l'évaluation des performances du matériau au long terme. La durabilité du traitement à la chaux en contexte maritime est ainsi une notion qui n'a pas encore été abordée.

Le deuxième chapitre présente la méthodologie développée pour caractériser la durabilité d'un limon traité à la chaux dans un environnement maritime. Les sollicitations environnementales sont simplifiées par des cycles de séchage-humidification utilisant de l'eau de mer standardisée. Une étude paramétrique est définie pour quantifier l'influence des variations de teneur en chaux, de salinité du sol avant traitement et de la densité sur la durabilité par rapport à un matériau de référence. Sont également présentées les propriétés géomécaniques, microstructurales et géophysiques qu'il est choisi de suivre, et les essais de caractérisation associés.

Le chapitre 3 présente les résultats des essais de caractérisation de la résistance mécanique en compression simple, d'érosion interne et externe et de la porosité des différents matériaux en fonction des temps de cure et des cycles de séchage-humidification. Des conclusions sur la durabilité par rapport aux cinétiques de dégradation des différentes propriétés sont apportées.

Le chapitre 4 présente les caractérisations géophysiques des échantillons de sol traité à la chaux au cours de la cure et des cycles de séchage-humidification. Les sensibilités relatives aux différents paramètres du matériau (densité, teneur en chaux, salinité...) et la complémentarité des mesures de résistivité électrique et des mesures de vitesses de propagation des ondes sismiques sont mises en avant.

Le chapitre 5 présente une analyse comparée de l'ensemble des propriétés physiques et géophysiques des matériaux traités à la chaux au cours de la cure et suite aux sollicitations hydriques. Des conclusions sont données concernant la durabilité relative vis-à-vis des différentes propriétés et la durabilité relative par rapport au matériau de référence. Dans la perspective d'optimiser les programmes d'auscultation des digues in-situ, des corrélations sont recherchées entre les propriétés mécaniques et d'érosion et les propriétés géophysiques.

Une synthèse des principales conclusions et les perspectives ouvertes par ce travail sont présentées à la fin de ce mémoire.

En annexe, les détails du projet Digue2020 et la description de l'ouvrage expérimental prochainement construit sont présentés. Des données interprétées de certains essais d'érosion interne sont également présentées en annexe.

I. Chapitre 1: Traitement des sols à la chaux pour des digues durables: Etat de l'art

Les digues de protection contre les inondations sont des ouvrages à fort enjeu dans le contexte d'urbanisation croissante et de changement climatique. Une digue est par construction un ouvrage de protection, mais c'est également un facteur de risque au vu de l'aléa de rupture et des enjeux souvent importants à l'arrière de celle-ci. L'exemple emblématique est la rupture par brèche des digues de la Nouvelle-Orléans durant le cyclone Katrina en 2005, inondant 80% de la ville et faisant près de 2000 morts.

Le risque de rupture d'un ouvrage est aussi réduit par l'utilisation de matériaux plus performants pour remplir leurs fonctions, et dont les propriétés ne doivent être que faiblement affectées par l'environnement (eau, courant, agression chimique...). Le traitement à la chaux est une technique datant de l'antiquité, qui a été améliorée depuis grâce à la compréhension des mécanismes de réaction entre les constituants du sol et la chaux et leurs conséquences microstructurales. Les performances mécaniques et hydrauliques démontrées sur ce matériau en font un bon candidat pour une utilisation dans les digues. La prise en compte des facteurs environnementaux sur le comportement au long terme des sols traités à la chaux n'est en revanche que très récente et peu documentée, en particulier dans le contexte maritime.

La notion de durabilité d'un ouvrage linéaire est centrée sur la durabilité de ces éléments constitutifs les plus faibles du fait de leur nature ou de leur exposition à l'environnement. Le danger principal pour une digue est l'ouverture de brèches consécutive à l'érosion des matériaux. Une faiblesse localisée dans une digue peut mener à la ruine d'un ouvrage tout entier. L'évaluation de la résistance à l'érosion des matériaux d'une digue est essentielle pour garantir la sécurité d'un ouvrage, de même que la détection précoce des points faibles ou de désordres dans le corps de l'ouvrage. En France, il existe environ 8 000 kilomètres de digues contre les inondations fluviales et près de 1 000 kilomètres de digues contre les submersions marines, et il faut pouvoir les surveiller. L'inspection visuelle est essentielle mais ne permet pas de détecter la présence d'hétérogénéités internes à l'ouvrage ou à sa fondation. Les méthodes d'imagerie géophysique sont des outils essentiels à la surveillance des digues. Elles permettent d'imager l'intérieur des digues sur de nombreux kilomètres et de détecter des anomalies avant que celles-ci ne deviennent dangereuses. Ces méthodes présentent des limites vis-à-vis de la résolution et de l'interprétation des observables géophysiques, c'est pourquoi une recherche active y est consacrée.

Cet état de l'art comporte quatre parties.

La première concerne la définition d'une digue et ses fonctions dans son environnement. La deuxième partie concerne le traitement des sols à la chaux, la chimie de réaction et les conséquences à court et long terme sur les propriétés des sols traités à la chaux. La troisième partie est axée sur la vie d'un ouvrage dans le temps avec la notion de durabilité, le retour d'expérience sur des ouvrages traités à la chaux et la présentation des phénomènes d'érosion qui sont la cause principale de perte de fonction d'une digue. Cette partie traite également des techniques des propriétés géophysiques des sols en lien avec leurs paramètres d'état et de composition. La dernière partie concerne les approches expérimentales de caractérisation de la durabilité au laboratoire.

I.1. Les digues en terre : structure et fonctions

I.1.1. Définitions

Les digues de protection contre les inondations fluviales ou maritimes sont des ouvrages hydrauliques construits au-dessus du niveau des terrains naturels, généralement de faible hauteur (inférieur à 10 mètres), et de grande longueur (supérieure au kilomètre). D'après le code de l'environnement L.562-8-1 les digues sont les ouvrages construits en vue de prévenir les inondations et les submersions. Ces digues protègent des zones généralement anthropisées pour lesquelles l'importance des enjeux justifie la présence de telles protections (RTDMF, 2015). En condition normale, ces ouvrages ne sont pas soumis à une charge hydraulique, à l'action des courants ou des vagues (CIRIA, 2013). C'est lors des crues, grandes marées ou tempêtes que ces digues sont sollicitées. On appellera sollicitations environnementales la nature, la fréquence d'occurrence et l'amplitude de ces phénomènes pour une digue donnée. Il faut distinguer les digues de protection contre les inondations, des digues de canaux qui contrairement aux premières sont soumises à une charge hydraulique permanente (Figure I.1). Les digues de canaux sont d'ailleurs classées en France dans la catégorie des barrages (décret du 11 décembre 2007 sur la sécurité des ouvrages hydrauliques). Dans ce document nous nous intéresserons uniquement aux digues de protection contre les inondations, l'emploi du mot *digue* fera toujours référence à ces dernières (sauf indication contraire). Les propriétés des matériaux constitutifs des digues de protection contre les submersions marines sont au cœur de ce travail.

>

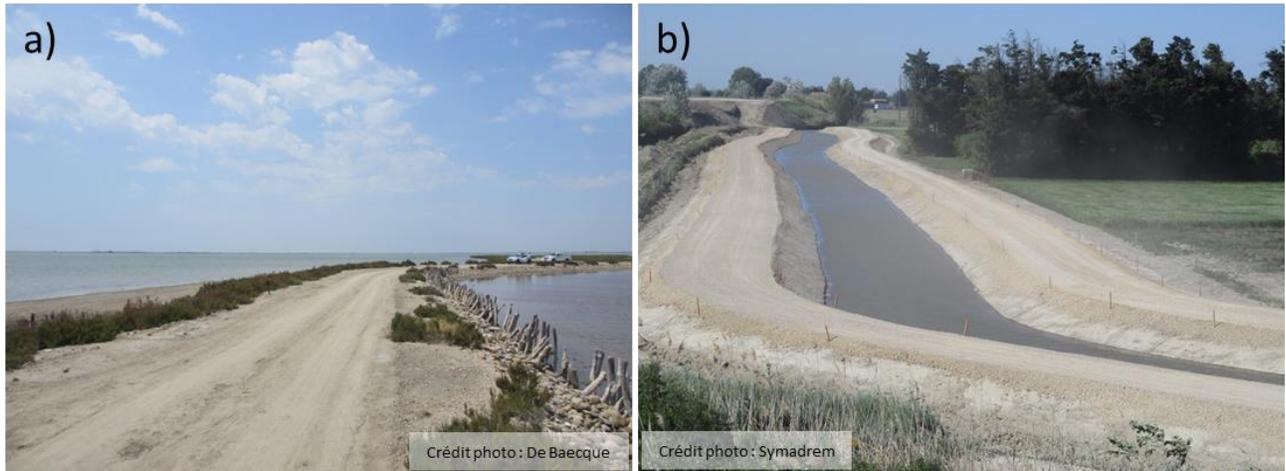


Figure I.1 a) Portion de la digue à la mer de Camargue, protection du village des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) contre les submersions marines ; b) Digue d'un canal d'irrigation de Beaucaire (Gard).

I.1.2. Structure d'une digue en relation avec ses fonctions

La fonction globale d'une digue est de retenir l'eau lors de l'élévation exceptionnelle de son niveau, sur une distance linéaire de plusieurs kilomètres. Elle doit résister à l'action de l'eau, c'est-à-dire à la charge hydraulique et à l'érosion, ainsi qu'à son poids propre (Figure I.2). Les matériaux de l'ouvrage doivent être choisis en conséquence pour réaliser chacun, une ou plusieurs fonctions.

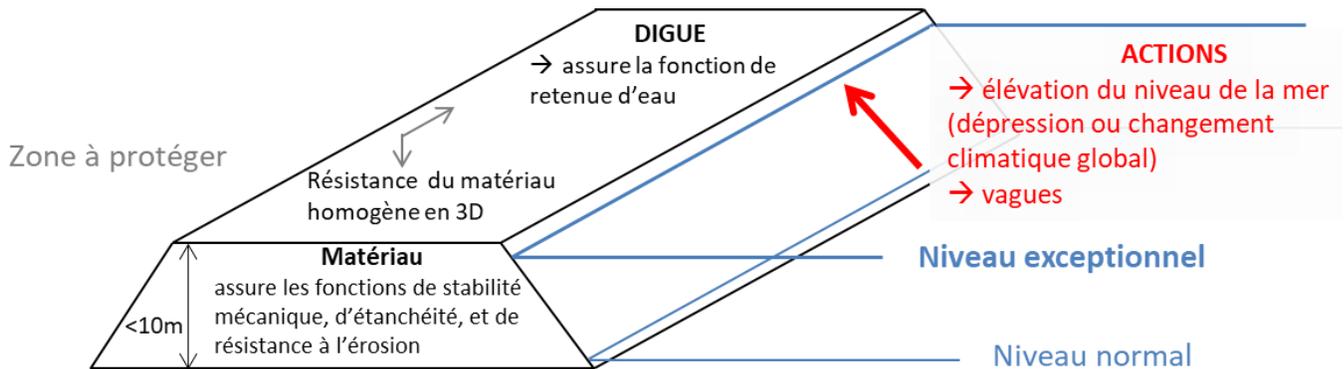


Figure I.2 : Représentation schématique d'une digue, des actions de l'environnement maritime qui modifient le niveau d'eau, et des fonctions de la digue et de ses matériaux.

Dans le cas d'une digue zonée les différents composants géotechniques de l'ouvrage assurent chacun une ou plusieurs fonctions qui permettent ensemble d'assurer à l'ouvrage sa fonction globale de protection contre la montée des eaux fluviales ou maritimes. Ces différents composants et fonctions sont listés dans le Tableau I.1. Les matériaux utilisés sont choisis en fonction de leur rôle dans l'ouvrage

et de l'adéquation de leur propriété avec le dimensionnement attendu. Le dimensionnement se fait par rapport aux états limites définis par le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR, 2015). Ces règles se retrouvent également dans l'International Levee Handbook (CIRIA, 2013) et la norme NF EN 1997-1 (Afnor, 2005).

Dans le cas d'une digue en remblais homogène, un unique matériau doit être capable d'assurer l'ensemble des fonctions géotechniques. Ces fonctions doivent être assurées sur tout le linéaire et durant toute la durée de vie de l'ouvrage. L'auscultation du corps de l'ouvrage par des méthodes géophysiques est un des moyens de contrôler l'homogénéité du corps de digue le long du linéaire, et de détecter des changements temporels des propriétés des matériaux.

Tableau I.1 : Fonctions géotechniques des différents composants d'une digue en lien avec les actions auxquelles doit résister l'ouvrage (d'après CFBR, 2015).

Composant géotechnique	Action s'exerçant sur la digue	Fonctions géotechniques possibles
Corps	Poids du sol Charge hydraulique	Stabilité mécanique d'ensemble Etanchéité ; Auto-filtration ; Résistance à l'érosion interne
Organe d'étanchéité	Charge hydraulique	Etanchéité Stabilité mécanique d'ensemble
Organe de drainage	Charge hydraulique	Drainage
Organe de filtration aux interfaces	Charge hydraulique	Filtration Ecoulement
Organe de protection	Batillage, embâcles, vagues, courants	Résistance à l'érosion externe
Structure type mur ou poids	Poids du sol Charge hydraulique	Stabilité mécanique d'ensemble Etanchéité
Sol support ou fondations	Poids du sol Charge hydraulique	Stabilité mécanique d'ensemble Etanchéité Auto-filtration

I.1.3. Amélioration des matériaux pour les digues maritimes

Dans le contexte du réchauffement climatique, l'élévation du niveau des océans augmente la fréquence de l'intensité des actions s'exerçant sur les digues maritimes. Les digues maritimes doivent donc être plus résistantes pour continuer à assurer leur fonction de retenue d'eau.

L'optimisation de la résistance d'un ouvrage peut passer par l'amélioration du sol utilisé pour réaliser les différentes fonctions de la digue. Le traitement des sols fins avec un liant hydraulique comme la chaux est une technique environnementalement et économiquement peu coûteuse qui permet cela. Des travaux l'on démontré à court et moyen terme, en milieu continental (Stapledon et al., 2005; Charles et

al., 2014; Herrier et al., 2018; Bonelli et al., 2018). En revanche, la fiabilité de cette technique dans le cas de l'exposition à l'eau de mer doit encore être démontrée. C'est l'objectif de cette thèse qui s'inscrit dans le projet Digue2020 détaillé dans l'ANNEXE 1.

Nous présentons dans cet état de l'art les propriétés des sols traités à la chaux, en l'absence de sollicitation environnementale, puis nous abordons la notion de durabilité des matériaux dans leur environnement et les études menées pour l'évaluer.

I.2. Propriétés mécaniques et hydromécaniques des sols traités

I.2.1. Définition d'un sol et de ses paramètres d'états

Le sol est un matériau constitué d'agrégats de grains et/ou de feuillets d'argile et/ou de matière organique que l'on appellera grains, qui forment le squelette du sol et de vides (pores) contenant de l'air et/ou de l'eau (Figure I.3). Les grains solides peuvent être de nature organique ou minérale. Les propriétés chimiques, mécaniques et hydromécaniques du sol dépendent de la proportion relative solide-fluide, de la nature et de l'agencement des grains, et de la nature des fluides présents.

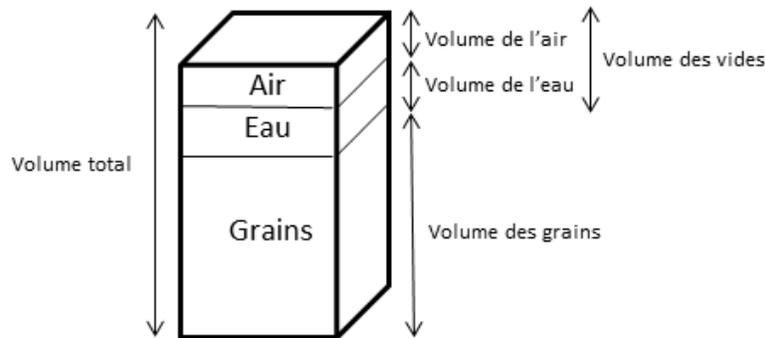


Figure I.3 : Représentation théorique d'un sol. Dans un cas réel les différents volumes sont imbriqués.

En géotechnique on distingue trois types de propriété : la nature des composants (Tableau I.3); les paramètres d'état relatif à l'assemblage de l'eau, de l'air et des grains du sol (Tableau I.2); et les propriétés relatives au comportement du sol sous sollicitations (résistance mécanique, résistance à l'érosion, etc.)

Tableau I.2 : Définition des paramètres d'état d'un sol.

Masse volumique du sol total γ (kg/m ³)	$\frac{\text{Masse des grains (kg)} + \text{masse de l'eau (kg)}}{\text{Volume total (m}^3\text{)}}$
Masse volumique du sol sec γ_d (kg/m ³)	$\frac{\text{Masse des grains (kg)}}{\text{Volume total (m}^3\text{)}}$
Porosité n	$\frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total}}$
Indice des vides e	$\frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume des grains}}$
Teneur en eau ω (%)	$\frac{\text{Masse de l'eau}}{\text{Masse des grains}}$
Degré de saturation S_r (%)	$\frac{\text{Volume de l'eau}}{\text{Volume des vides}}$

Tableau I.3 : Propriété de nature d'un sol et techniques d'études associées.

Propriété	Méthode d'étude
Nature minéralogique	Microscopie
Forme des grains	Microscopie
Poids ou masse volumique des grains et de l'eau	Pycnomètre (ISO 17892-3:2015)
Taille des grains et répartition par classe de taille	Analyse granulométrique (NF EN ISO 17892-4)
Surface spécifique et propriétés de surface	Essai au bleu de méthylène VBS (NF P94-068)
Limite d'Atterberg pour les sols fins	Essai au cône (NF P94-052-1) et au rouleau (NF P94-051)
Nature de l'eau	Analyse chimique, conductivité...

Parmi les différentes natures minéralogiques des grains du sol, les argiles ont une influence importante sur le comportement global du sol. Elles se distinguent des autres minéraux par une structure en feuillet de tétraèdres de silicium ((SiO₄)⁴⁻) et de couches d'octaèdres d'aluminium (Al(O,OH)₆). Cette structure leur confère une grande surface réactionnelle responsable de leur très grande réactivité chimique. Cette réactivité dépend également de la configuration de l'empilement des différents feuillets (Maubec, 2010). Les propriétés physico-chimiques des argiles sont entre autre sensibles à la teneur en eau du sol, au pH et à la concentration des différents ions libres dans le sol. L'ajout de la chaux dans un sol modifie tous ces paramètres et change donc les propriétés des sols argileux. La suite de cette partie s'intéresse aux réactions chimiques qui se produisent dans un sol lors de l'ajout de chaux vive et leurs conséquences sur les propriétés du sol à court et long terme.

I.2.2. Réactions chimiques entre la chaux et un sol

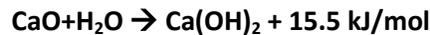
L'ajout de chaux vive dans un sol fin argileux modifie les propriétés du sol à court et long terme. Un ensemble de réactions chimiques, que nous détaillons ici, est à l'origine de ces différents changements.

La chaux vive est issue de la calcination du calcaire CaCO_3 à haute température (environ 900°C) selon la réaction suivante : $\text{CaCO}_3 + 209.2 \text{ kJ} \rightarrow \text{CaO(s)} + \text{CO}_2(\text{g})$

L'incorporation de chaux vive dans un sol humide donne lieu à quatre réactions successives. La cinétique des trois premières réactions est quasi instantanée, la 4ème réaction se déroule à l'échelle du mois ou de l'année jusqu'à la consommation totale des réactifs limitants (généralement le calcium apporté par la chaux).

1^{ère} réaction : Hydratation de la chaux

L'hydratation de la chaux vive se produit dès la mise en contact entre la chaux et l'eau du sol. Elle conduit à la formation d'hydroxyde de calcium :



Cette réaction exothermique est responsable de la modification de la teneur en eau du sol (CFBR, 2014).

En première approximation, 1% de chaux apporté réduit de 1% la teneur en eau du sol traité (GTS, 2000).

2^{ème} réaction : Ionisation de la chaux et libération des ions Ca^{2+} et OH^-

L'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 est dissout selon la réaction d'ionisation suivante :



La libération des ions hydroxyde (OH^-) provoque l'augmentation du pH du milieu. Cette augmentation est d'autant plus importante que la concentration en chaux est forte (Figure I.4). Le pH maximum atteint est de 12,6 (Clare et Cruchley 1957; Eades et Grim 1966; Locat et al 1996). Cette valeur est proche du pH d'une solution aqueuse saturée en chaux.

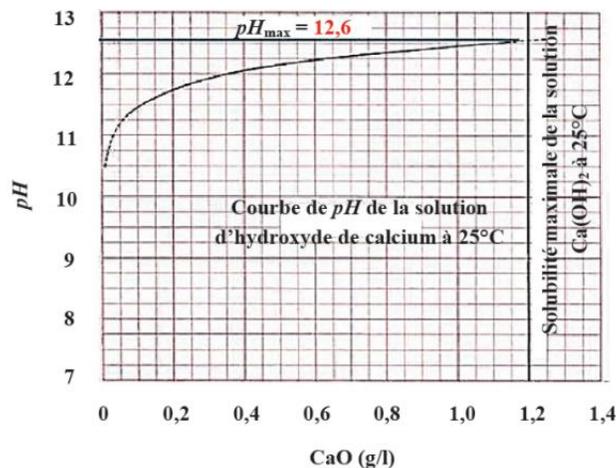


Figure I.4: Variation du pH d'une solution de Ca(OH)_2 dans l'eau en fonction de la concentration en chaux (d'après Eades et Grim 1966).

3^{ème} réaction : Modification de la Capacité d'Echange Cationique (CEC) et floculation des argiles

La CEC est une propriété chimique qui exprime la capacité d'une argile à échanger des cations avec son milieu environnant. L'augmentation de la concentration des ions Ca^{2+} dans le milieu provoque la modification des CEC des argiles. Les cations Ca^{2+} (divalents) se substituent aux cations monovalents absorbés à la surface des argiles et dans les espaces interfoliaires. Les charges à la surface des argiles sont modifiées provoquant l'agrégation rapide et non orientée des feuillets argileux. C'est le phénomène de floculation des argiles (Little, 1995; Rogers & Glendinning, 1996). Ce phénomène a des répercussions sur la granulométrie du sol, avec une diminution importante et immédiate des particules inférieures à $2\mu\text{m}$ (Osula, 1996).

La CEC contrôle la réactivité des argiles vis-à-vis de leur milieu, plus la CEC est grande plus l'argile est réactive aux modifications du milieu. Les argiles de type smectites ont une CEC autour de 100 cmol/kg, contre environ 50 cmol/kg pour les illites et 5 cmol/kg pour les kaolinites. On classe les smectites et les illites parmi les argiles à forte CEC et les kaolinites parmi les argiles à faible CEC.

Cette propriété a sans doute une grande importance pour évaluer les interactions des argiles avec l'eau et donc, lorsqu'elles sont au sein d'une digue les évolutions potentielles du sol avec des évènements de type crues ou submersions.

4^{ème} réaction : Les réactions pouzzolaniques

La libération des ions OH^- en solution entraîne une augmentation de pH. A partir d'un pH égal à 12 les minéraux argileux sont attaqués : le silicium et l'aluminium au centre respectivement des tétraèdres et des octaèdres sont mis en solution. Ces derniers réagissent avec les ions Ca^{2+} néo-absorbés sur la surface des argiles et forment des aluminates de calcium hydratés (C-A-H), des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et des silico-aluminates de calcium hydratés (C-A-S-H) qui précipitent, créant ainsi des liaisons de même nature que des composés cimentaires (Eades and Grim, 1966). La cinétique des réactions pouzzolaniques et la quantité de produits formés dépend de la nature des minéraux argileux d'origine et de la quantité de chaux (Nguyen 2015; Le Roux et Rivière 1969; Maubec 2010). Cette cinétique décroît avec le temps car la quantité de chaux diminue et leur mobilité dans le sol décroît avec la diminution du diamètre d'entrée des pores par les composés cimentaires (Locat et al., 1996 ; Le Runigo, 2008).

Empiriquement il a été montré qu'il existe un dosage en chaux minimal, nommé « Point de Fixation de la Chaux » (PFC), pour initier les réactions pouzzolaniques (Eades & Grim 1966; Locat et al., 1996). La Norme ASTM D6276-99a (2006) définit le PFC comme le dosage correspondant à une valeur de pH de 12,6. Cependant cette notion doit être considérée avec prudence en raison de la mauvaise répétabilité

des résultats, elle peut être utilisée comme une première indication de la quantité de chaux à ajouter pour traiter un sol et améliorer ses performances mécaniques (Le Runigo, 2008). Une nouvelle version de cette norme a été éditée en 2019 (ASTM D 6276 (2019)) mais n'a pu être mise en application dans cette thèse.

Les réactions pouzzolaniques ont lieu jusqu'à consommation totale des ions calcium et des ions aluminium et silicium disponibles. Ces réactions se traduisent par une baisse du pH et de la conductivité électrique dans le sol (Boardman et al., 2001; Maubec, 2010; Rao and Shivananda, 2005). La dissolution des minéraux et la formation croissante des composés cimentaires (C-S-H ; C-A-H) peuvent également être suivies par résonance magnétique nucléaire (RMN) du solide (Figure I.5) (Pomakhina et al., 2012)

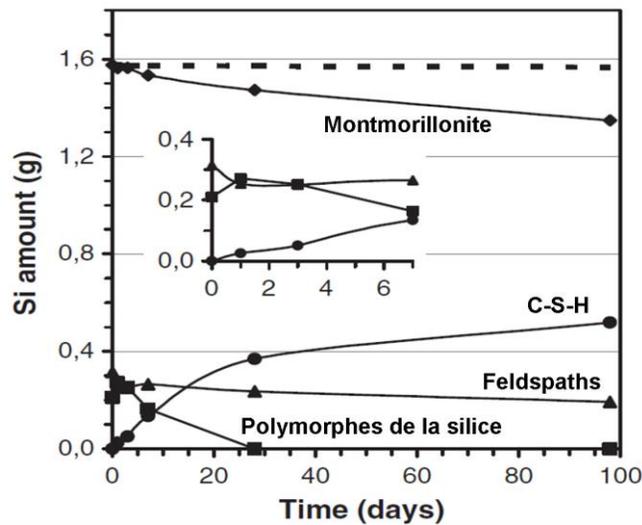


Figure I.5 : Evolution par RMN du silicium des minéraux d'une bentonite calcique en solution avec 10% de chaux (Pomakhina et al. 2012). Consommation des minéraux de la bentonite, et formation des composés cimentaires (CSH).

D'après certaines études, l'interaction entre la chaux et les argiles se ferait au niveau des surfaces latérales des agrégats d'argile (Maubec, 2010). Une kaolinite traitée à 10% de chaux en suspension dans une solution présente une diminution de la taille des agrégats par rapport à une kaolinite non traité et enroulement des agrégats sur eux-mêmes (Figure I.6). Ce sont des indices de la modification des particules à leur surface.

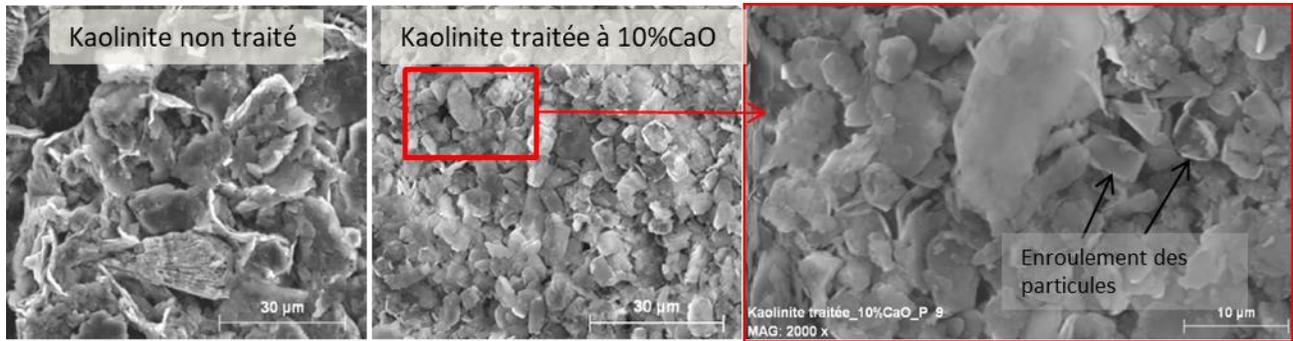


Figure I.6: Observation au microscope électronique à balayage (MEB) d'une kaolinite Polwhite avant et après un traitement de 10% de chaux pendant 98 jours à 20°C, en suspension. D'après Maubec (2010).

Réaction auxiliaire : la carbonatation liée à la présence de CO₂

La formation de la calcite résulte soit de :

- la carbonatation directe de la chaux hydratée : $\text{CO}_3^{2-} + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$ (a)
- la carbonatation des composés cimentaires: $\text{CO}_3^{2-} + (\text{C-S-H ou C-A-H ou C-A-S-H}) \rightarrow \text{CaCO}_3$ (b) ;
- la réaction entre les ions hydroxydes issus de la dissolution du CO₂ dans l'eau interstitielle, avec les ions Ca²⁺ libres en solution : $\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3$ (c)

La carbonatation peut être considérée comme défavorable vis-à-vis de résistance mécanique des sols, car elle consomme une partie de la chaux pour former des carbonates de calcium (a) plutôt que des composés cimentaires. En effet d'après les études sur les bétons, les carbonates n'augmentent pas la résistance au cisaillement du matériau autant que les composés cimentaires C-S-H, C-A-H & C-A-S-H (Thompson, 1968). Le développement de la calcite est d'autant plus défavorable à la résistance mécanique du sol lorsqu'elle provient de la carbonatation des composés cimentaires (Deneele et al., 2013).

En revanche, la précipitation de calcite participe à l'obstruction des pores et donc à la réduction de la conductivité hydraulique du sol traité (Deneele et al., 2013). Concernant les digues où l'on cherche une faible conductivité hydraulique la carbonatation ne semble pas être une réaction auxiliaire néfaste pour l'ouvrage, si elle ne détruit pas les composés cimentaires.

I.2.3. Comportement mécanique des sols traités à la chaux

I.2.3.1. Conséquences immédiates du traitement

La floculation des argiles consécutive au traitement entraîne des modifications du comportement mécanique du sol à court terme. La limite de plasticité (w_p) augmente vers des teneurs en eau plus grandes sans que la limite de liquidité (w_l) ne varie significativement (Figure I.7). L'indice de plasticité ($I_p = w_l - w_p$) diminue donc (GTS, 2000). Cependant l'amplitude de variation de I_p dépend de la

minéralogie des argiles. Pour des argiles à forte capacité d'échanges cationiques (CEC) comme les smectites, la diminution de I_p est particulièrement grande, tandis que pour des argiles à faible CEC comme la kaolinite, I_p est quasi inchangé, voire augmenté (Rogers and Glendinning, 1996). Pour un sol donné, l'ampleur des modifications de la limite de plasticité ne dépend pas du temps mais de la quantité de chaux ajoutée (Rogers and Glendinning, 1996).

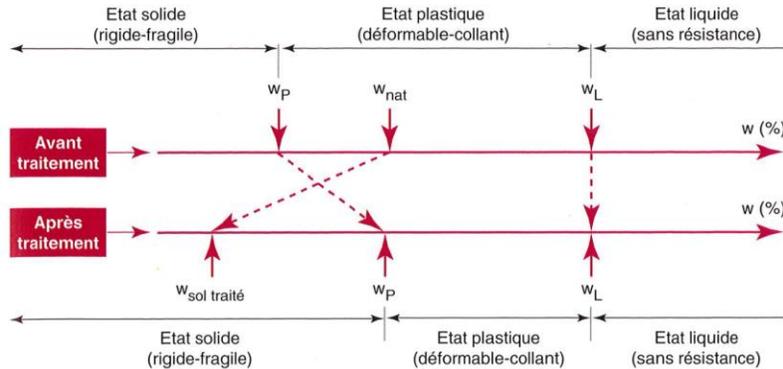


Figure I.7 : Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoquée par l'introduction de chaux vive (GTS, 2000).

L'angle de frottement interne entre les agglomérats augmente suite à la floculation des argiles, ce qui augmente la résistance au cisaillement et se traduit par l'élévation de l'indice de portance immédiat (IPI). Le point de fixation de la chaux (PFC) correspond à la transition entre l'amélioration du sol (effet à court terme) et sa stabilisation (développement des performances au long terme). Au-delà du PFC la limite de plasticité du sol n'est plus modifiée et les ions issus de l'ionisation de la chaux sont disponibles pour les réactions pouzzolaniques. Ce seuil dépend de la composition minéralogique du sol mais aussi de sa teneur en eau au moment du mélange (CFBR, 2014; Hilt and Davidson, 1960; GTS, 2000; Le Runigo, 2008; Locat et al., 1996; Nguyen, 2015; Rogers and Glendinning, 1996).

À l'échelle microstructurale, le traitement entraîne une diminution de la sensibilité à l'eau. Cela limite le phénomène de retrait-gonflement des argiles, phénomène susceptible de limiter la durabilité du matériau et de l'ouvrage. Cette diminution de sensibilité est liée aux échanges cationiques entre la solution interstitielle et les cations compensateurs (inter-feuillets) des argiles. Ces échanges limitent le gonflement osmotique des argiles, et par conséquent limitent le changement de volume des argiles avec les variations de teneur en eau (Delavernhe, 2011; Khattab et al., 2007; Maubec, 2010; Wakim et al., 2009).

Parmi les conséquences à court terme du traitement il faut également noter la modification des caractéristiques de compactage du sol. La masse volumique sèche de l'optimal Proctor du matériau

traité à la chaux est toujours plus faible que celle du même sol non traité (Figure I.8). Cette différence est d'autant plus importante que le sol est argileux (GTS, 2000; Cuisinier et al., 2011).

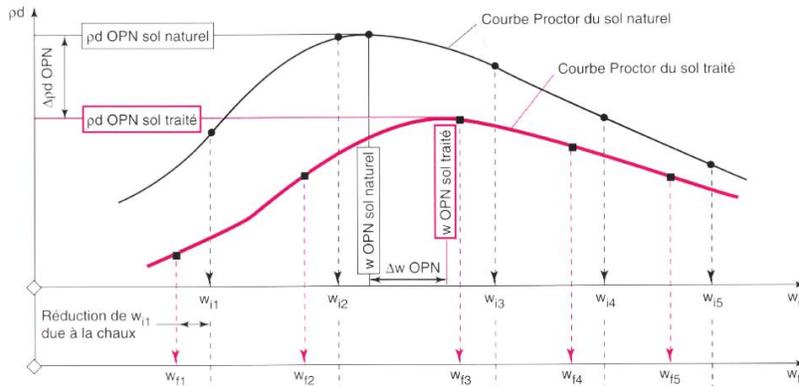


Figure I.8 : Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage dans le cas d'un sol de classe A2 traité à 2% de chaux vive. w_{in} la teneur en eau avant traitement, w_{fn} la teneur en eau après traitement (GTS, 2000).

I.2.3.2. Conséquences à long terme du traitement

Le traitement à la chaux permet d'augmenter les performances mécaniques des sols. Plusieurs auteurs ont montré une amélioration des paramètres de cisaillements effectifs (φ' , c'), une augmentation du module de Young et de la résistance à la compression simple. La cinétique d'amélioration de ces propriétés mécaniques apportée par les produits des réactions pouzzolaniques est lente (Bell, 1996; CFBR, 2014; Le Roux and Rivière, 1969; Locat et al., 1996; Maubec, 2010; Nguyen, 2015). Elle nécessite que le matériau reste isolé du milieu extérieur (système fermé), notamment pour conserver une teneur en eau constante, et que le matériau ne soit pas sollicité mécaniquement. Ces conditions sont appelées conditions de cure. La résistance à la compression simple est influencée par plusieurs paramètres dont la durée de la cure, la concentration en chaux et la nature des argiles. En d'autres proportions, la teneur en eau et la densité sont aussi à prendre en considération (Bell, 1996; Locat et al., 1990; Maubec, 2010). La température de cure influe sur la cinétique des réactions pouzzolaniques (De Windt et al., 2014; Le Roux and Rivière, 1969; Rao and Shivananda, 2005). Par exemple, la cinétique de formation des composés cimentaires C-S-H et C-A-H par réaction entre une bentonite et la chaux en solution est augmentée d'un facteur 5 entre les températures de cure 20°C et 50°C (De Windt et al., 2014).

L'aptitude du sol au traitement (NF P94-100) rend compte de la variabilité des cinétiques des réactions pouzzolaniques en fonction de la nature des argiles, (Maubec, 2010; Nguyen, 2015))

Les gains de résistance en compression simple (R_c) varient selon les études (matériaux, préparations différentes, etc.). Ils augmentent avec la teneur en chaux, la température et le temps de cure (Figure I.9).

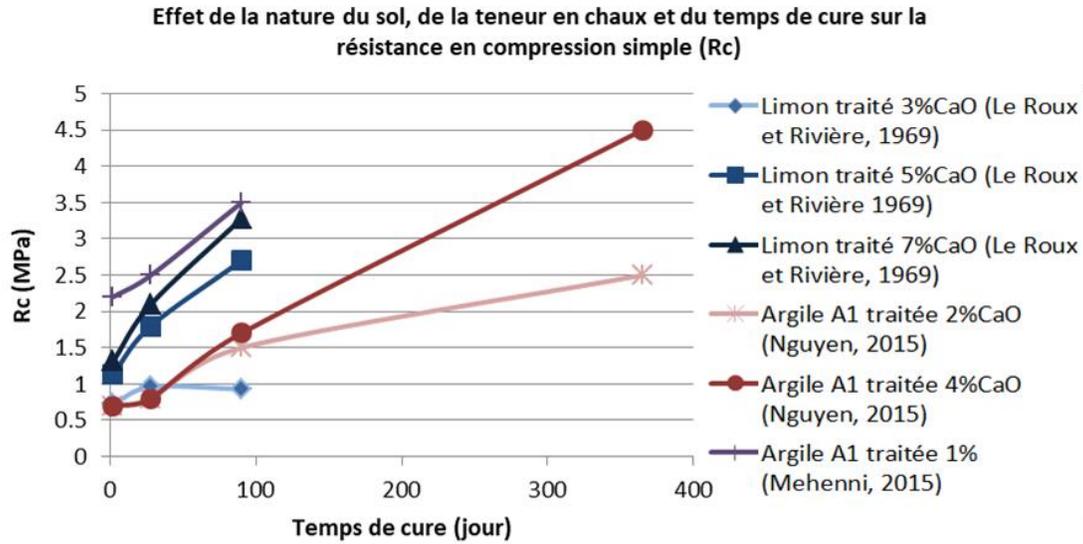


Figure I.9 : Synthèse de différentes études de résistance en compression simple (Rc), sur des sols de natures différentes et diverses teneurs en chaux.

I.2.4. Comportement hydraulique des sols traités à la chaux

I.2.4.1. Effet du mode de compactage et de la teneur en eau sur la perméabilité des sols traités à la chaux

Les actions de compactage ont pour but d'édifier une construction pérenne, en améliorant les propriétés mécaniques et hydrauliques du matériau. Le compactage permet de réduire, voire d'annuler les tassements résiduels, d'accroître la résistance du sol en terme de portance et de stabilité des talus (etc.), de diminuer la conductivité hydraulique du matériau et de garantir une meilleure tenue de l'ouvrage vis-à-vis de l'érosion, du gel, de la fissuration, du retrait et du gonflement (Serratrice, 2015).

Il a été vu précédemment que pour une même énergie de compactage, le traitement à la chaux diminue la masse volumique sèche du matériau en comparaison au même matériau en l'absence de traitement. Cette perte de densité est liée à la formation d'une famille de pores de diamètre inférieur à $0,3 \mu\text{m}$. Cette famille de pores est directement liée au phénomène de floculation des argiles (Nguyen 2015 ; Khattab et al. 2007). Cuisinier et al. (2011) ont montré que la perméabilité d'un sol traité à la chaux ne dépend que du volume des pores de diamètre d'entrée supérieur à $3 \mu\text{m}$ (Figure I.10). Cette observation se retrouve à plusieurs reprises dans la littérature (Khattab et al., 2007; Le Runigo, 2008; Lemaire et al., 2013). Le traitement à la chaux ne modifie donc pas significativement la perméabilité des sols.

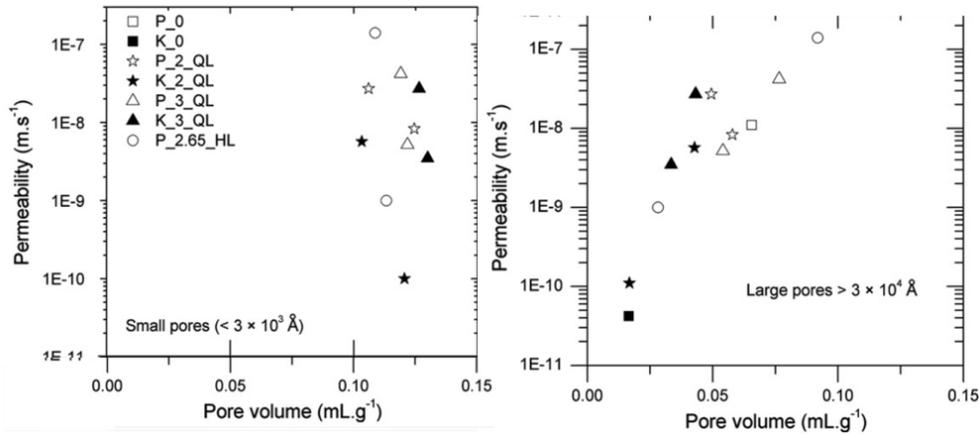


Figure I.10 : Relation entre volume poreux et perméabilité pour une famille de pores dont le diamètre d'entrée est inférieur à $0.3\mu\text{m}$, et pour une famille de pores dont le diamètre d'entrée est supérieur à $3\mu\text{m}$. Il n'y a pas de relation entre le volume des pores de diamètre d'entrée inférieur à $0.3\mu\text{m}$ avec la perméabilité (Cuisinier et al., 2011).

Le mode de compactage choisi peut en revanche amener à réduire la perméabilité des sols traités à la chaux. Des études expérimentales ont montré que le compactage par pétrissage permet d'obtenir une plus faible perméabilité qu'avec un compactage dynamique type Proctor (CFBR, 2014; Cuisinier et al., 2011; Herrier et al., 2013). Le pétrissage permet de réduire fortement le volume des pores supérieur à $3\mu\text{m}$ (3.10^4\AA) (Figure I.11) et donc la perméabilité du matériau.

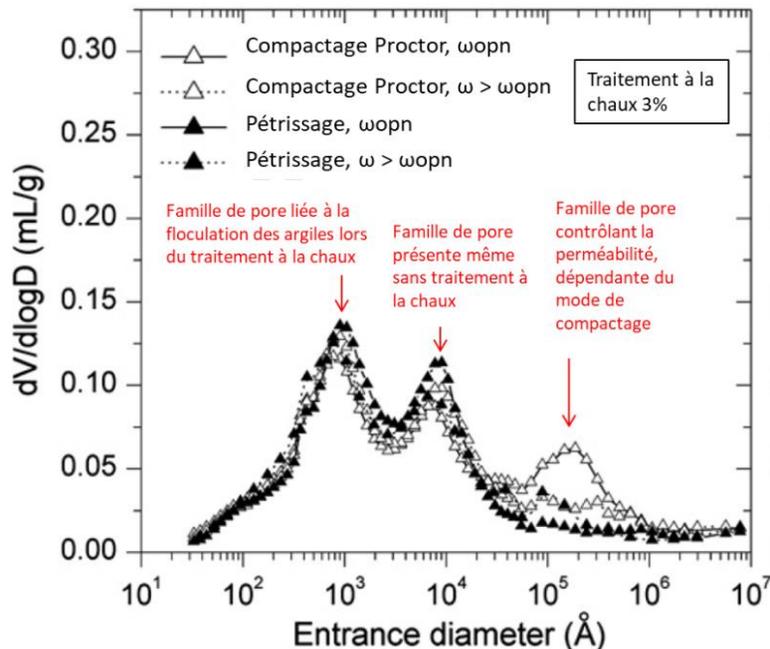


Figure I.11 : Distribution de la taille des pores en fonction du mode de compactage et de la teneur en eau de compactage d'un limon traité à 3% de chaux. D'après Cuisinier et al. (2011).

Certaines études ont également montré que le compactage côté humide de l'Optimum Proctor Normal ($w > w_{OPN}$) permet de réduire la perméabilité des sols traités à la chaux (Le Runigo, 2008; Cuisinier et al.,

2011; Herrier et al., 2013;). Dans le cas d'un compactage approprié, les perméabilités du sol traité sont du même ordre de grandeur que celle d'un même sol non traité, et ce malgré une densité sèche plus faible.

I.2.4.2. Effet de la teneur en chaux sur la perméabilité des sols traités à la chaux,

L'étude de Cuisinier et al. (2011) montrent que la perméabilité est avant tout contrôlée par le volume des pores de plus grande dimension ($>3\mu\text{m}$) et donc par le mode de compactage, quel que soit la teneur en chaux. Dans le cadre de leur étude, les teneurs en chaux utilisées se limitaient à 2 et 3%. Locat et al. (1996) ont quant à eux étudiés l'effet de la teneur en chaux sur la perméabilité d'une argile jusqu'à une teneur en chaux de 10%. Pour un même indice des vides, à 30 jours de cure, la perméabilité croît très sensiblement pour des faibles concentrations en chaux, inférieures au point de fixation de la chaux du sol étudié, et décroît jusqu'à un facteur 10 pour des très fortes teneurs en chaux (Figure I.12). Les auteurs expliquent ces phénomènes par la précipitation des composés cimentaires (C-S-H et C-A-H) dans les pores, réduisant le diamètre d'entrée des pores et limitant ainsi le flux d'eau.

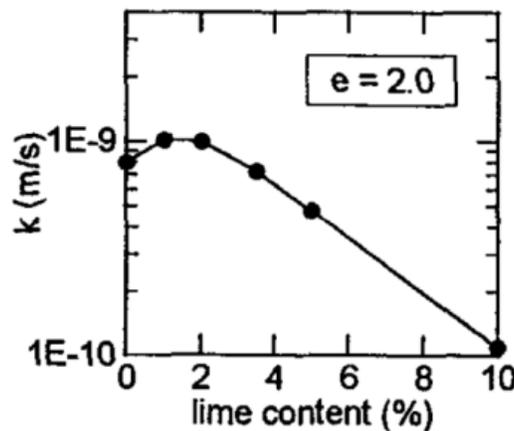


Figure I.12: Influence de la teneur en chaux sur la perméabilité des Argiles de Louisseville (Locat, et al. 1996) après 30 jours de cure. Les échantillons sont compactés statiquement.

Il faut noter que dans les faits, un traitement à 10% de chaux n'est pas économiquement ni techniquement réalisable pour un ouvrage. On peut donc retenir uniquement la conclusion de Cuisinier et al. (2011) quant à la faible influence de la teneur en chaux par rapport aux techniques de compactage. Dans le cadre de cette thèse on cherchera tout de même à comparer la distribution poreuse d'un limon pour deux dosages en chaux différents pour connaître l'influence de la teneur en chaux sur l'évolution de ce réseau poreux quand le sol est exposé à la pénétration répétée d'eau de mer.

I.3. Résistance à l'érosion des sols traités à la chaux

I.3.1. L'érosion, risque principal de défaillance d'une digue

La défaillance ultime d'un ouvrage hydraulique est sa rupture. Selon l'ICOLD (International Commission on large Dams), la rupture d'un ouvrage hydraulique n'est pas un accident qui détruit tout l'ouvrage mais un effondrement ou un mouvement d'une partie de l'ouvrage ou de sa fondation ne permettant plus à l'ouvrage d'assurer sa fonction de rétention d'eau (ICOLD, 1995).

La rupture est la conséquence de différents mécanismes de dégradation du matériau d'un tronçon de la digue. Une étude statistique a été menée par Foster et al. (2000) sur 11 192 ouvrages hydrauliques en terre dans le monde, parmi lesquels 136 ont subi des dommages. Dans 48% des cas ils ont été causés par l'érosion externe lors de surverse, dans 46% des cas par l'érosion interne et dans seulement 6% des cas restant par des problèmes de stabilité du talus. Plus récemment dans le cadre du projet ERINOH (Erosion Interne des Ouvrages Hydrauliques) une base de donnée de rupture a été constituée (Fry et al., 2012) recensant sur 26 mois depuis 2010 les ruptures des ouvrages en terre dans le monde. Sur 46 ruptures observées, 43 ont pour cause l'érosion, soit 97% des ruptures. Parmi ces 43 cas de rupture, 20 sont dus à l'érosion externe par surverse, 23 sont la conséquence d'érosion interne.

L'étude de la durabilité d'un matériau d'une digue doit donc évaluer les propriétés de résistance mécanique du sol mais surtout sa résistance à l'érosion dans le temps en fonction de la nature des sollicitations environnementales.

I.3.1.1. L'érosion externe

L'érosion externe est la déstructuration d'une surface sous l'effet des courants, des vagues, des vents ou de tout autre processus naturel (FEMA, 2004). Elle est initiée par l'arrachement des particules à la surface des digues, lorsque le matériau n'est pas suffisamment résistant par rapport aux agressions de l'environnement (CIRIA, 2013; ERINOH, 2016a). Ce phénomène entraîne la réduction significative de l'épaisseur et de la densité de la digue, pouvant mener à la rupture de l'ouvrage lors des inondations. Il existe trois types d'érosion externe des digues liées à l'eau. Elles se distinguent par la localisation de l'agent érodant et les parties de la digue affectées:

- l'érosion liée à la pluie, qui peut affecter les deux versants d'une digue;
- les affouillements liés aux courants lors des variations de niveau et aux turbulences d'une masse d'eau, qui affectent le côté en eau de l'ouvrage ;

- l'érosion par surverse, qui génère l'érosion régressive du talus derrière la crête, côté sec (RTDMF, 2015).

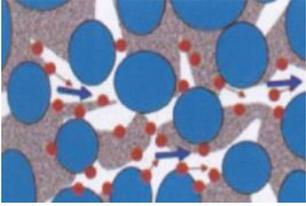
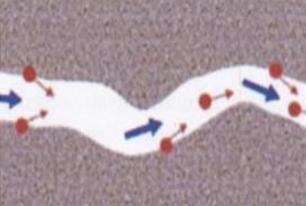
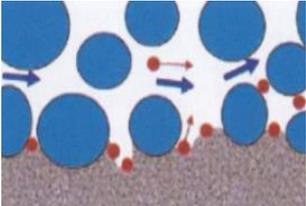
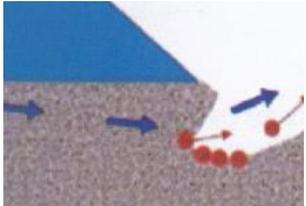
L'érosion de surface est susceptible de concerner tous les types de sol et c'est un phénomène à la cinétique extrêmement variable.

I.3.1.2. L'érosion interne

L'érosion interne est définie dans le Dictionnaire technique des barrages (1994) comme l'action de détachement et de transport de particules d'un sol par l'action mécanique d'une circulation interne d'eau. Elle se traduit par la formation de vides à l'intérieur d'un sol due à l'action d'arrachement ou de dissolution résultant des eaux d'infiltration. Les phénomènes d'érosion interne sont classés selon 4 types: la suffusion, l'érosion de contact, l'érosion régressive et l'érosion de conduit (ERINOH 2016). Le Tableau I.4 synthétise les caractéristiques des différents types d'érosion interne.

Dans le cas des sols fin traités à la chaux les risques d'érosion interne sont l'érosion de conduit et l'érosion régressive. Dans cette thèse, sera menée une étude au laboratoire pour déterminer les conditions d'initiation et la vitesse du développement de l'érosion de conduit d'un sol traité à la chaux, en fonction du nombre de sollicitations environnementales de type marines subies par le matériau.

Tableau I.4 : Description des différents types d'érosion interne (d'après (ERINOH, 2016b))

Type d'érosion	Schéma	Cause	Conséquence	Type de sol concerné
Suffusion		Perturbation de l'équilibre du squelette granulaire sous certaine condition de gradient hydraulique.	Détachement des petites particules de sol et transport dans les pores de la matrice granulaire sous l'action de l'écoulement dans le sol.	Sol peu ou pas cohésif avec une granulométrie étalée
Erosion de conduit		Apparition de fissures ou de défauts de densité qui favorise la formation d'un conduit dans lequel l'écoulement est facilité.	Arrachement des particules de la surface du conduit si la sollicitation hydrique est suffisante ; augmentation du diamètre du conduit.	Sols cohésifs
Erosion de contact		Écoulement parallèle à une interface entre deux milieux de granulométrie et de perméabilités très différentes	Détachement et transport des particules fines	Interface noyau étanche en sol fin d'une digue et fondation en sol plus grossier
Erosion régressive		Écoulement à l'interface entre le sol et une cavité dépassant un gradient hydraulique critique	Détachement des particules. Développement de phénomènes en sens inverse de l'écoulement	Sols granulaires non cohésifs

I.3.2. Classification de l'érosion des sols et des roches

Il existe dans la littérature plusieurs classifications de l'érosion des sols basées sur la contrainte de cisaillement d'un fluide sur un sol et le taux d'érosion (Figure I.13). Chaque classification est liée à un essai de caractérisation de l'érosion. La différence de ces classifications repose sur les différentes approches pour mesurer le cisaillement. La contrainte de cisaillement critique τ_c est la contrainte minimale pour laquelle les particules du sol sont arrachées. Pour un même sol, les différents essais d'érosion existant donnent des valeurs de cisaillement critique τ_c qui diffèrent jusqu'à un facteur 10 (Chedid et al., 2018).

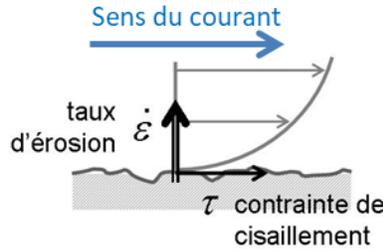


Figure I.13 : Illustration de la contrainte de cisaillement et du taux d'érosion généré par un écoulement

Briaud et al. (2008, 2017) proposent une classification basée sur l'essai « Erosion fonction apparatus » (EFA) développé au sein de son équipe (Briaud et al., 2001). Cette classification définit six classes et prend en compte les valeurs des cisaillements mesurés au cours d'un essai et la vitesse d'érosion qui correspond au taux d'érosion mais sans prendre en compte la densité des matériaux érodés (Figure I.14).

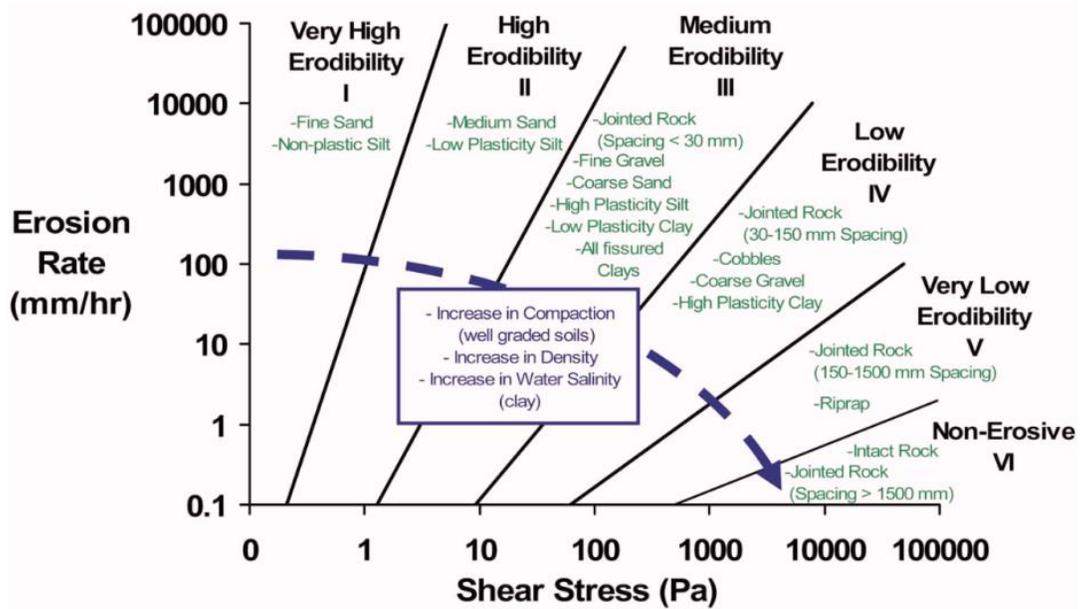


Figure I.14 : Classification de l'érodabilité des sols et des roches basée sur la contrainte de cisaillement mesurée avec le EFA (Briaud, 2008).

Wan and Fell, (2002) proposent une classification basée sur l'essai « Hole Erosion Test » (HET). L'essai est présenté en détail dans le chapitre 2. Cette classification définit 6 classes de sols en fonction de l'indice d'érosion I_{HET} (Tableau I.5). Cet indice est calculé avec l'équation (1) :

$$I_{HET} = -\log(k_{er}) \quad (1)$$

Avec k_{er} ($s.m^{-1}$) le coefficient d'érosion reliant le taux d'érosion ϵ ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) à la contrainte de cisaillement effective τ (Pa) et la contrainte de cisaillement critique τ_c (Pa) (équation (2)) :

$$\varepsilon = k_{er}(\tau - \tau_c) \quad (2)$$

Tableau I.5 : Table de classification de l'érosion des sols basée sur l'essai HET (Wan and Fell, 2002)

Numéro du groupe	Indice d'érosion I_{HET}	Description de l'érosion
1	<2	Extrêmement rapide
2	2-3	Très rapide
3	3-4	Modérément rapide
4	4-5	Modérément lent
5	5-6	Très lent
6	>6	Extrêmement lent

On notera que contrairement à la classification de Briaud, la contrainte de cisaillement n'est pas directement prise en compte pour la classification de l'érodabilité des sols.

Hanson and Simon (2001) proposent une classification à partir du seuil τ_c et du coefficient d'érosion K_d (même définition que le k_{er} du HET) déterminés avec l'essai Jet Erosion Test (JET) (Hanson and Robinson, 1993; Hanson and Cook, 2004 ; ASTM D5852). Cette classification est présentée Figure I.15.

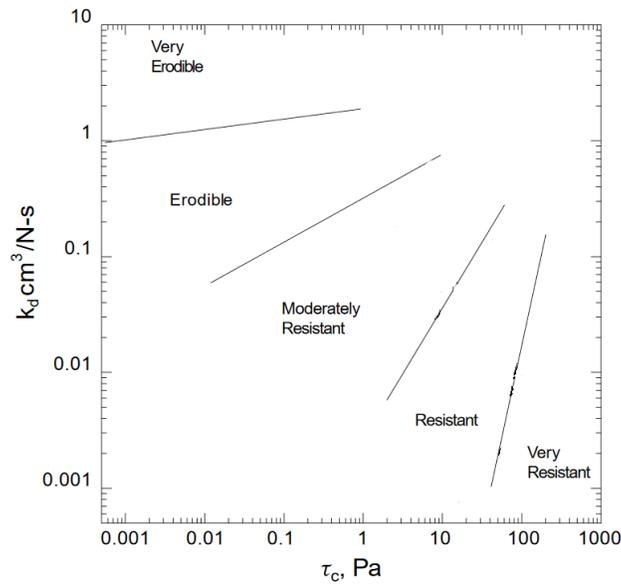


Figure I.15 : Classification de l'érosion pour les essais JET (Hanson and Simon, 2001)

Plus récemment une dernière classification a été proposée pour rapprocher les classifications issues des essais HET et JET, en se basant sur une approche énergétique pour quantifier l'érosion (Regazzoni, 2009; Marot et al., 2011). Pour chacun des essais est calculé un indice d'érosion I_α (équation 3) :

$$I_\alpha = -\log \frac{\text{Masse sèche érodée}}{E_{\text{érosion}}} \quad (3)$$

Avec $E_{\text{érosion}}$ l'énergie dissipée par l'érosion (Regazzoni, 2009).

Cette méthode donne des indices I_{α} relativement similaires pour les essais HET et JET. À l'image des autres classifications six catégories de sensibilité à l'érosion sont proposées par Marot et al. (2011) (Figure I.16)

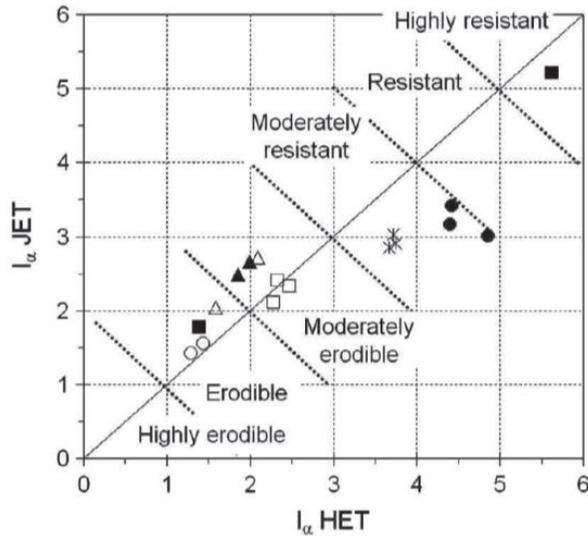


Figure I.16: Classification de l'érodabilité des sols selon l'approche énergétique par corrélation des indices I_{α} obtenu par les essais HET et JET (Marot et al., 2011)

Dans le cadre d'une approche sur la durabilité des matériaux d'une digue, ces classifications sont intéressantes pour estimer l'évolution de l'érodabilité d'un matériau en fonction de son âge et des sollicitations environnementales subies. Le passage d'une classe à une autre est un indicateur de la dégradation des performances du matériau. Le type de classification doit être choisi en fonction des essais de caractérisation réalisés.

I.3.3. Erodabilité des sols traités à la chaux

On appelle « érodabilité » la capacité d'un matériau de pouvoir être érodé par les fluides environnants. La « sensibilité à l'érosion » en est synonyme.

Le traitement à la chaux entraîne une modification de la nature du sol à cause de la modification des propriétés des argiles (floculation, échange de cation) et du développement des composés cimentaires. Par conséquent le traitement à la chaux est susceptible de modifier l'érodabilité de sol. Nous détaillons ici les quelques études sur l'érodabilité des sols traités à la chaux. Ces études concluent toutes à une augmentation de la résistance à l'érosion des sols traités à la chaux à court et moyen terme.

Les essais d'érosion externe avec un dispositif d'érosion à jets mobiles menés par Henensal & Duchatel, (1990) sur une argile non traitée et traitée à 5% de chaux montrent une réduction significative du taux d'érosion dans le cas de l'argile traitée (12.5 g/min pour l'argile non traitée contre 0.95g/min avec le traitement).

Les essais menés en laboratoire par Haghghi (2012) avec le même dispositif sur un limon traité à 2% montrent que quel que soit le débit ou la durée de l'essai la masse érodée est négligeable (Figure I.17).

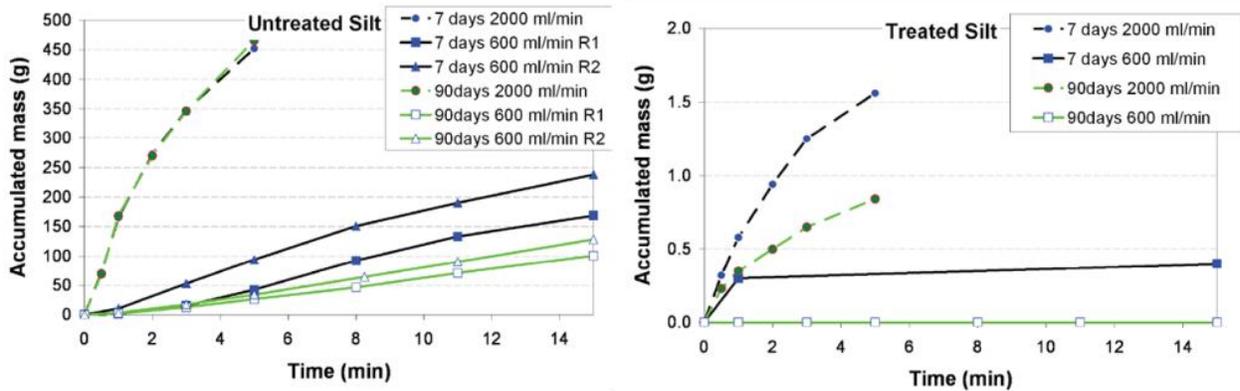


Figure I.17: Masse érodée cumulée lors d'essai MoJET selon des protocoles de faible intensité (débit 600mL/min) et de forte intensité (2000mL/min). A gauche les résultats pour un limon non traité, à droite pour un limon traité à 2,5% de chaux.

In situ dans le cadre du projet FUI DigueElite, des essais de résistance à l'érosion par surverse ont été réalisés sur une digue expérimentale (Bonelli et al., 2018). Une section de l'ouvrage est constituée d'un limon naturel compacté et l'autre section du même limon mais traité à 2% de chaux (Figure I.18). L'érosion durant l'essai de surverse est significativement plus faible dans le cas du limon traité à la chaux que dans le cas du limon non traité, et cela sur toutes les zones de la digue (Figure I.19)



Figure I.18: Digue expérimentale en limon traité et non traité, sur laquelle ont été réalisés des essais de surverse. D'après (Herrier et al., 2018).

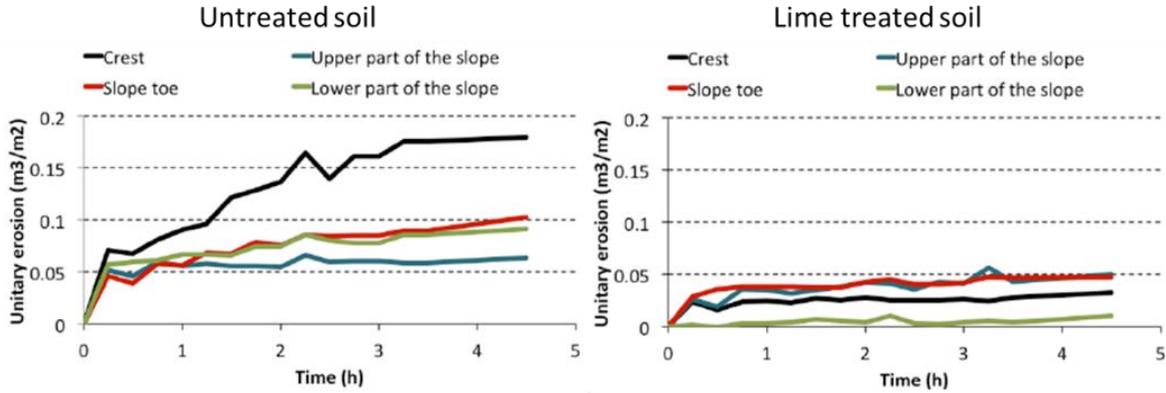


Figure I.19: Erosion unitaire en fonction du temps et de la zone du talus. Comparaison de l'érosion du sol traité et non traité (Bonelli et al., 2018).

Quelques études cherchent à caractériser l'érosion interne avec le dispositif d'érosion de trou (Hole Erosion test, HET). Les premiers essais menés par Haghghi (2012) n'ont pas permis de déclencher l'érosion d'un limon traité à la chaux avant d'atteindre les limites du dispositif. Les essais HET menés dans le cadre du projet SOTREDI (SOil TREatment for Dikes) avec un dispositif et un modèle d'interprétation différent ont montré que le traitement permet d'augmenter la contrainte critique d'érosion (τ_c) et de diminuer le coefficient d'érosion par rapport aux valeurs obtenues en l'absence de traitement (Herrier et al., 2012). La résistance à l'érosion est d'autant plus grande que le temps de cure augmente (Figure I.20).

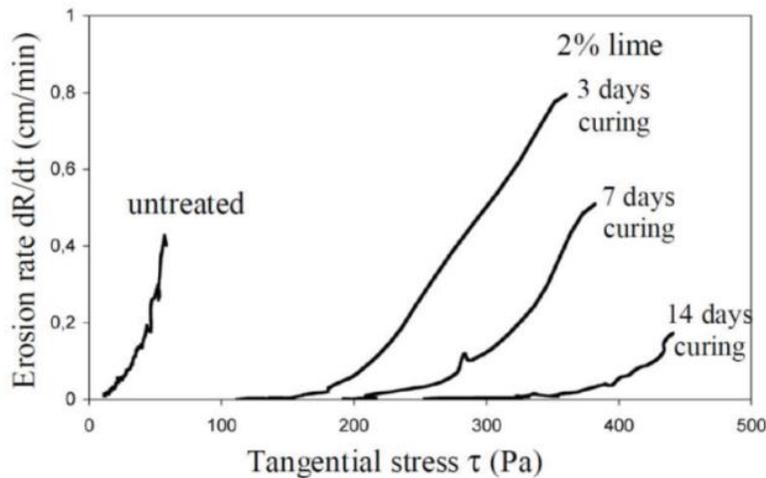


Figure I.20: Essais HET : Taux d'érosion fonction de la contrainte de cisaillement pour un limon de Camargue non traité et traité à 2% de chaux pour différent temps de cure (Herrier et al., 2012).

Mehenni (2015) s'est intéressé à la résistance à l'érosion de conduit d'un limon traité à la chaux soumis à des cycles d'humidification séchage. C'est la première étude sur l'érosion avec une approche sur l'effet de l'environnement sur les propriétés d'érodabilité du matériau traité à la chaux. Les essais HET menés ont montré une diminution de la contrainte critique τ_c (équation 2) et une augmentation du coefficient

d'érosion avec l'augmentation du nombre de cycles d'humidification-séchage subit par l'échantillon. Cependant les valeurs de τ_c sont contestables car les pertes de charge singulières du circuit n'ont pas été prises en compte pour le calcul de la contrainte de cisaillement τ ce qui entraîne une surestimation de ces valeurs.

La revue bibliographique montre un manque de travaux sur la prise en compte des effets de l'environnement dans l'évolution de la sensibilité à l'érosion à long temps de cure.

I.4. Réponses géophysiques des sols

La géophysique appliquée est utilisée pour déterminer de manière non destructive la nature d'un sol, ses paramètres d'état ou pour détecter des hétérogénéités dans un sol ou dans une structure.

I.4.1. Généralités sur les méthodes géophysiques

Les méthodes d'investigation géophysiques, qui sont des méthodes non intrusives, permettent généralement d'obtenir une image interne d'une digue en étudiant la distribution spatiale des propriétés physiques des matériaux du sous-sol sans perturbation de la digue elle-même. L'objectif de ces investigations dans le cas des digues est de détecter le plus tôt possible des désordres dans l'ouvrage, susceptibles de mettre en péril son intégrité (ERINOH, 2016a). Il peut s'agir d'écoulements internes à l'ouvrage, de défauts de densité ou des cavités, phénomènes susceptibles de générer de l'érosion interne. Ces méthodes sont rapides et peu coûteuses par rapport au coût potentiel généré par une rupture d'ouvrage. Elles permettent de mettre en place une surveillance régulière (voire continue) sur un certain linéaire. La difficulté est de choisir le protocole et le type de phénomène physique (électrique, électromagnétique, sismique) le plus adapté en fonction de la configuration de la digue et des paramètres à surveiller.

Chaque méthode d'auscultation repose sur un observable, c'est-à-dire le résultat d'un phénomène physique mesurable dans le sol, soit présent naturellement (méthodes passives) soit généré en réponse à une excitation par une source (méthodes actives). La profondeur ou le volume d'investigation dépend, pour chaque méthode, de la nature et des propriétés de la source, de la configuration d'acquisition (notamment distance entre source et capteur) et des propriétés du milieu lui-même.

La principale limitation de ces méthodes est que pour passer des observables géophysiques (mesures intégrantes comme la résistivité apparente) à la répartition spatiale des propriétés géophysiques (exemple : la résistivité), il faut résoudre un problème inverse et de gérer la non unicité des solutions à ce problème. Ensuite, il faut utiliser des relations issues de modèles théoriques ou empiriques pour relier les propriétés géophysiques à certaines propriétés du sol dont elles dépendent (densité, teneur en eau...). Le croisement entre des données géotechniques et les propriétés géophysiques permet en général d'améliorer les modèles empiriques reliant propriétés géophysiques et propriétés du sol.

I.4.2. Résistivité électrique des sols

I.4.2.1. Paramètres influençant la résistivité électrique d'un sol

La résistivité électrique ($\Omega.m$) d'un sol ou d'un matériau dépend de la nature de ses constituants et de ses paramètres d'état. C'est donc une méthode éligible pour la caractérisation des matériaux.

Un courant électrique peut circuler dans un sol principalement selon deux types de conduction (Waxman and Smits, 1968; Friedman, 2005; Beck, 2008) :

- La conduction électrolytique liée au déplacement des ions au travers des fluides de l'espace porale d'un sol ;
- La conduction de surface qui se fait par déplacement de cations dans la couche électrique externe de la surface des argiles.

À l'échelle macroscopique la conductivité électrique (i.e. l'inverse de la résistivité, et exprimée en Siemens par mètre) mesurée est la résultante de ces deux phénomènes.

Les principaux facteurs influençant la résistivité électrique d'un sol ont été largement décrits dans la littérature (Archie, 1942; Telford et al., 1990; Waxman and Smits, 1968; Mitchell, 1993; Bryson, 2005; Friedman, 2005; Richard et al., 2005; Beck, 2008). Il s'agit de :

- La nature des particules et leur proportion dans le sol (en particulier des argiles) ;
- La porosité (taille, forme, connectivité) en lien avec l'état de compactage ;
- L'état de saturation ;
- La concentration ionique des fluides dans la porosité ;
- La forme et la taille des grains ;
- La température.

Nous présentons ici la quantification de l'influence de quelques-uns de ces facteurs.

- La nature du sol a une influence prépondérante sur la résistivité. Les résistivités électriques des sols naturels sont distribuées sur une plage entre 10^2 et $10^6 \Omega.m$ (Palacky, 1988) (Figure I.21). Dans le cas des sols argileux, la conduction électrique se fait à la faveur des pores mais avant tout à la surface des minéraux argileux chargés électriquement. La nature des argiles a une influence prépondérante sur les paramètres d'état du sol et sur la résistivité (Mitchell, 1993).

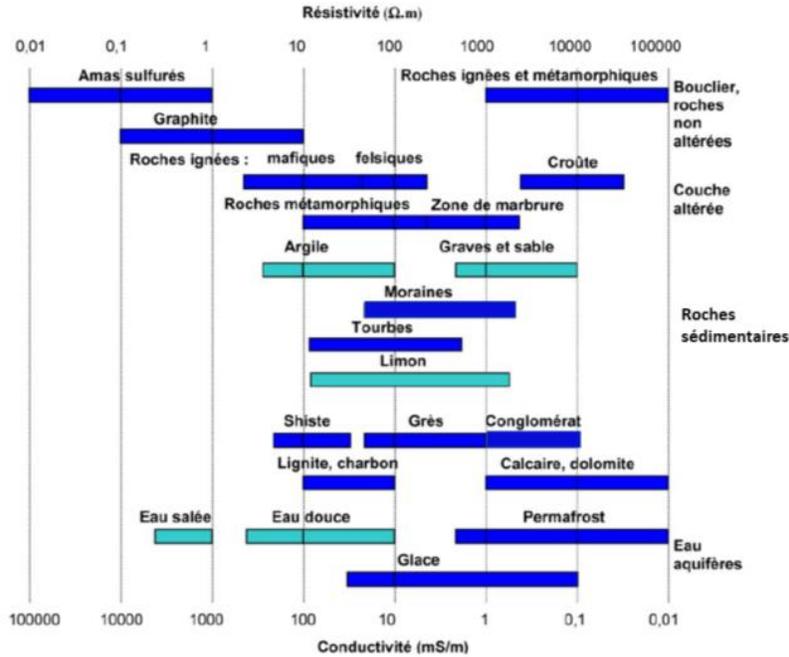


Figure I.21 : Résistivité et conductivité électrique des sols et roches naturelles ((Palacky, 1988).

- L'état de compactage (ou masse volumique sèche), en lien avec la porosité et l'état de contact entre les particules du sol (Kalinski and Kelly, 1993) influence la résistivité. A teneur en eau massique constante, la résistivité diminue quand la masse volumique sèche augmente. Cependant si le compactage est réalisé à une teneur en eau élevée, la résistivité n'est quasiment plus sensible à la masse volumique sèche (Richard et al., 2005) (Figure I.22).

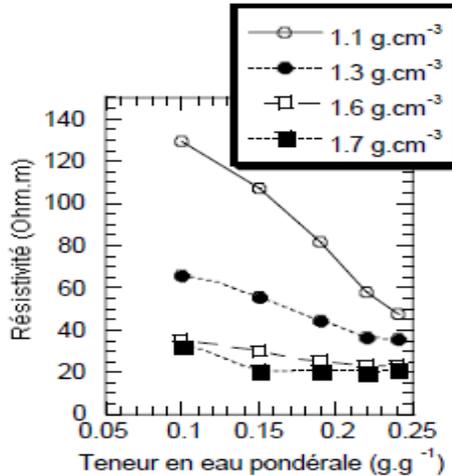


Figure I.22 : Evolution de la résistivité électrique d'un sol limoneux en fonction de la teneur en eau de compactage pour différentes masses volumiques sèches (Richard et al., 2005).

- La répartition granulométrique (Figure I.23) : la fraction argileuse est exclusivement contenue dans la fraction fine du sol, or cette fraction est responsable de la conduction de surface. La quantité de fines influence donc la résistivité. De plus la fraction grossière (>2mm) est principalement constituée de minéraux de résistivité très élevée (quartz, feldspath, calcite) en comparaison avec les argiles (Telford et al., 1990).

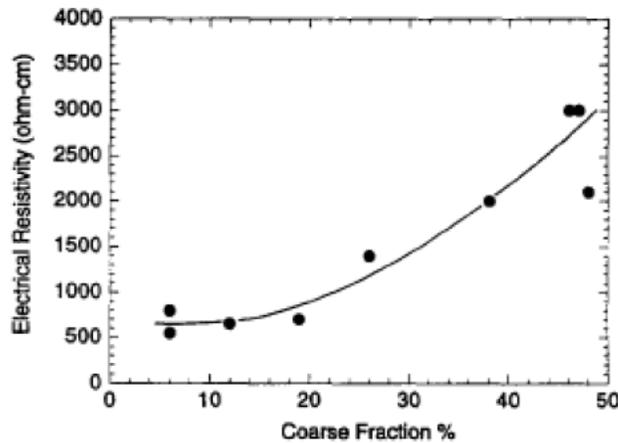


Figure I.23 : Influence de la fraction granulométrique grossière sur la résistivité électrique d'échantillons argileux compactés à l'optimum Proctor (Abu-Hassanein et al., 1996)

- La température : Keller et Frischknecht (1966) propose une relation empirique entre température et résistivité (Equation 10) :

$$\rho_{Tx} = \frac{\rho_{T_{18^{\circ}C}}}{1 + \alpha(Tx - 18)} \quad (10)$$

avec ρ_{Tx} , la résistivité d'un matériau à la température désirée Tx ; $\rho_{T_{18^{\circ}C}}$ la résistivité de ce matériau à la température de référence de $18^{\circ}C$; et α ($^{\circ}C^{-1}$) le coefficient permettant de corriger la

température (varie entre 0.02 et 0.03 unité). Cette relation empirique est essentielle pour les mesures in situ car pour des acquisitions sur une longue durée la température du matériau varie nécessairement.

- La salinité de l'eau porale : l'augmentation de la salinité entraîne une diminution quasi proportionnelle de la résistivité électrique du sol. De plus lorsque la salinité varie, la relation entre la résistivité et la teneur en eau est modifiée (Archie, 1942; Kalinski and Kelly, 1993; Rhoades et al., 1997) (Figure I.24). Cependant ces relations sont valables uniquement si c'est la conduction électrolytique qui contrôle la conductivité du milieu. En cas de présence d'argile dans le sol c'est la conductivité surfacique qui domine ce qui modifie l'influence de la salinité sur les valeurs de résistivités (Maillet et al., 2005).

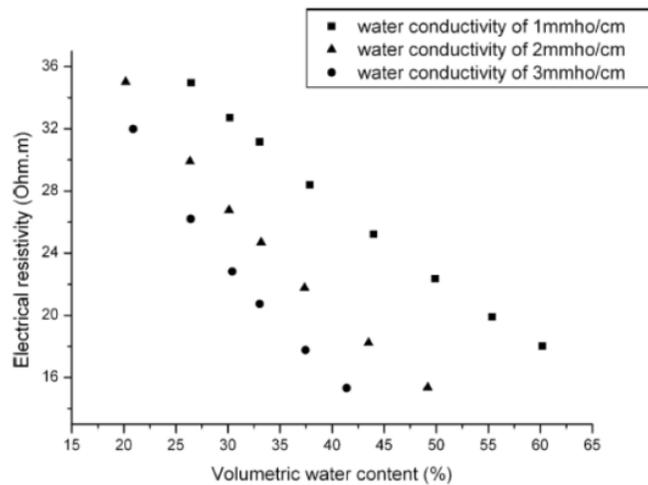


Figure I.24 : Relation entre la résistivité électrique et la teneur en eau volumique pour trois salinités de fluide contenus dans la porosité d'un sol sans argiles (Kalinski and Kelly, 1993).

I.4.2.2. Résistivité des sols traités à la chaux ou au ciment.

Le traitement d'un sol argileux à la chaux entraîne la modification de la nature des particules, la modification de la compacité maximale du sol et la formation de nouveaux composés (voir I.2). Il est donc possible de suivre les propriétés engendrées par les modifications des sols traités par des mesures de résistivité. Dans le cas d'utilisation de ciment, Tashiro (1994) a montré qu'il était possible de suivre la consommation du ciment dans différents mélanges (cendre volante, kaolinite, quartz entre autres) par des mesures de résistivité électrique. En comparant la résistivité durant 48h de ces mélanges (Figure I.25) et le dosage de la Portlandite durant cette même période, il conclut que la mesure de résistivité électrique permet d'évaluer la consommation de la Portlandite. Cette consommation de Portlandite en présence de minéraux argileux indique la formation de composés nouveaux appelés composés

pouzzolaniques ou composés cimentaires. On notera que l'activité pouzzolanique dépend fortement de la nature des minéraux en présence. La présence des minéraux siliceux ou silico-alumineux est indispensable pour que cette réaction ait lieu (Maubec, 2010).

Dans le cas du traitement à la chaux, nous n'avons pas trouvé dans la littérature d'études reliant traitement à la chaux et résistivité. Cependant, des mesures chimiques ont montré que, comme dans le cas du ciment, la chaux est consommée en présence d'argile au cours de réactions pouzzolaniques (Eades and Grim, 1966). La cinétique de réaction est cependant plus lente que dans le cas des ciments (Le Roux and Rivière, 1969; Maubec, 2010).

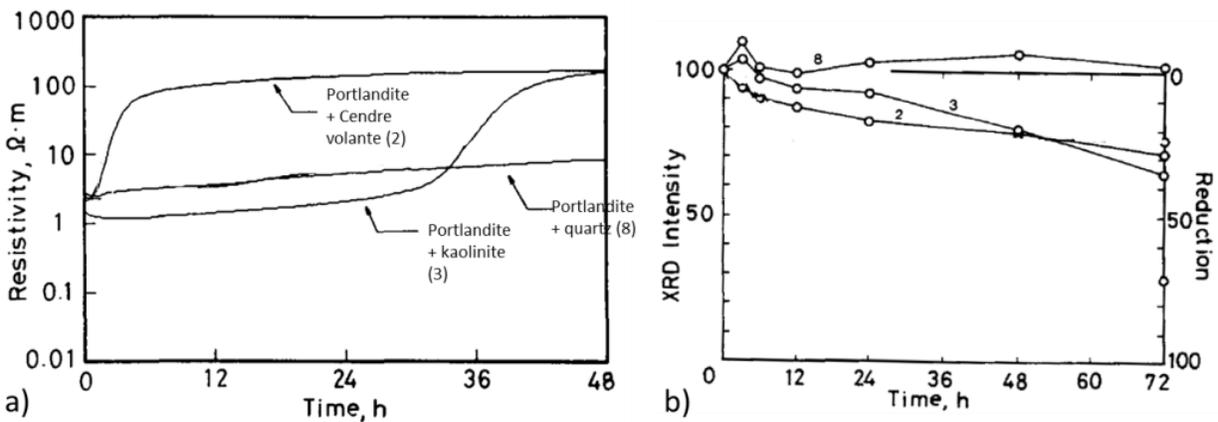


Figure 1.25 : a) Variation de la résistivité électrique des mélanges ciment Portlandite avec différents composants ; b) Quantification par une méthode de diffraction des rayons X (DRX) de la diminution de la quantité de Portlandite pour les différents mélanges (modifié d'après Tashiro et al., 1994).

I.4.3. Vitesses de propagation des ondes sismiques dans le sol

I.4.3.1. Généralités

Les méthodes sismiques reposent sur la propagation des ondes mécaniques de déformation dans le sol à la suite d'une brusque libération d'énergie. On distingue les ondes de volume P (de compression) et S (de cisaillement) (Figure I.26) et les ondes de surface qui se forment à l'interface entre le sol et l'air (Figure I.27).

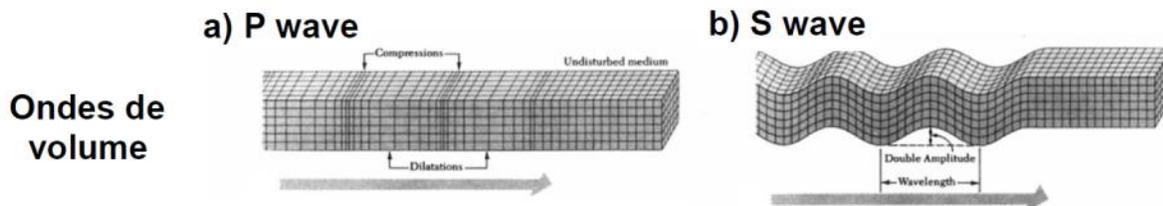


Figure 1.26 : Polarisation des ondes de volume: (a) les ondes de compression / dilatation P; (b) les ondes de cisaillements S. (Lay and Wallace, 1995).

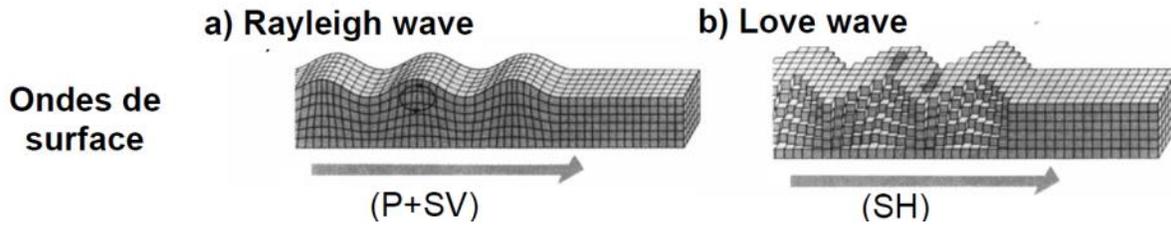


Figure I.27 : Les deux principaux types d'ondes de surface (Lay and Wallace, 1995).

L'imagerie du sous-sol par les méthodes sismiques utilisant les ondes de volume repose sur les lois de Snell-Descartes sur la réflexion et la réfraction des ondes. Les variations des propriétés physiques du milieu (densité, teneur en eau, nature) entraînent des variations de vitesse des ondes, la réflexion et la réfraction d'une partie d'entre elles. L'enregistrement des vitesses de propagation, et la reconstitution des trajectoires des ondes permettent de reconstruire une image de la géométrie des différentes discontinuités du sous-sol.

I.4.3.2. Relation entre vitesses et propriétés du matériau

La vitesse des ondes sismiques (exprimée en m/s) dépend de la nature des constituants du sol, de la densité, de l'état de cimentation des particules, et de l'état de saturation.

- Ordre de grandeur des vitesses sismiques en fonction de la nature des sols et des roches (Figure I.28)

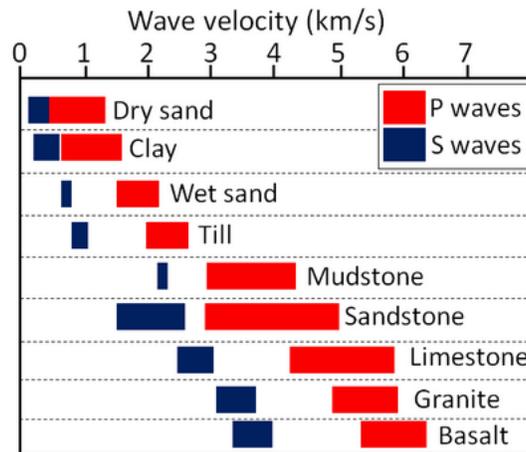


Figure I.28 : Vitesses typiques des ondes P et S dans les sédiments et dans les roches (source web :US-EPA)

- Relation entre saturation en fluide et vitesse des ondes P :

Pour les ondes de compression, la loi empirique de Wyllie et al., (1956), définie par la sommation des lenteurs (inverses des vitesses) dans chacune des phases est satisfaisante :

$$\frac{1}{V_p} = \frac{(1-n)}{V_{sf}} + \frac{n * S_r}{V_w} + \frac{n(1-S_r)}{V_g}$$

Avec V_{sf} la vitesse dans la fraction solide (définie par l'expérimentation), V_w la vitesse dans l'eau (environ 1500 m/s), V_g la vitesse dans la fraction gazeuse (environ 330m/s), n la porosité et S_r le degré de saturation.

- Relation entre V_p , V_s , la densité du matériau et les coefficients en module mécanique du matériau :

Dans un milieu solide linéaire, homogène et isotrope, la vitesse des ondes de compression (V_p) et de la vitesse ondes de cisaillement (V_s) dépendent des coefficients de Lamé et de la masse volumique ρ_d du milieu (en kg/m^3) (équations 11 et 12).

$$V_p = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho_d} \quad (11)$$

$$V_s = \sqrt{G/\rho} \quad (12)$$

Avec λ , le premier coefficient de Lamé (en Pascal) et G , le module de cisaillement (en Pascal) appelé aussi second coefficient de Lamé.

Les coefficients de Lamé s'expriment en fonction du module de Young E et du coefficient de Poisson ν .

Tous les solides élastiques ont une fréquence de résonance directement reliée à leurs conditions aux bords, leurs constantes élastiques, leur masse et leur géométrie. En mesurant la fréquence de résonance ou les vitesses de propagation des ondes, ainsi que la masse, et la géométrie de l'échantillon, il est possible de calculer le module élastique E_0 et le module de cisaillement maximal G_{max} . Dans l'approximation d'un volume cylindrique d'élançement supérieur à 2, des relations simples relient E_0 , G_{max} , les fréquences de résonance longitudinales (f_{rp}) et transverses (f_{rs}), la masse volumique ρ du milieu, la longueur de l'éprouvette L , et les vitesses V_p et V_s (Toohey et Mooney 2012; Hooton et al. 2000; Nazarian et al. 1999) (équations I.13 et I.14).

$$E_0 = \rho(2f_{rp}L)^2 \approx \rho(V_p)^2 \quad (I.13)$$

$$G_{max} = \rho(2f_{rs}L)^2 \approx \rho(V_s)^2 \quad (I.14)$$

I.4.3.3. Evolution des vitesses sismiques en lien avec le traitement à la chaux.

Toohey and Mooney (2012) ont calculé les modules E et G à partir des fréquences de résonance d'éprouvettes cylindriques constituées d'un limon et d'une argile traités à 6% de chaux, chaque jour pendant 28 jours (Figure I.29). Les modules augmentent de manière hyperbolique les premiers jours puis le taux d'évolution décroît progressivement mais sans atteindre d'asymptote. Les valeurs des modules

sont influencées par la minéralogie et les réactions qui se produisent en présence de chaux. On note une augmentation de module plus importante dans le cas de l'argile qui témoigne d'une plus grande réactivité à l'ajout de chaux dans le matériau. Il faut noter également une plus grande variabilité entre échantillons pour le limon que pour l'argile, en lien avec un sol naturellement moins homogène qu'une argile.

La mesure de la vitesse des ondes P et S ou des fréquences de résonance est sensible à l'évolution des propriétés de sol traité à la chaux. C'est une méthode de laboratoire éligible pour cette thèse pour suivre les matériaux traités au cours de leur cure. Si les sollicitations imposées aux échantillons dégradent les propriétés mécaniques du matériau traité, cette méthode devrait permettre de quantifier ces pertes sans détruire les échantillons.

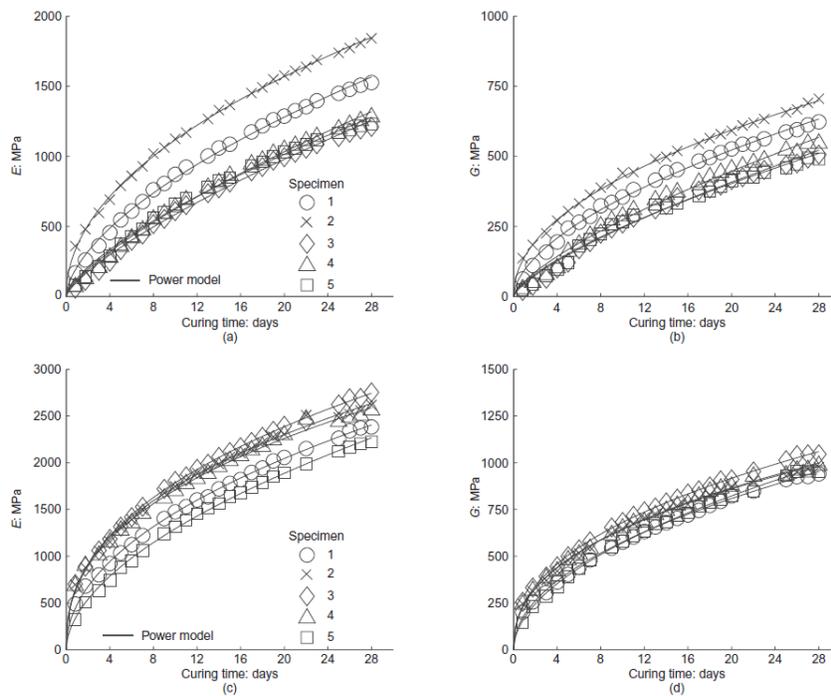


Figure 1.29: Evolution des modules élastiques E et G pendant 28 jours après le traitement à la chaux et la confection des éprouvettes. (a) et (b) correspondent au limon traité à la chaux, (c) et (d) à l'argile traité à la chaux. L'essai est reproduit pour 5 spécimens de chaque composition. (Toohey and Mooney, 2012).

I.5. Durabilité des matériaux et des ouvrages

I.5.1. Durabilité d'une digue

La durabilité d'un ouvrage au sens de la norme NF EN 1990 « Base de calcul des structures », est la durée de son aptitude à accomplir sa fonction. Dans le cas des digues, la performance de l'ouvrage est équivalente à la performance de son constituant le plus faible. Évaluer la durabilité d'une digue c'est donc évaluer la durabilité de son (ou ses) matériau(x) constitutif(s) en prenant en compte leurs possibles hétérogénéités.

Selon l'ICOLD (International Commission on large Dams), la rupture d'un ouvrage hydraulique n'est pas un accident qui détruit tout l'ouvrage mais un effondrement ou un mouvement d'une partie de l'ouvrage ou de sa fondation ne permettant plus à l'ouvrage d'assurer sa fonction de rétention d'eau (ICOLD, 1995).

La figure schématise la notion de durabilité (Figure I.30). Le temps t_0 correspond à la construction de l'ouvrage. En fonction du matériau utilisé les performances optimales peuvent être obtenues immédiatement ou à retardement. Dans le cas du sol traité à la chaux les performances du matériau augmentent avec le temps de cure (Le Roux & Rivière, 1969; Khattab et al., 2007; Mehenni et al., 2016). L'environnement provoque la chute des performances du matériau jusqu'à un seuil critique défini dans les normes, où l'on considère que la sécurité de l'ouvrage est compromise. La vitesse de dégradation des performances des matériaux dépend du matériau lui-même et de son environnement. C'est le paramètre le plus délicat à déterminer d'autant qu'il n'existe pas de méthodologie à ce sujet (De Baecque & Boussafir, 2018).

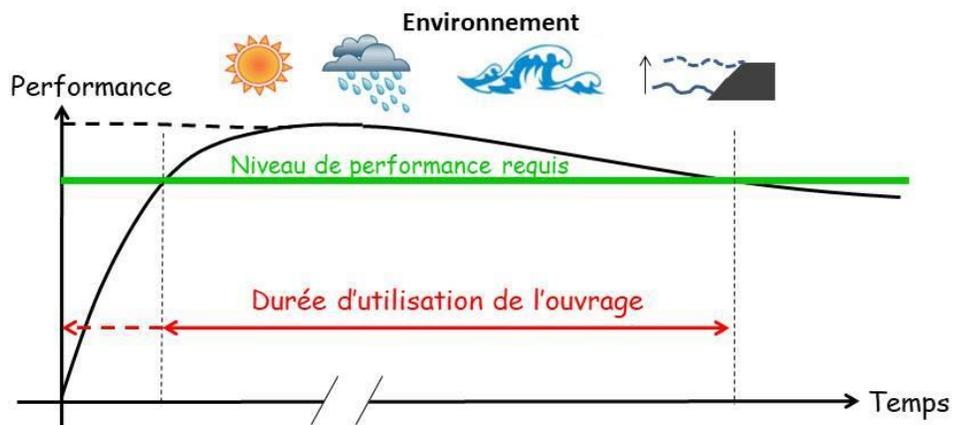


Figure I.30 : Représentation graphique de la notion de durabilité (interprétée d'après la norme NF EN 1990).

Le phénomène d'érosion des matériaux de la digue est le premier responsable des pertes de performance d'un ouvrage.

I.5.2. Durabilité des ouvrages hydrauliques en sol traité à la chaux : ouvrages anciens et expérimentations récentes

Si la possibilité d'utiliser des sols traités à la chaux dans les ouvrages hydrauliques n'est que depuis très récemment expérimentée en Europe, il existe dans le monde des ouvrages anciens de ce type. Trente ouvrages hydrauliques dans le monde ont été répertoriés dans le cadre du projet DigueElite comme ayant utilisé du sol traité à la chaux (CFBR, 2014). Ces ouvrages ont été construits entre 1960 et 2009, la plupart aux États-Unis (26 sur 30)(Garver, 1987; Gutschick, 1985; Stapledon et al., 2005). On notera en France trois digues récentes (2011 et 2013) ayant fait l'objet d'un traitement à la chaux. Les raisons pour lesquelles la chaux a été employée et la localisation dans l'ouvrage des zones traitées sont synthétisés dans le Tableau I.6. Dans l'ensemble des cas on notera que le traitement est localisé dans une seule zone de ces ouvrages. L'emploi de la chaux dans toute une digue en remblais homogène tel que sera l'ouvrage Digue2020 est une première.

Tableau I.6 : Synthèse des différentes situations pour lesquelles le traitement de sols à la chaux a été utilisé (d'après CFBR, 2014).

Types d'ouvrage	Digue de protection contre les inondations	Digue de canal	Barrage	Réservoir
Justification du traitement				
Couche de protection superficielle (10 à 70cm)	1	1	9	
Sol très plastique			1	
Sol gonflant	1	1		
Raidissement de talus				1
Traitement du noyau de barrage			4	
Non documenté	2		5	2

Le suivi dans le temps de ces ouvrages n'est en revanche pas documenté à l'exception du Frian-Kern canal en Californie (Figure I.31). Les berges et le fond du canal, construit en 1946 dans des argiles riches en Montmorillonite, ont été traités à la chaux sur certaines sections en 1972 et 1977, suite à des glissements de talus. Le canal a été remis en eau après les travaux. Après 35 ans de service les observations ont montré que sur la zone traitée il n'y a pas eu de glissement, que les performances mécaniques et hydrauliques du matériau sont très bonnes et que les berges n'ont pas été érodées (Herrier et al., 2012).

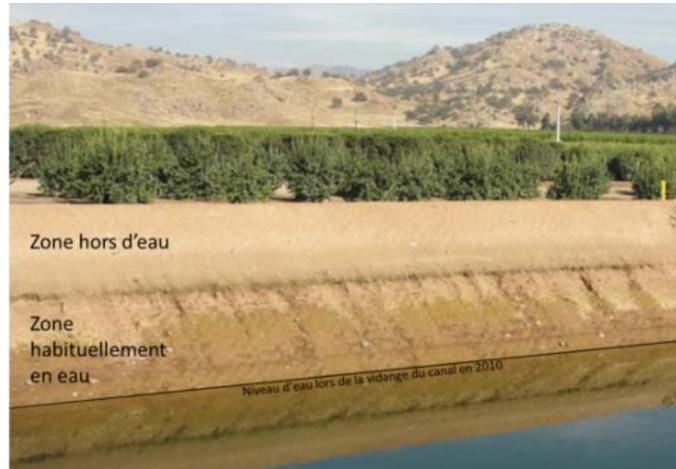


Figure I.31 : Photographie lors de la vidange en 2010 du canal Frien-Kern d'une des berges traitée à la chaux (Herrier et al., 2012).

Cet exemple démontre la durabilité du traitement à la chaux pour un sol très argileux, soumis à une charge hydraulique qui peut être considérée comme constante. Le vieillissement du matériau cet exemple peut difficilement être extrapolé à des cas de digue de protection contre les inondations car les sollicitations environnementales sont très différentes.

Dans un environnement différent, un remblai homogène en limon argileux traité à la chaux en dehors d'une zone inondable a été étudié en France, au CER de Rouen (Charles et al., 2012). Les essais *in situ* et sur le matériau prélevé dans l'ouvrage après 30 jours montrent l'accroissement des performances mécaniques, de la résistance à l'érosion et la préservation d'une faible perméabilité, en comparaison avec le limon non traité dans le même environnement (Charles et al., 2014; Chevalier et al., 2012; De Baecque et al., 2017). Certains essais menés après 2 ans parviennent aux mêmes conclusions (Makki-Szymkiewicz et al., 2015; Charles et al., 2017).

Ces deux exemples sont prometteurs quant à la durabilité de ce type d'ouvrage en sol traité à la chaux. Cependant dans le cadre de cette thèse nous nous intéressons à la durabilité des digues contre les inondations marines, ce qui amène deux contraintes environnementales supplémentaires, la charge hydraulique transitoire lors des inondations et la salinité de l'eau. C'est en cela que projet Digue2020 est innovant. Dans ce contexte nouveau il faut pouvoir anticiper le comportement du sol traité à la chaux en présence d'eau de mer sur le long terme. Pour cela les effets de l'environnement sur le matériau doivent être reproduits de manière accélérée sur les matériaux au laboratoire.

I.5.3. Evaluation au laboratoire de la durabilité des sols traités

I.5.3.1. Reproduction des sollicitations et conséquences

I.5.3.1.1. Facteur influençant la durabilité à long terme des matériaux

À propriétés initiales identiques, un matériau ne vieillira pas de la même manière selon l'environnement auquel il est exposé (De Baecque and Boussafir, 2018). Les facteurs d'évolution des performances d'un matériau peuvent être identifiés en plusieurs catégories :

- l'environnement climatique de l'ouvrage (ensoleillement, pluviométrie, gel...);
- l'activité biologique (faune, flore);
- les sollicitations hydrauliques (nombre de crues, intensités, récurrences);
- les lois d'évolution des matériaux : chaque matériau a des lois de comportement dans le temps qui sont très variables selon la composition et les conditions initiales de mise en œuvre. Dans le cas des matériaux traités à la chaux il a été vu dans la partie (I.2) que la teneur en chaux et les modalités de compactage confèrent des propriétés différentes au matériau, à l'état initial et également dans le temps (impact du temps de cure), même en l'absence de sollicitations;
- la proximité de la mer : la composition ionique de l'eau, en particulier la concentration en NaCl peut jouer un rôle important dans les réactions physico-chimiques entre la chaux et les minéraux argileux.

I.5.3.1.2. Les cycles d'humidification-séchage

Des cycles d'humidification-séchage en laboratoire pour étudier l'effet de l'environnement climatique et/ou les sollicitations hydrauliques ont été réalisés sur les matériaux dans le cadre de différentes études (Tableau I.7). Cependant le lien entre sollicitations au laboratoire et sollicitations environnementales réelles nécessite de pouvoir comparer le comportement d'un matériau au laboratoire en parallèle d'un matériau dans un ouvrage in situ, ce qui n'a jamais été fait jusqu'ici. Dans cette thèse, la reproduction des sollicitations environnementales est également développée au laboratoire, en cherchant à se rapprocher au mieux des conditions de terrain de l'ouvrage Digue2020. La perspective au-delà des travaux de laboratoire est d'enregistrer les sollicitations climatiques et de caractériser les matériaux in situ pour quantifier la représentativité des études de laboratoire. Les sollicitations spécifiques à l'environnement marin sont prises en compte dans cette thèse. En particulier l'impact de la salinité de l'eau sur le matériau est étudié. Le protocole est détaillé dans le chapitre 2 de cette thèse.

Tableau I.7 : Synthèse de travaux sur le comportement de sols traités à la chaux soumis à des cycles d'humidification-séchage.

	Type de sollicitation & Références	Matériaux	Humidification	Séchage	Représentativité environnementale	Principales conclusions
Norme pour les mélanges sol-ciment compacté	(ASTM-D559 2015)	Sol ciment compacté	Immersion 5 h dans l'eau à 21(+5) °C	42 h dans une étuve à 71°C.	Conditions non représentative de l'environnement de digue	
Etude du retrait gonflement des sols argileux traités à la chaux	(Khattab, et al. 2007)	Sol traité à la chaux, compacté et placé dans une cellule œdométrique.	Imbibition jusqu'à saturation : immersion du bas de l'éprouvette dans l'eau	Dans un dessiccateur, t=20°C. Imposition de l'humidité relative par palier (76%, 44%, 32%) pour augmenter la succion, 48h pour chaque palier.	Le séchage par palier est peu représentatif des conditions in situ mais est imposé pour limiter l'apparition de fissures	La variation du volume des vides (retrait gonflement) est importante au cours du premier cycle puis cette variation de volume des vides entre l'état sec et humide se stabilise durant les 5 cycles suivants
	(Stoltz, et al. 2014)	Argile gonflante traitée 2 et 5%, dans une cellule œdométrique	Imposition d'une succion de 0 MPa par contact avec une solution osmotique, pendant 7jours	Imposition d'une succion de 8 MPa par contact avec une solution osmotique, pendant 7jours		-Apparition d'un gonflement irréversible. Gonflement plus faible avec 5%CaO qu'avec 2%CaO. -Augmentation de la proportion des pores les plus larges lors des cycles ce qui peut expliquer la dégradation des performances mécaniques.
Conséquence hydromécanique des cycles hydriques pour une argille traitée à la chaux	(Mehenni, 2015) (adaptation de la norme ASTM-D559)	Sol argileux traité à 1 et 3% de chaux	Immersion dans un bac d'eau, t=20°C, pendant 48h	Etuve à 60°C pendant 48h	Conditions hydriques extrêmes peu représentatives des conditions in situ.	-Perte de 100% de la résistance en compression simple après 1 cycles pour un traitement 1% CaO, 8 cycles si traitement 3% CaO. -Augmentation de la conductivité hydraulique jusqu'à 5 cycles puis stabilisation -Diminution de la résistance à l'érosion à chaque cycle
	Cycle H-S (Mehenni, 2015)	Sol argileux traité à 1 et 3% de chaux	Montée capillaire et température contrôlée 20°C Durée 7 à 21 jours	Enceinte climatique, t=20°C et Hr= 54% jusqu'à d'atteindre une teneur en eau de 3%, durée 15 à 21 jours.	Conditions hydriques « modérées » plus proches des conditions existantes in situ. Inconvénient : cycle long	-Perte de 40 à 50% de la Rc en 3 à 6 cycles, puis décroissance très faible (asymptote atteinte) -Augmentation de la conductivité hydraulique jusqu'à 3 cycles puis stabilisation -Diminution de la résistance à l'érosion jusqu'à cycles 10 cycles
Essais de lessivage d'un limon traité par percolation	(Le Runigo et al., 2011)	Eprouvette de limon traité à 1% et 3% de chaux	Percolation		Il est estimé que 200 jours de percolation représentent les périodes de pluie en France pendant 11.5 années (moyenne d'infiltration des eaux de pluie par ans : 300L/m ²)	-Décroissance de la résistance au cisaillement principalement durant la phase de saturation de l'échantillon -Les faibles perméabilités limitent la décroissance de la résistance mécanique liée à la circulation de l'eau

1.5.3.2. Influence de l'eau de mer sur le comportement des sols traités à la chaux.

1.5.3.2.1. Cas de sols argileux sans traitement

Des études ont été menées pour connaître l'influence de l'eau de mer sur un sol argileux. Nous présentons ici les résultats d'études portant sur la compactibilité et la sensibilité à l'érosion de ce type de sol en présence d'eau de mer.

En l'absence de traitement, l'utilisation d'eau de mer modifie la densité optimal Proctor et la résistance en compression des sols (Otoko, 2014). Dans le cas de sols très argileux, la présence de sel marins diminue la densité optimale de près de 3 kN/m³, tandis que dans le cas d'un sable argileux l'utilisation d'eau de mer apporte un gain de 1 kN/m³ (Figure I.32).

Selon Slowinski & Masterton (1990), les forces répulsives qui se créent entre les ions à la surface des argiles et les ions de l'eau de mer augmentent les distances entre les particules d'argile et augmentent l'indice des vides du matériau. De plus, les ions de l'eau de mer, notamment le magnésium se substituent aux ions calcium et sodium de l'espace interfoliaire des argiles ce qui peut générer la floculation des argiles et donc réduire la compacité maximale (Carroll and Starkey, 1958; Lopez-Lara et al., 1999). Dans le cas du sable argileux, l'auteur fait l'hypothèse de la présence de calcaire parmi les particules du sol. Les chlorures de l'eau de mer peuvent réagir avec les oxydes de calcium pour former des chlorures de calcium. Ce composé néoformé augmenterait la densité sèche du sol (Slowinski and Masterton, 1990)

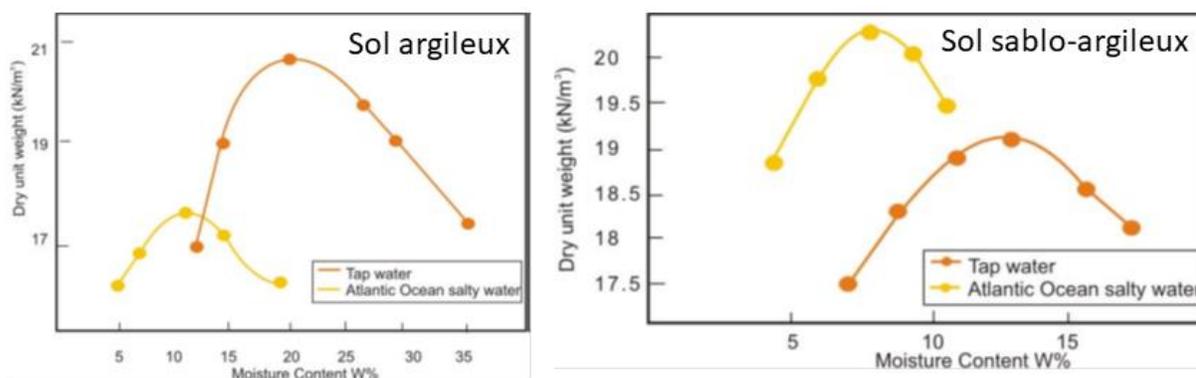


Figure I.32: Influence de l'eau de mer sur la densité de deux sols naturels compactés de natures différentes. D'après Otoko 2014.

Haghighi (2012) s'est intéressé à l'influence des propriétés physico-chimiques de l'eau lors des phénomènes d'érosion de conduit d'un mélange sable et argile (kaolinite et illite). Quatre configurations d'essais sont étudiées en fonction de la nature de l'eau interstitielle (distillée « d », ou salée « s ») et la

nature du fluide de l'eau environnante (distillé « D », ou salé « S »). Quelle que soit l'argile concernée la configuration « sD » est la plus résistante à l'érosion. On notera que dans le cas de l'illite, la nature du fluide environnant n'a pas d'influence sur l'érosion (Tableau I.8). La salinité de l'eau favorise l'agglomération des particules du sol qui s'arrachent alors plus difficilement (Haghighi, 2012).

Tableau I.8 : Synthèse des résultats de l'étude de Haghighi (2012) sur l'influence de la salinité sur l'érosion d'un sol argileux.

Augmentation de la résistance à l'érosion 	50% sable 50% Kaolinite	50% sable 50% illite
	Configuration de l'essai d'érosion	
	(eau interstitielle distillé d, salée s / eau environnante Distillé D, Salée S)	
	dD=dS	dD=dS
	sS	sS = sD
sD		

Haghighi (2012) a également montré que les sols contenant de la kaolinite ou de l'illite sont moins dispersifs lorsqu'ils contiennent de l'eau avec une concentration de 35g/L de NaCl dissout, que lorsqu'ils contiennent de l'eau distillée. La taille des floccs se détachant des sols lors de leur immersion est plus importante dans le cas où le sol contient de l'eau salée. Vaughan and Soares, (1982) ont également observé que la taille des floccs augmente avec la salinité de l'eau contenue dans les pores des sols argileux. De ces observations, il est conclu que la salinité de l'eau augmente les forces d'interactions électrostatiques entre les particules et donc le détachement de particules agglomérées de plus gros diamètre mais en moins grand nombre.

I.5.3.2.2. Cas de sols traités à la chaux

L'ajout de chaux dans un sol argileux modifie significativement ses propriétés. La salinité de l'eau affecte également les propriétés des argiles et plus globalement celles du sol. La question qui se pose alors est de savoir quelles sont les conséquences de l'eau de mer sur les propriétés d'un sol traité à la chaux. Cette question est peu traitée dans la littérature. Les quelques études qui se sont intéressées au traitement à la chaux en présence d'eau de mer se focalisent sur la stabilisation d'argile marine et les perturbateurs de prise.

Rajasekaran et al. (1995) montrent dans leurs travaux que la présence d'eau de mer n'inhibe pas les réactions pouzzolaniques. Le traitement à la chaux permet la stabilisation d'argile marine et une augmentation de la résistance en compression simple après 45 jours de cure en comparaison avec la même argile marine non traitée.

Koslanant et al. (2006) montrent que pour une argile riche en matière organique, le gain de résistance en compression simple est plus grand lorsque le traitement associe la chaux et du chlorure de sodium que lorsque la chaux est utilisée seule. Le sel neutraliserait la matière organique et la prise de la chaux se ferait donc mieux.

Dans le cas d'un limon à faible teneur en matière organique, traité avec un mélange chaux et ciment, la présence de sel, quelle que soit sa concentration, ne modifie pas les performances mécaniques du sol traité (Le Borgne, 2010). Dans le cas d'un sol à faible teneur en matière organique, le sel n'agirait ni comme perturbateur de prise ni comme accélérateur de prise. Cependant dans cette étude le dosage en ciment était prédominant ce qui ne permet pas de conclure spécifiquement de l'effet du sel sur la prise de la chaux de manière séparée.

Les études existantes portent donc sur la stabilisation des sols à court terme. Les conséquences de la salinité de l'eau sur la durabilité d'un sol traité à la chaux font l'objet de cette thèse.

Dans cette thèse nous chercherons à caractériser l'érosion en fonction de la densité et de la composition chimique (teneur en chaux et salinité) initiale, du temps de cure et de l'exposition répétée à l'eau de mer comme le serait un matériau sur le talus d'une digue contre les inondations marines.

I.6. Conclusion du chapitre 1

La durabilité d'une digue dépend à la fois des propriétés des matériaux et de la capacité à détecter une défaillance l'ouvrage, notamment par des méthodes géophysiques, avant que celle-ci ne se propage et mène à la ruine de l'ouvrage.

L'étude bibliographique a permis de montrer que le traitement à la chaux semble une solution acceptable pour améliorer les propriétés d'un sol limoneux ou argileux. En effet :

- le traitement des sols à la chaux apporte un gain de résistance mécanique, après un certain délai. Ce gain est variable en fonction de la nature du sol et de la quantité de chaux ;
- la perméabilité d'un sol traité à la chaux est acceptable dans le cas d'un compactage par pétrissage, côté humide de la courbe d'optimum Proctor pour réduire au maximum le volume de pores de grandes tailles ;
- le traitement à la chaux apporte un gain de résistance à l'érosion.

Cependant l'étude bibliographique montre aussi le faible nombre d'études pour lesquelles l'environnement est pris en compte dans l'évaluation des performances du matériau au long terme et l'absence de données relatives à la durabilité du traitement à la chaux en contexte maritime.

Dans cette thèse nous chercherons à caractériser l'érosion en fonction de la densité et de la composition chimique (teneur en chaux et salinité) initiale, du temps de cure et de l'exposition répétée à l'eau de mer comme le serait un matériau sur le talus d'une digue de protection contre les inondations marines.

Nous proposons dans cette thèse une méthode d'étude de la durabilité d'un sol traité à la chaux exposé à un environnement marin côtier. Cette étude répond au besoin de caractériser différentes propriétés essentielles pour un matériau de digue (stabilité mécanique, résistance à l'érosion, faible perméabilité) et d'évaluer la cinétique de dégradation de ces propriétés lorsque le matériau subit des sollicitations chimiques (salinité) et hydrauliques comparables à celles subies par les digues de protection contre les submersions marines. L'approche géophysique par des mesures de résistivité électrique et de vitesse des ondes P et S, complète l'étude. En laboratoire les objectifs sont, dans un premier temps, de caractériser les valeurs et l'évolution des propriétés géophysiques du matériau liées au traitement à la chaux. Puis dans un second temps, l'objectif est d'étudier leur sensibilité à la dégradation du matériau sous l'effet de l'exposition répétée à l'eau de mer. La mise en relation entre les propriétés mécaniques et d'érosion avec les propriétés géophysiques doit pouvoir aider à l'interprétation des données issues du monitoring géophysique de la digue maritime expérimentale en sol traité à la chaux (Digue2020).

II. Chapitre 2: Méthodologie de caractérisation au laboratoire de la durabilité d'un limon traité à la chaux en environnement maritime.

D'après l'encyclopédie Larousse, la durabilité est la qualité de ce qui dure longtemps, c'est l'espace de temps durant lequel un bien est apte à satisfaire un besoin auquel il répond. La durabilité d'un matériau s'évalue par la valeur de ses propriétés au moment de la mise en service de l'ouvrage qu'il constitue, et par le temps pendant lequel ses propriétés restent assez élevées pour lui permettre d'assurer ses fonctions dans un ouvrage. Evaluer la durabilité d'un matériau revient à évaluer la vitesse de dégradation de ces propriétés par rapport aux sollicitations environnementales s'exerçant sur le matériau. Pour un même matériau sa durabilité dépend donc aussi de la nature, de la fréquence et de l'intensité des sollicitations environnementales sur le matériau. L'étude de la durabilité s'appuie donc sur la caractérisation des sollicitations environnementales, et l'évaluation de leurs conséquences sur la valeur des propriétés du matériau et leur vitesse de dégradation.

L'objectif est de mettre en place un protocole expérimental qui permette de reproduire, au laboratoire, sur des temps très courts différents états de dégradation du matériau traité à la chaux, consécutifs de l'exposition du matériau à un environnement marin côtier. Il faut dans un premier temps définir les caractéristiques de l'environnement, puis soumettre le matériau à cet environnement à une fréquence élevée (par rapport à l'occurrence des facteurs environnementaux dégradants in situ). Les propriétés du matériau suivi sont choisies en lien avec les fonctions du matériau dans une digue de protection contre des submersions marines. La représentativité de l'étude se limite à la reproduction fidèle de la nature des sollicitations environnementales. En l'absence d'étude in situ, on ne peut pas garantir la représentativité de l'état de dégradation du matériau au laboratoire par rapport à son état réel sur le terrain car on ne connaît ni la fréquence ni l'intensité des sollicitations affectant le matériau in situ.

L'étude de la durabilité s'appuie sur deux études parallèles, l'influence des paramètres initiaux du matériau sur sa durabilité et les conséquences des cycles hydriques sur les propriétés des matériaux. Dans ce chapitre nous détaillons les caractéristiques du sol choisi pour l'étude, le mode de fabrication des éprouvettes de sol traité, les caractéristiques de l'étude paramétrique (composition des matériaux, temps de cure, nombre de sollicitations), le protocole de reproduction de contraintes environnementales et les propriétés des matériaux qui seront caractérisées. Les résultats de cette étude paramétrique seront présentés dans les chapitres 3 et 4.

II.1. Matériaux de l'étude paramétrique

II.1.1. Sol support de l'étude

II.1.1.1. Localisation du prélèvement

L'étude est menée sur un limon prélevé dans la commune de Salin de Giraud proche de l'embouchure du Grand Rhône. Ce sol a été choisi pour sa proximité avec le site de la future plateforme de recherche in situ, et parce qu'il est représentatif des sols de la région de Camargue où sera construite la plateforme (Figure II.1).



Figure II.1 Localisation du site de prélèvement du sol de l'étude et de la plateforme Digue2020.

Le limon prélevé correspond à l'horizon situé entre -0.7 et -1.5m de la surface, entre une couche de terre végétale en surface et des argiles grises en profondeur (Figure II.2). Le matériau a été homogénéisé sur le chantier et stocké dans des *Big-bag* à l'air libre. Le laboratoire de l'IFSTTAR possède 2m³ de sol, stocké dans deux *Big-bag* distincts.



Figure II.2: Coupe géologique de l'emprunt.

II.1.1.2. Caractérisation géotechnique du sol

Les caractéristiques géotechniques du limon ont été déterminées à partir des différentes normes d'identification en vigueur dans le domaine des terrassements (NF P94.041; NF P94.057; NF P94-052-1; NF P94-068).

L'analyse granulométrique et sédimentométrique (NF P94.041 et NF P94.057) est réalisée sur deux lots d'échantillons prélevés dans chacun des deux big-bag pour contrôler l'homogénéité des prélèvements (Figure II.3). Les deux lots possèdent une répartition granulométrique identique, l'hypothèse de l'homogénéité des prélèvements est vérifiée. Le passant à 80 μm est de 80 %. La fraction argileuse selon la définition géotechnique (i.e. la fraction inférieure à 2 μm) représente 18 % du matériau. La fraction la plus grossière (D_{max}) n'excède pas 40 μm de diamètre.

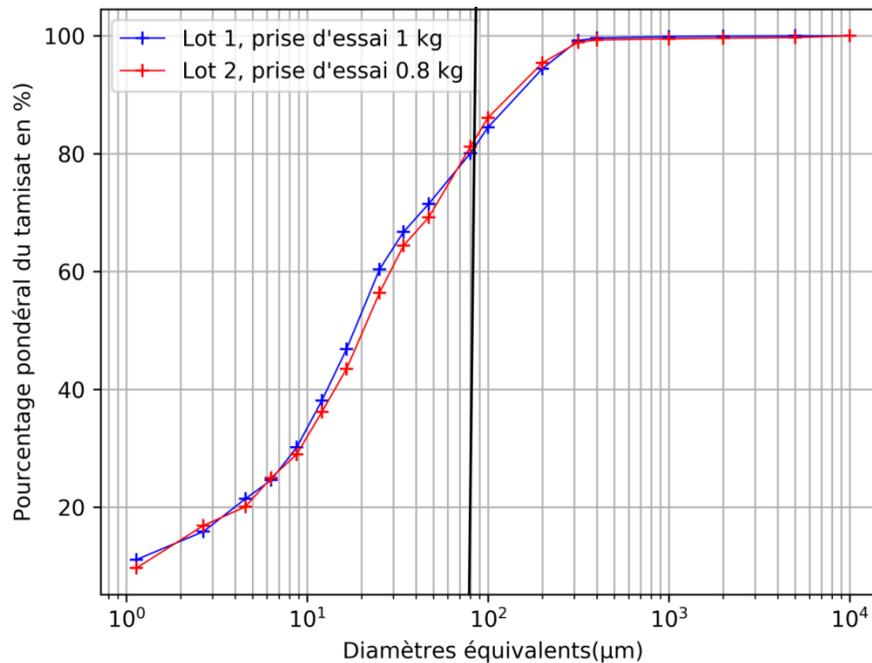


Figure II.3 : Répartition granulométrique des grains du limon de Salin de Giraud, pour deux prises d'essai.

Les limites d'Atterberg du sol sont les suivantes (valeur de teneur en eau massique des limites) :

- Limite de plasticité w_p (NF P94-051) = 20,9%
- Limite de liquidité w_L (NF P94-052-1) = 26,2%

L'indice de plasticité du sol ($w_p - w_L$) est donc de 5,4

La valeur au bleu de méthylène du sol mesurée d'après la norme NF P94-068 est de 1,10 g/100g

L'ensemble de ces données permet de classer le sol dans la catégorie A1 du GTR (2000) (Figure II.4).

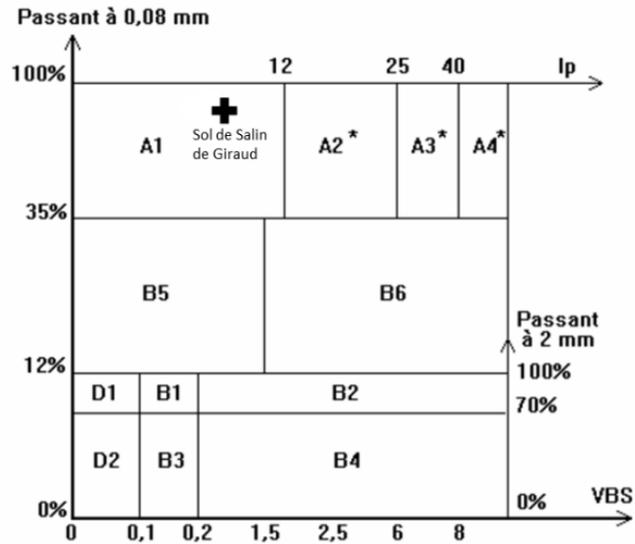


Figure II.4 : Classe du sol Salin de Giraud d'après la classification du GTR (2000).

La masse volumique spécifique des grains du sol (ρ_s) mesurée au pycnomètre à eau est de 2,704 tonnes/m³ (NF EN ISO 17892-3).

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X (DRX) montre que le sol est composé d'environ 40 % de quartz, 35 % de carbonate dont une majorité de calcite et des traces de dolomite (carbonate magnésienne), 10 % de feldspath principalement sodique, 10 % de phyllosilicate de type muscovite et 5% d'argiles de type chlorite. Des cristaux d'halite sont également détectés (moins de 1 %). Ce sol ne contient pas d'argiles gonflantes de type smectites. La stabilisation du volume du matériau n'est donc pas un problème majeur dans le cas de ce sol. Cette analyse révèle que 99,7 % de la matière est cristallisée ce qui témoigne de l'absence de matière organique, du moins en grande quantité. La matière organique agit comme un perturbateur de prise, la chaux est captée par la matière organique et n'est pas mobilisable dans les réactions pouzzolaniques qui elles permettent d'accroître les propriétés des sols traités (Le Borgne, 2010). Sur ce sol cette perturbation de la prise n'est pas à craindre.

La quantité de chlorure de sodium dans le limon de salin de Giraud est d'environ 2 g/kg de sol sec.

II.1.1.3. Détermination du point de fixation de la chaux

La chaux vive utilisée pour cette thèse répond à la norme NF EN 459-1 pour les chaux de construction. La référence du produit est : Proviacal DD (classe CL 90 Q-R5, P2) fabriquée par le groupe Lhoist. Cette chaux contient des oxydes de calcium (CaO) à plus de 80 % et sa réactivité (vitesse d'hydratation de la chaux) est inférieure à 10 minutes.

L'essai de détermination du point de fixation de la chaux (PFC) est un essai de suivi pHmétrique défini par la norme ASTM D6276-99a(2006) qui permet de déterminer le dosage minimal en chaux nécessaire pour saturer en chaux une solution de sol (100 mL d'eau distillée + 25 g de la fraction de sol sec inférieur à 400 μm). Le point de fixation de la chaux correspond à la quantité de chaux maximale que les argiles présentes dans le sol peuvent fixer. Au-delà de ce seuil une partie de la chaux reste en solution dans l'eau. Ce seuil est repéré par un pH supérieur à 12,4 soit le pH d'une solution saturée en chaux.

L'essai est réalisé sur deux lots prélevés aléatoirement dans le stock de limon de salin de Giraud. Le point de fixation de la chaux du limon de Salin de Giraud est 0.75 ± 0.2 % (Figure II.5).

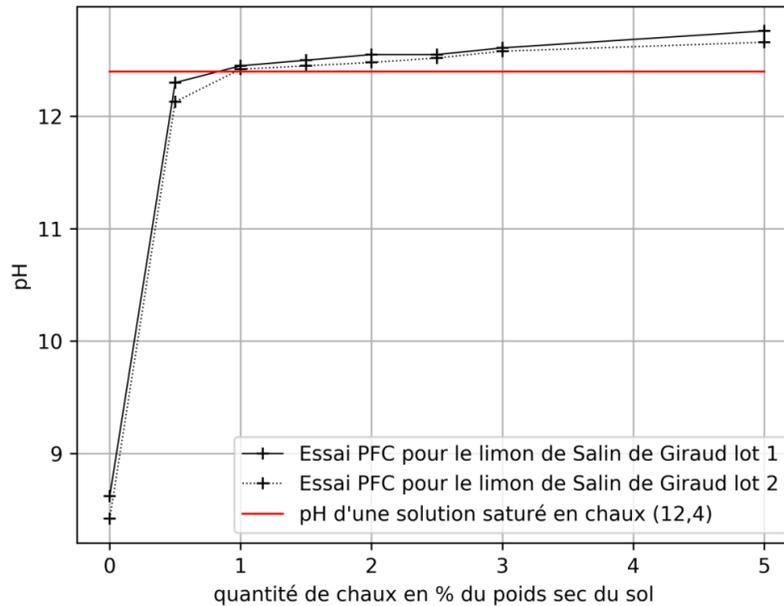


Figure II.5 : Réalisation de l'essai PFC avec le limon de salin de Giraud. Le PFC est atteint entre 0.75 et 1% de chaux.

II.1.2. Définition de l'étude paramétrique : variabilité de la teneur en chaux, de la densité et de la salinité.

L'étude paramétrique vise à quantifier la différence de durabilité du sol traité à la chaux en fonction de sa formulation initiale en chaux, de sa densité et de la teneur en sel au moment du traitement. Les matériaux de l'étude doivent refléter les hétérogénéités qui peuvent se trouver dans une digue en sol traité liées aux contraintes de construction (contrôle plus ou moins bon de la répartition de la chaux dans le sol, défaut de compactage localisé...). L'influence de la salinité du sol sur la durabilité du matériau traité à la chaux est un élément nouveau qui n'a encore jamais été pris en compte et qui est essentiel dans le contexte des digues maritimes. Nous allons présenter la méthodologie que nous avons mise au point.

II.1.2.1. Choix des teneurs en chaux

La teneur en chaux d'un sol est définie par rapport à la masse sèche du sol avant traitement

$$\text{Teneur en chaux (\%)} = \frac{\text{masse de chaux}}{\text{masse de sol sec avant traitement}}$$

A court terme, l'amélioration de performance mécanique des sols est optimale pour un dosage égal au PFC (Bell, 1996; Le Roux and Rivière, 1969; 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). Cependant pour des raisons économiques il n'est pas réaliste, en condition de chantier, de s'éloigner significativement du dosage minimal requis pour améliorer les performances mécaniques du sol (\approx PFC). Une marge de sécurité au-dessus du PFC est généralement prise (DigueELITE, 2018) pour deux raisons : l'amélioration du matériau sans augmenter trop les coûts et l'anticipation des hétérogénéités de teneur en chaux dans le matériau liée aux contraintes de chantier (contrôle moins précis de la répartition de la chaux dans l'ensemble du volume de sol en condition de chantier qu'au laboratoire).

L'étude paramétrique de cette thèse se veut la plus représentative possible des différents états du matériau que l'on peut trouver dans un ouvrage. Dans l'hypothèse d'un objectif de teneur en chaux de PFC+1% pour le sol d'une digue, on considèrera qu'une partie du sol est susceptible de ne recevoir que la quantité de chaux correspondant au PCF. Dans notre étude paramétrique nous étudierons donc la durabilité du matériau dans le cas d'un traitement à 2 % de chaux (PFC+1) et 1 % de chaux (\approx PFC). Les propriétés du sol non traité seront comparées à celle des sols traités.

II.1.2.2. Choix de la salinité du sol avant le traitement à la chaux

En chantier l'ajustement de la teneur en eau des sols nécessite classiquement l'utilisation de citernes d'eau sur camion. Dans le contexte des ouvrages maritimes, on pourrait chercher à s'affranchir de l'utilisation de citerne par le prélèvement de l'eau de mer à proximité directe (quand la réglementation le permet). Au laboratoire on cherche donc à quantifier l'effet de la présence d'eau de mer dans le matériau lors du traitement sur sa durabilité, en comparaison avec le matériau de référence pour lequel on utilise de l'eau du robinet (eau douce).

L'eau utilisée est une eau de mer artificielle, formulée dans la norme NF P18837 dont la composition pour 1L d'eau est précisée dans le Tableau II.1. La salinité de cette eau, tous ions confondus est de 36.6 g.L⁻¹. En comparaison, la concentration de l'eau de mer de l'Atlantique Nord vaut 35 g.L⁻¹, celle de la

Méditerranée est d'environ 38 g.L^{-1} (source web: Lerm). L'eau de mer artificielle présente donc une teneur moyenne de concentration en sel.

Tableau II.1 : Composition de l'eau de mer artificielle selon la norme NF P18837.

Nom	Formule chimique	Quantité (g)
Eau distillée	H ₂ O	1000
Chlorure de Sodium	NaCl	30
Chlorure de Magnésium	MgCl ₂ , 6H ₂ O	6 (soit 2.8g de MgCl ₂)
Sulfate de Magnésium	MgSO ₄ , 7H ₂ O	5 (soit 2.4g de MgSO ₄)
Sulfate de Calcium	CaSO ₄ , 2H ₂ O	1.5 (1.2g de Ca SO ₄)
Carbonate de Potassium	CO ₃ KH	0.2

En condition de chantier un sol avant ajustement n'est pas totalement sec. Si l'ajustement doit avoir lieu avec de l'eau de mer, cela ne représenterait que quelques pourcents de la teneur en eau du sol. Nous allons définir ci-après le protocole pour obtenir une salinité réaliste.

Protocole d'ajustement de la teneur en eau du sol au laboratoire avant traitement à 2% de chaux :

- Pour un traitement à 2% de chaux, la teneur en eau du sol doit être, avant traitement, de 20% (cf II.1.4.2).
- Au laboratoire, le sol est séché à l'air jusqu'à une teneur en eau de 2%, puis il est amené à 8% de teneur en eau avec de l'eau du robinet :
 - cas 1 : pas d'apport d'eau de mer dans la préparation, l'ajustement de la teneur en eau jusqu'à 20% se fait avec de l'eau du robinet ;
 - cas 2 : apport d'eau de mer, l'ajustement jusqu'à 20% est fait avec de l'eau de mer artificielle. L'eau de mer ne représente donc que 66% de l'eau du sol, la concentration en sels est donc de $24,4 \text{ g.L}^{-1}$

Les résistances aux agressions de l'environnement marin (\approx durabilité) des échantillons préparés avec et sans ajout d'eau de mer seront comparées. Les abréviations suivantes sont données :

- échantillon préparé sans ajout d'eau de mer → « TW » comme « *Tap Water* »
- échantillon préparé avec ajout d'eau de mer → « SW » comme « *Sea Water* »

II.1.2.3. Choix des densités

La compacité classiquement recommandée dans les ouvrages hydrauliques en terre est de 95% de l'Optimum Proctor Normal (OPN)(CFBR, 2015). Cependant plusieurs auteurs ont montré que compacter le sol traité à la chaux avec un objectif de 98% de la densité optimal Proctor (γ_{dOPN}), et à la teneur en eau de l'OPN + 1% ($w_{OPN}+1$) correspond à des conditions pour lesquelles la perméabilité du matériau est la plus faible (Cuisinier et al., 2011; Herrier et al., 2013; Le Runigo et al., 2011). Dans le cadre de l'étude paramétrique, nous cherchons à montrer l'intérêt d'un compactage à 98% de l'OPN sur l'amélioration de la durabilité du matériau traité à la chaux.

Parmi le sol traité à 2% de chaux et humidifié à l'eau du robinet, une partie est compactée avec un objectif de 98% de l'OPN, une autre partie est compactée avec un objectif de compactage de 95% de l'OPN.

Le sol non traité, le sol traité à 1% de chaux, et le sol humidifié pour partie à l'eau de mer sont compactés avec un objectif de 98% de leur OPN.

On choisit donc de compacter le matériau de référence à 98% de l'OPN et de compacter un second lot d'échantillon avec la même formulation que le matériau de référence mais à une densité égale à 95% de l'OPN. On quantifiera ainsi le gain (ou la perte) de durabilité liée à la densité. Les autres lots (salé + 2% de chaux, et non salé + chaux 1%) sont compactés à 98% de leur OPN.

II.1.3. Synthèse des gammes de variation des paramètres des matériaux de l'étude

Dans cette thèse on appellera « matériau de référence » le sol traité à 2% de chaux, confectionné avec de l'eau du robinet et compacté à 98 % de l'OPN. La durabilité des différents matériaux est comparée avec celle du matériau de référence (Tableau II.2).

Tableau II.2 : Synthèse des caractéristiques des cinq matériaux étudiés.

<i>Nature de l'eau du sol lors de la confection</i>	<i>Teneur en chaux (%)</i>	<i>Objectif de compactage en %OPN</i>	<i>Nom abrégé</i>	<i>Code couleur dans les graphiques</i>
Eau du robinet	2	98%	TW2%d98	ROUGE
Eau du robinet	1	98%	TW1%d98	JAUNE
Eau du robinet	2	95%	TW2%d95	VERT
Eau de mer artificielle	2	98%	SW2%d98	BLEU
Eau du robinet	0	98%	N	NOIR

II.1.4. Réalisation des éprouvettes de sol

II.1.4.1. Etudes de la masse volumique optimale

Les essais de compactage Proctor (NF EN 13286-2) sont réalisés sur le sol de Salin de Giraud traité à 1 et 2% de chaux et sur le sol non traité. Les essais ont également été réalisés pour le sol humidifié avec de l'eau de mer. La concentration en sel dans l'eau du sol est maintenue constante à 24.4 g.L^{-1} quelle que soit la teneur en eau. Les essais sont réalisés dans des moules CBR avec une dame automatique. Les courbes de compactage Proctor sont présentées Figure II.6. Notez que les teneurs en eau de ce graphique correspondent à la teneur en eau du sol après traitement à la chaux.

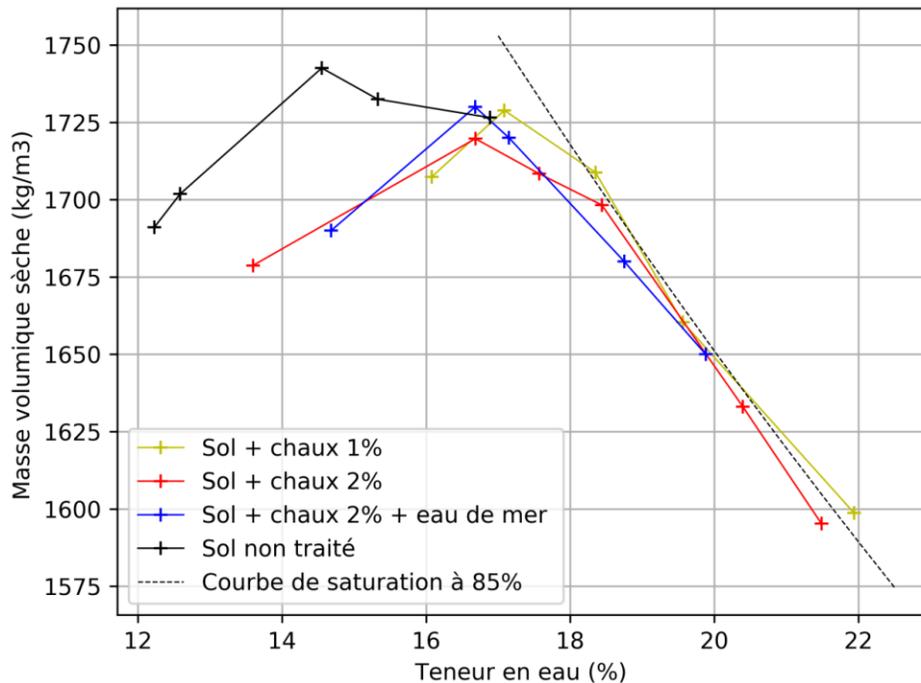


Figure II.6: Courbes de compactage Proctor pour différentes formulations (NF EN 13286-2).

Comme attendu d'après la littérature, la masse volumique sèche optimale Proctor décroît avec l'ajout de chaux et la teneur en eau à l'OPN augmente de 2% (Figure II.6 & Tableau II.12). Pour un même dosage en chaux, la présence d'eau de mer augmente la masse volumique à l'OPN. Ce résultat est cohérent avec les résultats de Otoko, (2014).

Tableau II.3 : Valeur des masses volumique à l'OPN en fonction des matériaux

Matériaux	Sol non traité	Sol + chaux 2%	Sol + chaux 2% + eau de mer	Sol + chaux 1%
Masse volumique à l'OPN (kg.m^{-3})	1740	1720	1730	1730

II.1.4.2. Ajustement de la teneur en eau

Pour réduire la perméabilité du sol, le compactage doit être réalisé à une teneur en eau supérieure à celle de l'OPN (Cuisinier et al., 2011). Comme préconisé dans le guide des traitements des sols à la chaux (GTS, 2000), la teneur en eau de compactage est choisie égale à $\omega_{OPN}+1$, soit ici 18 % pour les sols traités et 15 % pour le sol non traité.

Le traitement à la chaux génère une perte de 1 % de teneur en eau pour 1 % de chaux ajouté. Avant le traitement à 1 % de chaux on ajuste la teneur en eau à 19 % pour obtenir une teneur en eau après traitement et avant compactage de 18 %. Idem, avant traitement à 2 % de chaux, la teneur en eau est ajustée à 20 %.

Le sol est séché à l'air, sa teneur en eau est régulièrement contrôlée jusqu'à atteindre 2 %. Le sol est ensuite ré-humidifié jusqu'à la teneur voulue par vaporisation d'eau (eau du robinet ou eau de mer en fonction des matériaux préparés). Le sol placé dans un bac fermé est laissé ainsi 48h le temps que la teneur en eau s'homogénéise.

II.1.4.3. Traitement du sol à la chaux et malaxage

La chaux et le sol dans les propositions choisies sont mis en contact et malaxés dans un malaxeur mécanique de type Hobart (Figure II.7). La durée du malaxage est fixée à 1min en vitesse I qui permet d'homogénéiser la chaux dans le matériau, puis 1 min en vitesse II, plus élevée, qui permet de malaxer le sol, c'est-à-dire de forcer l'incorporation de la chaux dans le sol. Cela permet également de réduire le diamètre des moutures.



Figure II.7 : A gauche, épandage de la chaux sur le sol dans le malaxeur ; A droite, aspect du matériau après le malaxage.

L'incorporation de la chaux provoque une réaction exothermique. Le sol doit être laissé au repos au minimum 45 minutes avant le compactage. Cependant le compactage doit avoir lieu dans un délai court après le traitement. En condition de chantier, Ali & Mohamed (2017) ont montré qu'au-delà d'un délai

de 12h entre le traitement et le compactage, la résistance du matériau chute significativement en comparaison avec un sol compacté dans un délai plus court. Au laboratoire le sol est compacté dans un délai de 1h±15mn après traitement.

II.1.4.4. Compactage des éprouvettes

La dimension des éprouvettes est choisie pour convenir à l'ensemble des essais du programme expérimental. Cela permet de faciliter l'homogénéité entre les éprouvettes d'une même formulation et de réaliser plusieurs mesures de différentes natures (géophysiques et destructives) sur les mêmes échantillons. Les éprouvettes sont cylindriques de hauteur 140±5mm et de diamètre 70±1mm.

Le compactage est réalisé de manière dynamique, par couche, à la main avec un contrôle de la masse et du volume par couche (objectifs de compactage). Chaque couche a une hauteur de 2cm. L'interface entre deux couches est scarifiée pour garantir l'adhésion des couches.

L'objectif de densité de 98 % de l'OPN correspond pour les échantillons « sol + chaux 2 % (TW2%d98) » à une masse volumique sèche de 1694 kg/m³, tandis que pour les échantillons « sol + chaux 1 % (TW1%d98) » « sol + chaux 2 % + eau de mer (SW2%d98) » cet objectif correspond à 1704 kg/m³. L'écart de densité de 0.6 % est négligeable. On simplifiera les densités visées pour fabriquer ces trois lots échantillons traités à la même densité. Ainsi le paramètre densité n'entrera pas en jeu lors de la comparaison des propriétés de ces trois matériaux. On prend comme objectif de densité pour ces trois matériaux 1694 kg/m³.

Les échantillons traités à 2% avec un objectif de densité de 95% de l'OPN sont fabriqués à une masse volumique sèche de 1620 kg/m³.

Le matériau non traité est compacté à une masse volumique sèche de 1713 kg/m³. Le Tableau II.4 résume les densités visées.

Tableau II.4 : Valeur des densités visées lors de la confection des éprouvettes.

Densité\chaux	0%	1%	2%	2% avec eau de mer
95% de l'OPN (kg/m ³)			1620	
98% de l'OPN (kg/m ³)	1713	1694	1694	1694

Les échantillons étant préparés à la main, il existe une certaine variabilité de masse volumique entre les éprouvettes d'un même matériau. Le contrôle de la teneur en eau de compactage est limité par le fait que l'hydratation de la chaux et la réaction exothermique résultante ne génère pas toujours la même chute de teneur en eau à ±0.2% près. Cela explique en partie la variabilité inter-échantillon de la teneur

en eau. La valeur moyenne et la dispersion des valeurs de densité et de teneur en eau des échantillons fabriqués sont présentées Figure II.8.

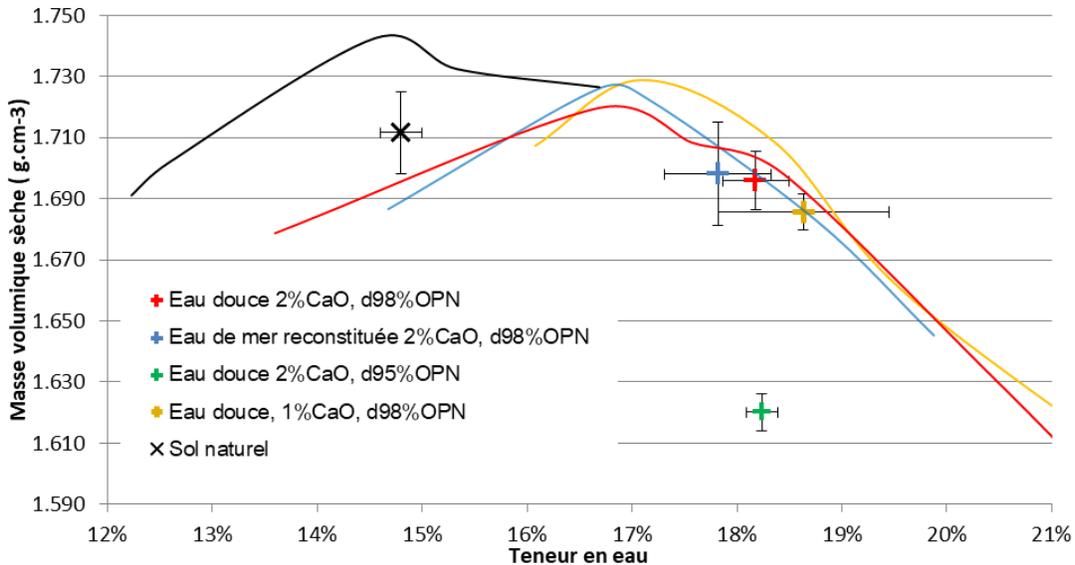


Figure II.8 : Projection sur le diagramme des courbes Proctor des caractéristiques de densité et de teneur en eau des échantillons fabriqués au laboratoire. Les croix représentent les valeurs moyennes de l'ensemble des échantillons fabriqués pour chaque type d'échantillon. Les écarts types donnent la dispersion des valeurs autour de ces moyennes. La légende des courbes est donnée Figure II.6.

II.1.4.5. Mise en cure des échantillons

Une fois compactées les éprouvettes sont démoulées, pesées, et leurs dimensions sont mesurées. Les éprouvettes sont emballées dans du film étirable transparent puis enfermées dans un sachet hermétiquement fermé pour maintenir la teneur en eau de l'échantillon constante. La température est maintenue constante pendant la cure à $20 \pm 1^\circ\text{C}$ dans une salle climatisée.

Pour évaluer l'effet du temps de cure sur les propriétés du sol traité, les échantillons sont mis en cure pendant une durée de 28 jours, 90 jours et 1an. Durant la cure des mesures géophysiques sont réalisées sur certains échantillons selon le protocole décrit au paragraphe II.4.7.5 . A l'issue de la cure un échantillon fait soit l'objet d'un essai destructif, soit il rentre dans la phase de vieillissement accéléré par imposition de cycles hydriques à l'eau de mer.

II.1.5. Bilan de l'étude paramétrique sur matériaux

La caractérisation du limon de Salin de Giraud a permis de choisir les caractéristiques du traitement à la chaux. Les différentes formulations et compacités choisies visent à reproduire une variabilité représentative des hétérogénéités du matériau qu'il serait probable de trouver dans une digue en vraie grandeur. On cherchera à déterminer l'influence de la composition initiale du matériau sur sa durabilité. En particulier on s'intéressera à la conséquence de la présence d'eau de mer au moment du traitement

en comparaison avec un traitement à l'eau douce. L'effet du temps de cure des matériaux sur leur durabilité sera également évalué.

L'étude de durabilité au laboratoire s'appuie sur l'établissement d'un protocole de sollicitations hydrauliques représentatives de l'environnement maritime côtier. Il s'agit ensuite de caractérisation de la résistance à l'érosion, de la résistance mécanique et de la porosité des matériaux en fonction du nombre de sollicitations subies. La partie 2 de ce chapitre présente le protocole mis en place pour reproduire les sollicitations environnementales au laboratoire pour générer le vieillissement accéléré du matériau. La partie 3 présente le protocole permettant de quantifier l'influence du temps de cure sur la durabilité pour les différents matériaux. La partie 4 présente les propriétés des matériaux mesurés au cours de la cure et du vieillissement, les dispositifs expérimentaux associés et des précisions sur l'interprétation des données brut des essais lorsque c'est nécessaire.

II.2. Etablissement du protocole de reproduction des sollicitations environnementales

II.2.1. Définition

Dans cette thèse le terme vieillissement accéléré désigne l'ensemble des dégradations des propriétés initiales des matériaux conséquence de la reproduction accélérée des sollicitations environnementales d'une digue maritime. On distingue la période de cure pendant laquelle l'échantillon est confiné, interdisant les échanges avec l'environnement, et la période où se produit le vieillissement accéléré, lorsque l'échantillon est déconfiné et soumis à des conditions environnementales faisant varier son état hydrique et chimique.

II.2.2. Sollicitations environnementales spécifiques à une digue maritime

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 d'immersions-émersions sont deux sollicitations majeures susceptibles de détériorer les propriétés initiales d'un matériau. Au laboratoire les sollicitations environnementales sont simplifiées et limitées à l'étude de l'impact de l'eau salée et des cycles hydriques représentant l'alternance des périodes d'immersion et d'émersion sur les propriétés du matériau.

II.2.3. Etablissement des cycles de séchage-humidification à l'eau de mer

On cherche à déclencher le vieillissement des matériaux par des cycles d'humidification séchage. Ce protocole est inspiré des cycles hydriques proposés par Mehenni (2015). Les cycles hydriques commencent par la phase de séchage qui s'enchaîne avec une phase d'humidification à l'eau de mer, et ainsi de suite jusqu'au nombre de cycles défini dans le protocole de vieillissement accéléré.

Durant les cycles d'humidification séchage les éprouvettes ne sont pas confinées. Les surfaces d'échange avec leur environnement sont maximisées. Ces conditions se rapprochent de l'exposition environnementale d'un matériau proche de la surface de la digue.

II.2.3.1. Essais préparatoires à la définition des cycles hydriques

Pour définir le mode de séchage et d'humidification et la durée des cycles des études préliminaires ont été menées sur des éprouvettes de sol traité à 1 % de chaux, après 28 jours de cure.

L'immersion est une sollicitation qui pour un échantillon à 28 jours de cure déclenche très rapidement la dégradation des échantillons et ne laisse pas la possibilité de renouveler les cycles un grand nombre de fois (Mehenni, 2015). Une solution moins dommageable pour le matériau est l'humidification par montée capillaire. C'est cette solution qui est retenue.

Cette solution pose tout de même un problème en matière d'homogénéité de la teneur en eau. La hauteur des éprouvettes et le diamètre du réseau poreux ne permettent pas la montée capillaire jusqu'au sommet de l'échantillon. La solution proposée est de retourner l'échantillon au tiers de la durée totale du cycle pour relancer l'humidification par l'autre face de l'échantillon. Pour limiter le séchage via les bords de l'échantillon, l'humidification a lieu dans une boîte fermée dans laquelle l'humidité relative de l'air est de 85 ± 3 %

La durée d'humidification est fixée à 24h. Empiriquement, il est constaté que cette durée est suffisante pour obtenir un teneur en eau identique à la teneur en eau initiale du matériau à ± 1 %.

Les conditions de séchage sont choisies, d'une part, de sorte que le séchage ne soit pas de nature à générer des macro-fissures dans le matériau et, d'autre part, pour que les conditions d'hydrométries soient réalistes au regard de l'environnement naturel. Une hydrométrie à 60% satisfait à ces deux conditions. De plus pour s'affranchir des variations de température auxquelles sont très sensibles les mesures de résistivité électrique, la température aussi bien pour la phase de séchage que celle d'humidification est de 20°C.

Pour définir la durée des phases de séchage, un essai est poussé jusqu'à une diminution asymptotique de la teneur en eau, autour de 1 % de teneur en eau (Figure II.9). Cette valeur correspond au point d'entrée d'air du matériau, i.e. l'état où l'eau résiduel du matériau est contenue dans la porosité non connectée. Cet état est atteint en 7 jours. Ce temps est jugé trop long si l'on veut réaliser un grand nombre de cycles (jusqu'à 12 cycles) dans un délai raisonnable pour des essais au laboratoire.

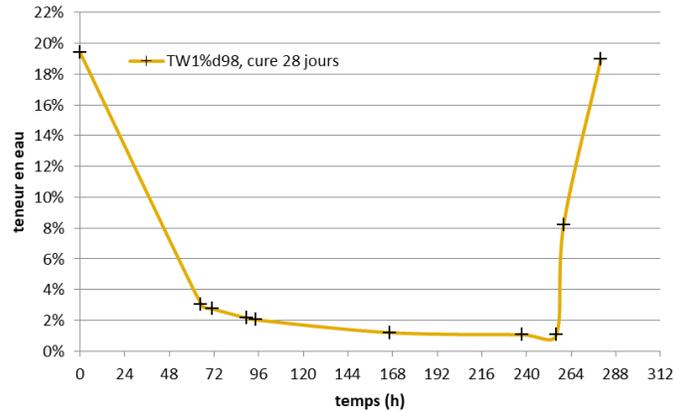


Figure II.9 : Suivi de la teneur en eau d'une éprouvette en condition de séchage jusqu'à une stabilisation de sa teneur en eau, puis en condition d'humidification pendant 24h. Essai réalisé sur 12 jours.

Pour une meilleure répétabilité des cycles pour tous les types de matériau et pour des raisons pratiques de réalisation, on choisit de fixer le temps de séchage et non pas un objectif de teneur en eau. Pour des raisons pratiques encore une fois, la durée de séchage n'est pas la même à chaque cycle : la durée de séchage alterne une fois sur deux entre 48h et 72h. Ainsi, il est possible de réaliser les cycles en continu sur la semaine à raison de 2 cycles par semaine.

II.2.3.2. Description des cycles de séchage humidification

Au vu des essais préparatoires, les conditions de séchage et d'humidification du matériau retenues sont présentées Tableau II.5 et illustrées Figure II.10.

Tableau II.5 : Caractéristiques des phases de séchage et d'humidification constituant les cycles hydriques.

	Séchage	Humidification
Condition	En chambre climatique : <ul style="list-style-type: none"> • T =20°C, • Humidité relative de l'air HR= 60% 	Utilisation du phénomène de montée capillaire. Les éprouvettes sont posées sur une pierre poreuse recouverte d'un papier-filtre et plongées dans l'eau de mer reconstituée. Pour accélérer l'homogénéisation de l'humidité dans les éprouvettes, la face de l'éprouvette au contact de la pierre poreuse est inversée à 1 ^{er} tiers de la durée de l'humidification.
Durée	48h ou 72h en alternance	24h

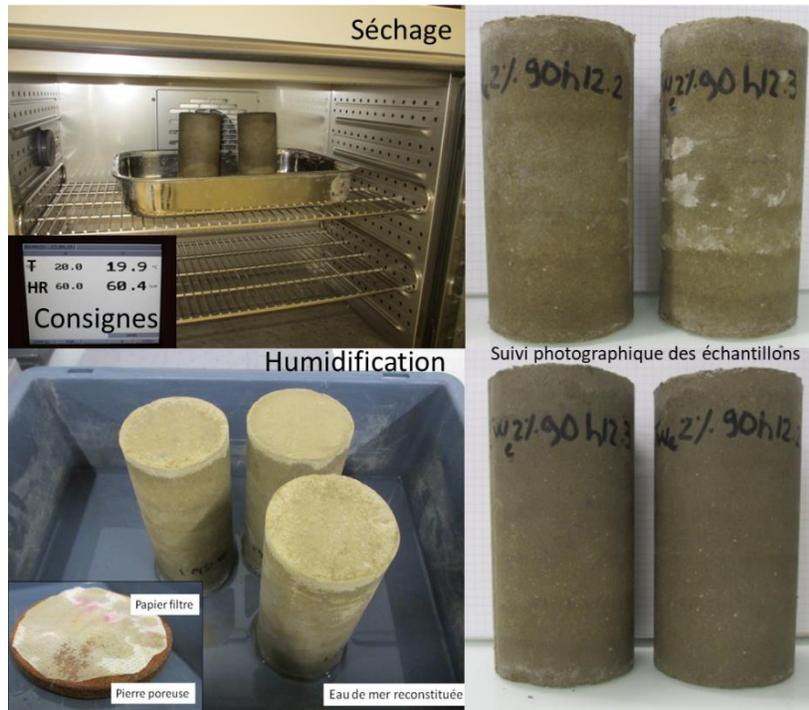


Figure II.10 : Illustration des conditions de séchage et d'humidification des éprouvettes. Un suivi photographique des éprouvettes est effectué à la fin de chaque phase pour contrôler visuellement l'homogénéité des éprouvettes, et notamment à leurs extrémités.

II.2.4. Suivi des cycles

Durant les cycles, la masse des échantillons est suivie par pesées et leur teneur en eau est calculée pour chacune de ces mesures. Les volumes sont contrôlés au pied à coulisse (3 fois 3 mesures du diamètre, en haut en bas et au milieu de l'échantillon, et 3 mesures de la hauteur) et s'avèrent constant (ou inférieurs à la précision du pied à coulisse de 0.01mm). Ce suivi permet de qualifier les cinétiques de variations hydriques, sur une durée de temps imposé, pour les matériaux en fonction de leur composition et de leur histoire (nombre de cycles déjà subits auparavant). Ces cinétiques nous renseignent sur l'évolution qualitative de la perméabilité et des capacités de rétention d'eau des matériaux après un certain nombre d'expositions à l'eau de mer, sans avoir à réaliser des mesures de perméabilité à l'eau.

Le suivi permet également de s'assurer que les états hydriques des différents échantillons d'un même lot sont bien identiques (comparaison ensuite des propriétés des échantillons ayant suivi les mêmes chemins d'humidification séchage).

La Figure II.11 présente le suivi de la teneur en eau au cours de 4 cycles après 28 jours de cure. Dans les mêmes conditions les différents matériaux ne réagissent pas de la même manière. On notera que le matériau traité à 1% de chaux sèche plus vite que les matériaux traités à 2% de chaux. De même, on

remarque des différences de comportement du matériau contenant de l'eau de mer initialement (SW) et celui n'en comportant pas (TW), puis au fil des cycles ces différences s'amenuisent.

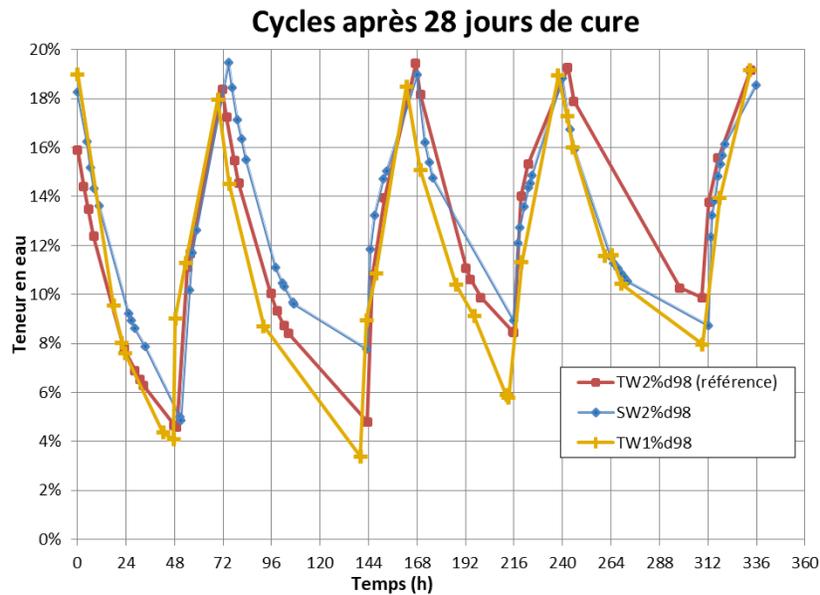


Figure II.11 : Exemple comparatif de la variation de teneur en eau au cours de 4 cycles hydriques après 28 jours de cure pour trois matériaux différents.

De la même manière on constate des différences dans les variations de teneur en eau au cours des cycles hydriques pour un même matériau en fonction du temps de cure (Figure II.12). L'analyse des vitesses d'humidification et de séchage permet donc de qualifier des différences de propriétés hydrauliques en fonction de leur formulation et de leur âge. Ces observations seront couplées à l'étude de la porosité des matériaux et de son évolution.

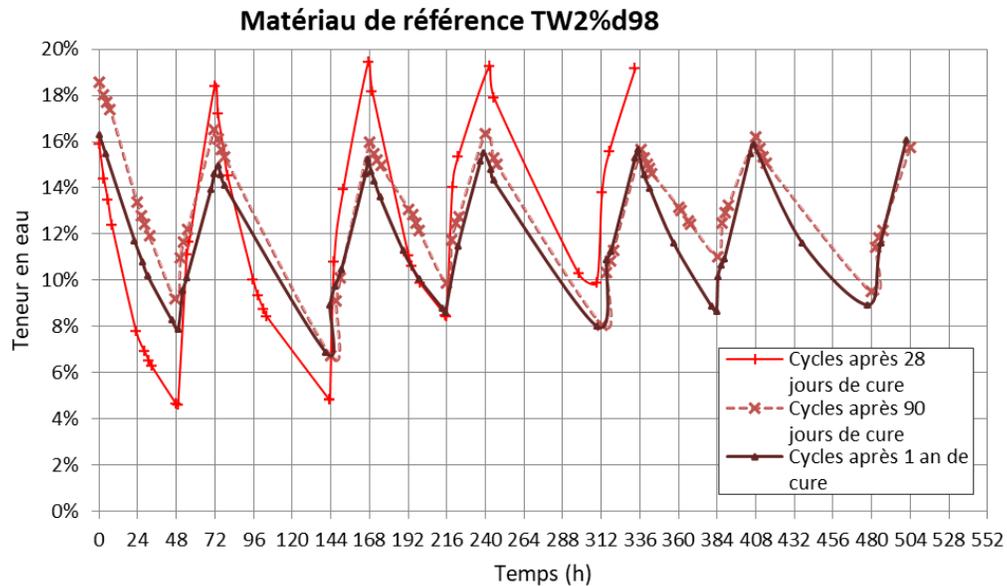


Figure II.12 : Exemple comparatif de la variation de teneur en eau au cours des cycles hydriques pour le matériau TW2%d98 en fonction du temps de cure précédant les cycles.

II.3. Protocole d'étude de l'influence du temps de cure sur la durabilité

Il a été vu dans le chapitre 1 que les réactions pouzzolaniques sont des réactions lentes qui, en fonction de la nature des argiles, de la quantité de chaux et de la mobilité des ions dans le matériau (Maubec, 2010), peuvent perdurer jusqu'à un an au moins. La cinétique de ces réactions varie de façon hyperbolique. La vitesse d'évolution des propriétés mécaniques, conséquence directe des réactions pouzzolaniques, évolue très rapidement lorsque les réactifs en présence sont en concentration importante puis diminue au fur et à mesure de la consommation des réactifs. Classiquement les essais de caractérisation des propriétés des sols traités à la chaux, tout comme les études sur les bétons, sont menés après 28 jours ce qui laisse le temps aux réactions pouzzolaniques de démarrer, et à 90 jours de cure pour quantifier le gain apporté par l'allongement de la cure et la variation de la cinétique des réactions pouzzolaniques (Le Roux and Rivière, 1969; Maubec, 2010; Nguyen, 2015). Pour pouvoir comparer nos résultats expérimentaux avec ceux de la littérature, nous choisissons de caractériser nos matériaux à 28 et 90 jours. Nous ajoutons au programme expérimental des caractérisations à un an dans le but de quantifier le gain de durabilité en fonction du temps de cure des matériaux.

Pour chaque type de matériau une étude complète sur la durabilité du matériau est menée après 90 jours de cure. Ceci correspond à une durée qui permet, au vu de l'état de l'art, d'augmenter significativement les propriétés des matériaux traités, et qui reste une durée suffisamment courte pour mener plusieurs séries d'essais dans le cadre de cette thèse. 90 jours est également une durée réaliste par rapport au temps qui s'écoule entre la construction d'un ouvrage de type digue en France, généralement au printemps et en été, et la première fois où l'ouvrage est sollicité, le plus souvent à l'automne et en hiver.

Des études plus succinctes sont réalisées à 28 jours et 1 an de cure pour déterminer l'influence du temps de cure sur la durabilité du matériau, c'est-à-dire sur les valeurs des différentes propriétés étudiées et leurs évolutions lorsque le matériau est soumis aux cycles d'humidification séchage. Le Tableau II.6, le Tableau II.7, le Tableau II.8 et le Tableau II.9 synthétisent les temps de cure et les nombres de cycles hydriques réalisés pour les différents matériaux.

On remarquera que dans le cas du matériau traité avec 1% de chaux, le nombre maximum de cycles imposés est de 10 contrairement aux autres matériaux car l'état de dégradation du matériau à 10 cycles ne permet pas de prolonger le protocole de vieillissement.

Sur les éprouvettes de sol non traité, les cycles d'humidification séchage n'ont pu être menés à bien car dès la première phase d'humidification le matériau gonfle et s'effondre. Les essais de caractérisation des propriétés des éprouvettes de sol non traité sont réalisés uniquement après 90 jours et 1an de cure, sans cycle hydrique.

Tableau II.6 : Temps de cure et nombre de cycles hydriques à l'eau de mer pour le matériau TW2%d98.

Matériau	TW2%d98		
Temps de cure avant le déclenchement du vieillissement accéléré	28 jours	90 jours	1 an
Nombre de cycles effectués avant les essais de caractérisation du matériau	0 - 2 - 4	0 - 2 - 4 - 6 - 8 - 12	0 - 2 - 6

Tableau II.7 : Temps de cure et nombre de cycles hydriques à l'eau de mer pour le matériau SW2%d98.

Matériau	SW2%d98		
Temps de cure avant le déclenchement du vieillissement accéléré	28 jours	90 jours	1 an
Nombre de cycles effectués avant les essais de caractérisation du matériau	0 - 2 - 4	0 - 2 - 4 - 6 - 8 - 12	0 - 2 - 6

Tableau II.8 : Temps de cure et nombre de cycles hydriques à l'eau de mer pour le matériau TW1%d98.

Matériau	TW1%d98		
Temps de cure avant le déclenchement du vieillissement accéléré	28 jours	90 jours	1 an
Nombre de cycles effectués avant les essais de caractérisation du matériau	0 - 2 - 4	0 - 2 - 4 - 6 - 8 - 10	0 - 2 - 6

Tableau II.9 : Temps de cure et nombre de cycles hydriques à l'eau de mer pour le matériau TW2%d95.

Matériau	TW2%d95	
Temps de cure avant le déclenchement du vieillissement accéléré	90 jours	1 an
Nombre de cycles effectués avant les essais de caractérisation du matériau	0 - 2 - 4 - 6 - 8 - 12	0 - 2 - 6

II.4. Dispositifs expérimentaux pour la caractérisation des propriétés du matériau selon l'approche multi-physique

En lien avec les fonctions d'une digue, la durabilité du matériau traité à la chaux dans le cadre de ces travaux est définie comme la vitesse d'évolution des propriétés d'érosion du matériau, de ses propriétés mécaniques et de son organisation microstructurale lorsque le matériau est soumis à des conditions de vieillissement accélérées. Nous présentons dans cette partie les essais permettant de caractériser la résistance à l'érosion interne et externe, la résistance mécanique en compression simple, un module mécanique associé, et la répartition de la porosité des matériaux.

Dans le but de caractériser les réponses géophysiques du matériau en fonction de sa composition et de son état de dégradation, deux méthodes sont utilisées dans ces travaux : la mesure de résistivité électrique et la mesure des vitesses de propagation des ondes sismiques P et S dans les matériaux. Les dispositifs de mesure sont présentés dans cette partie.

II.4.1. Caractérisation de la résistance en compression simple.

La résistance en compression simple est la force maximale pouvant être exercée sur une éprouvette cylindrique non confinée d'éclatement supérieur ou égale à deux, rapporté à la section de l'éprouvette. 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 dans le domaine des sols traités à la chaux, avec donc une possibilité de comparer nos résultats avec ceux de la bibliographie. (Bell, 1996; Le Roux and Rivière, 1969; Mehenni, 2015; Nguyen, 2015). La norme utilisée est NF EN 13286-41, avec un pilotage de l'essai à déplacement constant (3mm/min). Au cours de l'essai la force et la déformation globale de l'échantillon sont enregistrées à une fréquence de 10Hz.

La résistance en compression simple est utilisée comme des marqueurs du changement de comportement du matériau avec la cure ou le vieillissement accéléré.

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 résistance sont mises en relation avec les autres paramètres du matériau à l'échelle microstructurale ainsi qu'avec les données géophysiques.

II.4.2. Etude de l'érosion interne par l'essai d'érosion de trou (HET)

L'essai d'érosion de trou consiste à générer un écoulement dans un trou préformé dans un échantillon de sol au sein d'un dispositif instrumenté qui permet de mesurer le débit, le gradient hydraulique aux bornes de l'échantillon (Wan and Fell, 2002) et dans les dispositifs les plus récents, la turbidité générée par l'érosion du sol (Haghighi, 2012). L'objectif de l'essai est de déterminer la contrainte de cisaillement critique pour laquelle se déclenche l'érosion et la relation entre contrainte de cisaillement et taux d'érosion.

II.4.2.1. Appareillage

Le dispositif initialement développé par Wan et Fell (2002,2004), a été par la suite optimisé pour améliorer le contrôle de la charge hydraulique et déterminer la masse érodée instantanée par des mesures de turbidité (Reiffsteck et al., 2006; Benahmed and Bonelli, 2012; Haghighi et al., 2013). L'appareil développé à l'IFSTTAR par Chevalier et al. (2012) ne permettait pas d'initier l'érosion des sols traités à la chaux. L'appareil a été modifié pour fournir et mesurer des débits jusqu'à $2.10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ contre $3.10^{-4} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ initialement, ce qui a permis d'éroder le sol traité à la chaux, beaucoup plus résistant que les sols non traités (Haghighi et al., 2013).

Le dispositif est constitué d'une cellule d'essais contenant l'éprouvette de sol, d'un réservoir d'eau de type surpresseur, d'un circuit d'alimentation et d'évacuation de l'eau, et d'un ensemble de capteurs reliés à une centrale d'acquisition des données. La Figure II.13 présente la photographie du dispositif. Les caractéristiques des différents éléments sont les suivants:

1. Le réservoir d'eau de type surpresseur à vessie. L'eau se trouve à l'intérieur d'une vessie souple, l'air comprimé est injecté entre la paroi métallique et la vessie. La pression maximale supportée par le réservoir est de 10000 kPa, mais le réseau d'air comprimé du laboratoire est limité à 800kPa si bien que cette limite n'est jamais atteinte. Dans les faits la pression dans le réservoir au cours des essais d'érosion varie dans une gamme entre 200kPa et 500kPa. Le volume du réservoir est de 500L. Le réservoir est rempli avant un essai à l'aide d'une pompe qui est branchée entre un bac d'eau à surface libre et le réservoir.
2. Le débitmètre à oscillation de la marque KOBOLD, type DOG-2340H. Le principe de la mesure est le suivant : le fluide passe dans un tube muni d'un diaphragme et de perforations latérales qui permettent au fluide d'arriver dans la cellule de mesure. Lorsque le fluide s'écoule dans la cellule de mesure, une colonne de liquide en U se met à osciller. La fréquence de cette oscillation est proportionnelle à la vitesse de l'écoulement et donc au débit volumique. L'oscillation de la colonne est transmise à une sphère métallique dont le mouvement est capté par un capteur inductif et

transformé en signal électrique. La plage de mesure du débitmètre est de $2 \cdot 10^{-5}$ à $2 \cdot 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ce débitmètre convient donc uniquement pour des matériaux qui s'érodent dans cet appareil pour des débits supérieurs à $2 \cdot 10^{-5} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pour que l'écoulement au travers du débitmètre soit le plus laminaire possible, le constructeur recommande que les longueurs droites en amont et en aval soient au minimum respectivement de 10 et 5 fois le diamètre de la tuyauterie. Le diamètre du conduit est de 4cm, la section droite en amont est supérieure à 40cm et supérieur à 20cm en aval.

3. La valve à volant qui permet de contrôler manuellement le débit dans le circuit.
4. Un tube piézométrique en amont de la cellule d'érosion destiné à contrôler que la charge hydraulique soit faible et constante entre l'amont et l'aval de l'échantillon durant la phase d'évacuation de l'air de la cellule.
5. La cellule d'érosion comportant une chambre d'entrée d'un diamètre intérieur de 30mm, une chambre d'essai où se trouve l'échantillon d'une longueur de $140 \pm 4 \text{mm}$ et une chambre de sortie d'un diamètre intérieur de 40mm.
6. Les valves de purge d'air destinées à faire évacuer l'eau de la cellule avant le début de chaque essai, et les valves de purge d'eau destinées à vider l'eau de la cellule une fois l'essai terminé.
7. Deux transmetteurs piézorésistifs mesurent les pressions dans la chambre d'entrée (pression amont) et dans la chambre de sortie (pression aval). Le capteur amont a une plage de mesure de 0 à 200kPa, le capteur aval à une plage de mesure entre 0 et 20kPa. Avant le début tout l'air du circuit est chassé par l'eau. Une fois le circuit totalement saturé en eau, la pression mesurée par chacun des capteurs est initialisée à 0kPa.
8. Le turbidimètre modèle A15/76 ATI pour mesurer la turbidité de l'eau en aval de la cellule d'érosion. L'interprétation du signal de turbidité permet ensuite de le relier à la masse érodée au cours du temps.

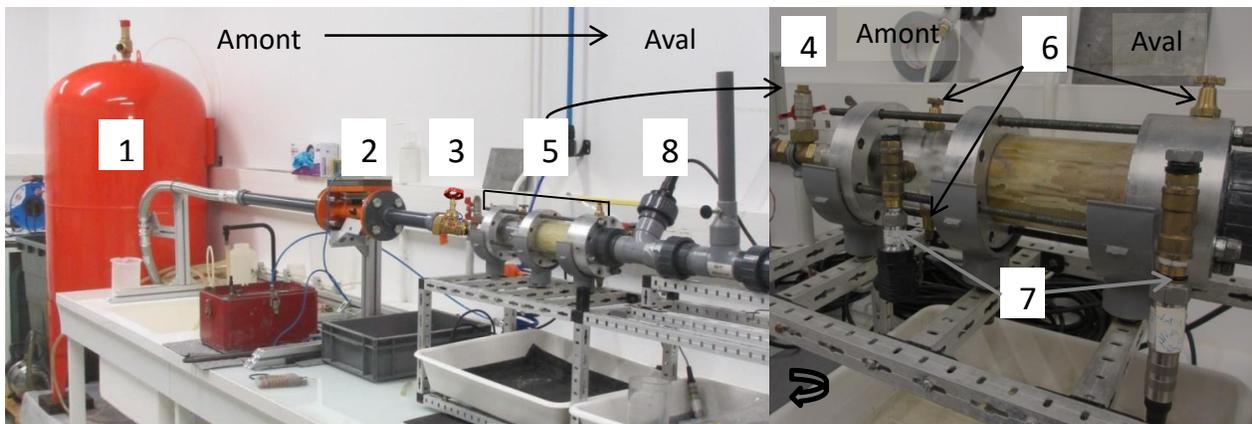


Figure II.13 : Photographie légendée de l'appareil HET.

Tous les capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition des données qui enregistre les signaux à une fréquence de 1Hz et les transmet à l'ordinateur. Les données mesurées sont affichées sur l'ordinateur via une interface LabView.

II.4.2.2. Réalisation de l'essai

Préparation de l'éprouvette

L'échantillon de sol est introduit par pistonnage dans un tube de plexiglass transparent d'une longueur de 15 cm, d'un diamètre intérieur de 7 cm et d'un diamètre extérieur de 8 cm. La paroi du tube est enduite de quelques millimètres de gel de silicone avant l'introduction de l'éprouvette, pour éviter les écoulements d'eau parasite entre le moule et l'éprouvette.

Perçage du trou

Les éprouvettes sont percées juste avant l'essai, avec une perceuse à colonne en 3 passes correspondant au perçage de 1/3 de la hauteur à chaque passe. Cela évite que le matériau s'accumule sur le foret et ne génère un sur-compactage du sol au passage du foret. Le diamètre du trou est de 5 mm, soit 2 mm de plus que le diamètre usuellement choisit pour un essai sur un sol fin non traité. Deux justifications explique ce choix : diminuer la contrainte de cisaillement pour des faible débit pour éviter que l'érosion ne se déclenche avant que la mesure du débit soit possible (limite de détection $2.10^{-5} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) ; limiter les perte de charge singulières liées aux changements de diamètre entre les conduites amont et aval du dispositif et le diamètre du trou de l'échantillon.

Montage de la cellule d'essai

L'échantillon est emboîté entre les deux autres parties de la cellule d'essai et le tout est fixé par 4 tiges filetées. À l'aval de l'échantillon est préalablement placée une grille percée au centre d'un trou de 3cm de diamètre (Figure II.14). Cette grille permet d'éviter la rupture mécanique de l'exterminé aval de l'échantillon sous l'effet de la charge hydraulique, tout en ne perturbant pas l'écoulement à travers en en sortie du trou pendant toute la durée de l'essai. Empiriquement il a été constaté que le diamètre maximal du trou en fin d'essai est inférieur à 3cm de diamètre. Par conséquent même en fin d'essai, la grille ne perturbe pas l'écoulement. La cellule d'essai est ensuite insérée et fixée dans le circuit hydraulique.

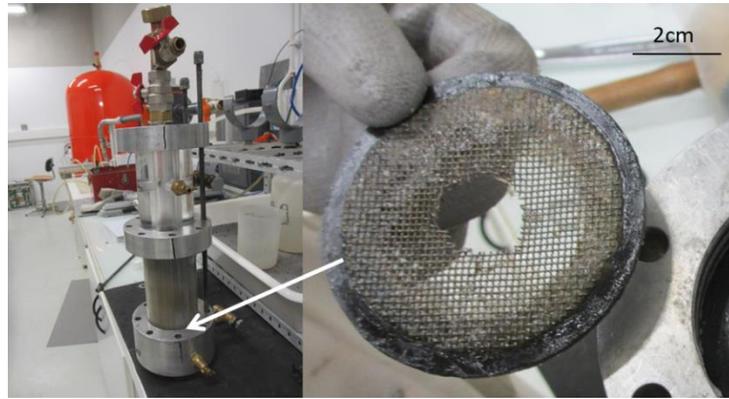


Figure II.14 : Assemblage de la cellule d'érosion avec la grille percée placée en aval de l'échantillon.

Mise en eau du circuit

Le réservoir est rempli d'eau et mis sous une pression de 5000 kPa. La valve du réservoir est ouverte et la saturation en eau du débitmètre est vérifiée. La vanne à volant est ouverte de sorte de laisser passer un faible courant d'eau pour mettre en eau doucement la cellule d'essai. De l'eau est simultanément introduite depuis la partie aval du circuit pour équilibrer la charge hydraulique pendant la mise en eau et éviter le remaniement de l'échantillon. Les purges d'air sont ouvertes jusqu'à ce que de l'eau en sorte. Ces purges sont ensuite refermées. La valve à volant est fermée pour établir un état d'équilibre hydraulique et initialiser les capteurs de pression amont et aval à zéro depuis l'interface LabView.

Réalisation de l'essai

L'essai peut être réalisé de deux manières différentes : soit en maintenant un débit constant au cours de l'essai, soit en maintenant constante la perte de charge hydraulique (différence entre la charge hydraulique en amont et en aval de l'échantillon). Dans le premier cas, la contrainte de cisaillement sur le matériau est plus élevée au début de l'essai et diminue au cours de l'essai lorsque le rayon du trou augmente. Cependant il est difficile de connaître à priori le débit à imposer pour déclencher l'érosion (débit suffisamment élevé) tout en s'assurant que la durée de l'essai soit suffisamment longue pour acquérir correctement les données (donc ne pas avoir un débit trop grand qui entraînerait l'érosion en quelques secondes). Dans le cas de l'évaluation de la durabilité sur les matériaux soumis à différents nombres de cycles de sollicitations hydriques, chaque échantillon est supposé différent, il serait donc difficile de choisir le débit. C'est pourquoi nous utilisons la seconde méthode, celle des pertes de charge constantes. Avec cette méthode, les contraintes de cisaillement augmentent au cours de l'essai. Le débit est augmenté progressivement jusqu'à ce que l'érosion se déclenche. Le diamètre du trou s'agrandit à partir de ce moment-là, par conséquent la conductivité hydraulique et la rugosité relative du trou changent en continu. Pour maintenir la perte de charge constante dans le trou, le débit est augmenté par l'intermédiaire de l'ouverture de la vanne amont. L'essai se termine lorsque le débit maximal qu'il

est possible de fournir n'est plus suffisant pour maintenir la perte de charge constante. Cela correspond à un rayon du trou d'environ 20mm. Le débit est progressivement rapporté à zéro, l'acquisition des données est stoppée. Le circuit est purgé de son eau, puis l'échantillon en est extrait.

Mesure du volume final du trou

Le trou final est moulé avec de la paraffine fondue (Figure II.15). Le volume de la paraffine diminue en refroidissant, c'est pourquoi il faut verser la paraffine en plusieurs fois pour remplir le volume du trou en entier. Une fois toute la paraffine refroidie, l'échantillon est démoulé puis découpé pour sortir le moulage intact. Le moulage donne la forme du trou final. Le volume du moulage est mesuré par une pesée hydrostatique donnant la différence du poids du moulage dans l'air et de son poids déjaugé (dans l'eau). La densité de la paraffine étant inférieure à celle de l'eau, le moulage doit être lesté par une masse de volume connu pour obtenir son immersion totale. Le volume du moulage V_{moulage} permet le calcul du rayon final moyen R_f (II.1) et de la masse érodée totale m_{er} (II.2) :

$$R_f = \sqrt{\frac{V_{\text{moulage}}}{\pi L}} \quad (\text{II.1}) \quad \text{et} \quad m_{er} = \rho_s L \pi (R_f^2 - R_i^2) \quad (\text{II.2})$$

avec L la longueur de l'échantillon ($140\text{mm} \pm 5\text{mm}$), ρ_s la masse volumique sèche du matériau et R_i le rayon initial du trou (2.5 mm) et m_{er} la masse érodée totale.

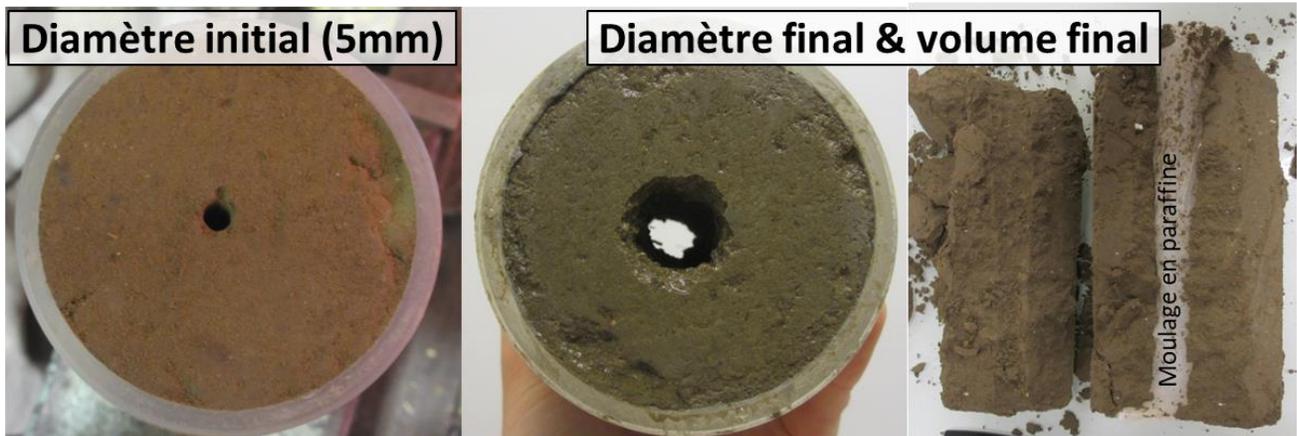


Figure II.15 : Echantillon avant et après essai.

II.4.2.3. Interprétation de l'essai

II.4.2.3.1. Paramètre de l'érosion

Une loi d'érosion relie, à l'interface entre le sol et un fluide dont l'écoulement est tangent à l'interface, les deux grandeurs physiques suivantes (Figure II.16):

- la contrainte de cisaillement τ entre l'écoulement liquide et le sol (en Pascal (Pa) dans le système d'unités internationales (SI))

- le taux d'érosion ϵ , qui représente la masse érodée par unité de temps et d'aire (en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ dans le SI)

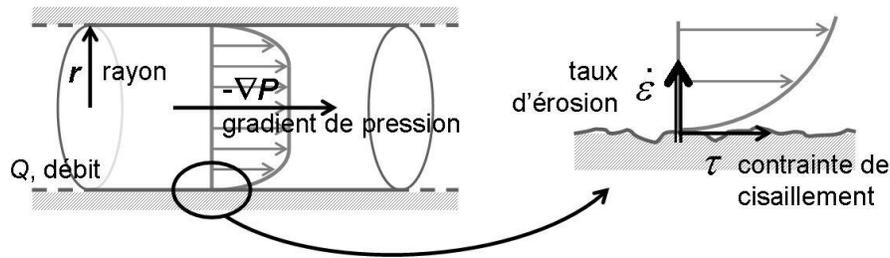


Figure II.16 : Schéma des grandeurs décrites par les lois d'érosion (Haghighi, 2012).

La loi d'érosion empirique est généralement donnée sous la forme (Briaud et al., 2001; Wan and Fell, 2004; Bonelli, 2013) :

$$\dot{\epsilon} = k_{er}(\tau - \tau_c) \quad (\text{II.3})$$

avec $k_{er}(\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$ le coefficient d'érosion et τ_c la contrainte de cisaillement critique au-delà de laquelle le matériau s'érode (Figure II.17).

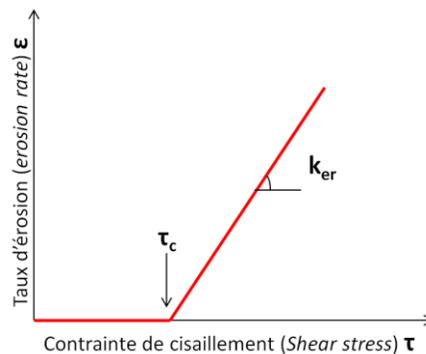


Figure II.17 : Représentation de la loi d'érosion empirique.

II.4.2.3.2. Détermination de la contrainte de cisaillement τ

Le trou dans l'échantillon lors d'un essai HET est modélisé par un cylindre évidé de rayon $r(t)$ et de longueur L . Une différence de pression ΔP entre les extrémités du trou génère un flux qui exerce un cisaillement sur l'interface fluide-sol. L'écoulement dans le trou est supposé quasi-stationnaire, l'écoulement à chaque instant t peut être supposé comme celui établi dans une conduite de rayon $r(t)$. Le bilan des forces sur un volume de fluide dans la direction de l'écoulement permet d'exprimer la contrainte de cisaillement τ appliquée par le fluide sur le sol :

$$2\pi r(t) L \tau = \pi r(t)^2 \Delta P \quad (\text{II.4})$$

Soit :

$$\tau = \Delta P \frac{r(t)}{2L} \quad (\text{II.5})$$

La différence de pression dans le trou n'est pas directement accessible étant donné que les capteurs de pression se trouvent dans les chambres en amont et en aval où les rayons des conduits sont différents du rayon du trou dans l'échantillon (Figure II.18). Les changements de section génèrent des pertes de charge singulières qu'il faut considérer. On note ΔP_T la différence des pressions mesurées au niveau des capteurs. ΔP_T correspond à la somme des pertes de charge linéaires dans le trou lié au frottement à l'interface sol-fluide (ΔP), et des pertes singulières liées au changement de diamètre du conduit en amont et en aval de l'échantillon (ΔP_{sing}).

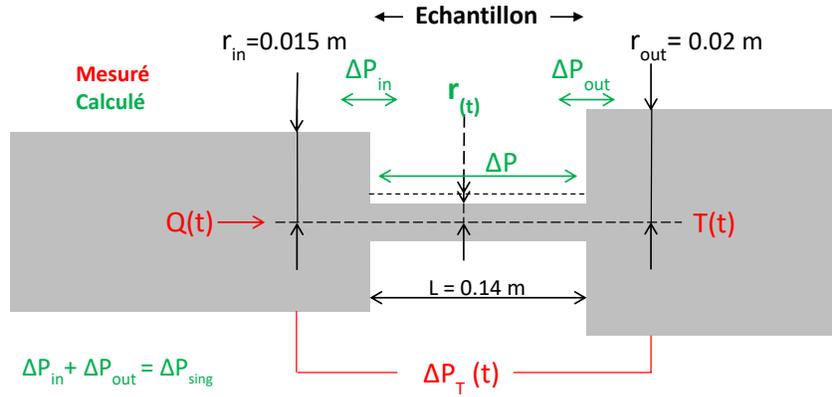


Figure II.18 : Schéma du conduit dans la cellule d'érosion et les pertes de charge associées.

Soit :

$$\Delta P_T = \Delta P + \Delta P_{sing} \quad (II.6)$$

τ s'exprime alors :

$$\tau = (\Delta P_T - \Delta P_{sing}) \frac{r(t)}{2L} \quad (II.7)$$

Les pertes de charges singulières s'écrivent :

$$\Delta P_{Sing} = k \cdot \rho_{fluide} \frac{V(t)^2}{2}, \text{ avec } k = k_{in} + k_{out} \quad (II.8)$$

avec $V(t)$ la vitesse dans le trou de l'échantillon de diamètre $r(t)$, k_{in} et k_{out} les coefficients de perte de charge en entrée et en sortie de l'échantillon de sol. La valeur de ces coefficients dépend des rayons des conduits et de la géométrie du système (changement de rayon abrupt ou progressif). Dans le cas du HET nous ferons l'hypothèse que le changement de rayon reste abrupt tout au long de l'essai. (Hauke, 2008; White, 2007) donnent les relations entre les coefficients de perte de charge singulière et les rayons des conduits dans le cas de changement brusque. Pour un rétrécissement brusque du conduit ($r_{in} > r(t)$), on a :

$$k_{in} = \begin{cases} 0.42 \left(1 - \frac{r(t)}{r_{in}}\right) & \text{si } \frac{r(t)}{r_{in}} \leq 0.76 \\ \left(1 - \frac{r(t)}{r_{in}}\right)^2 & \text{si } \frac{r(t)}{r_{in}} > 0.76 \end{cases} \quad (II.9)$$

Dans l'ensemble des essais de cette thèse $r(t) < 1\text{cm}$ et $r_{in} = \text{constante} = 1.5\text{ cm}$ donc $r(t) / r_{in} < 0.76$

Pour un agrandissement brusque du conduit ($r_{out} > r(t)$), on a :

$$k_{out} = \left(1 - \frac{r(t)}{r_{out}}\right)^2 \quad (\text{II.10})$$

II.4.2.3.3. Proposition d'une méthode alternative pour déterminer la contrainte τ , à partir de la définition générale des pertes de charges linéaires dans un conduit rugueux.

La formule générale des pertes de charge liées au frottement dans un conduit est (II.11) :

$$\Delta P = \lambda \cdot \rho_{fluide} \left(\frac{v(t)^2}{2}\right) \cdot \frac{L}{2r(t)} \quad (\text{II.11})$$

Avec : ΔP les pertes de charge linéaires (Pa), λ le coefficient de friction (sans unité), ρ_{fluide} la masse volumique du fluide circulant dans le conduit ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), $v(t)$ la vitesse instantanée dans le conduit ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), $r(t)$ le rayon instantané (m) et L la longueur de l'échantillon (m).

D'après (II.6) et (II.11) on a :
$$\tau = \frac{\lambda}{6} \cdot \rho_{fluide} \cdot v(t)^2 \quad (\text{II.12})$$

Le coefficient λ dépend du régime hydraulique (laminaire, turbulent lisse ou turbulent rugueux). Ce régime est déterminé à partir de la valeur du nombre de Reynolds (Re) (II.13) :

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu} = \frac{4Q}{\pi \cdot D \cdot \nu} \quad (\text{II.13})$$

avec u la vitesse ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), D le diamètre(m) ; ν la viscosité cinématique ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

Limites empiriques sont les suivantes:

$$\begin{aligned} Re < 2000 & \text{ écoulement laminaire} \\ 2000 < Re < 100\,000 & \text{ écoulement turbulent lisse} \\ Re > 100\,000 & \text{ écoulement turbulent rugueux} \end{aligned}$$

Les valeurs minimum et maximum du Reynolds observé lors de l'érosion des sols traités à la chaux de cette thèse sont: $Re_{min} = 40\,000$; $Re_{max} = 140\,000$. Au cours d'un même essai l'écoulement passe d'un régime turbulent lisse à un régime turbulent rugueux.

La formule implicite de Colebrook (1939) donne la valeur de λ dans le cas d'un régime turbulent, rugueux ou non, dans une conduite circulaire en charge (II.14) :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon_r}{3.7} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right] \quad (\text{II.14})$$

Avec : λ le coefficient de friction (sans unité), la rugosité relative $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_{absolue}}{2r(t)}$, avec $\varepsilon_{absolue} = \frac{D_{50}}{2}$;

dans le cas du sol salin de Giraud $\varepsilon_{absolue} = 10^{-5}\text{m}$

Connaissant ε_r et Re au cours d'un essai on peut résoudre numériquement cette équation implicite. Ceci est réalisé avec un script en langage python faisant intervenir la fonction « root » du module de calcul scipy.

Les pertes de charge linéaires ΔP calculées avec le coefficient de friction λ ne vérifient pas l'équation (II.6). La somme des pertes linéaires et singulières est très inférieure à la perte de charge mesurée. Les pertes de charge calculées avec la formule de Colebrook ne sont pas représentatives des pertes de charge dans le trou du sol. Les pertes de charge par friction ne semblent pas être les seules pertes à considérer au sein du conduit dans le sol. Le développement d'une nouvelle méthode d'interprétation n'étant pas le sujet de cette thèse, cette méthode reste un axe de réflexion ouvert, dont la résolution n'a pu être menée à bien dans cette thèse mais qui mériterait une recherche approfondie.

Conclusion : dans le cadre de cette thèse, nous présenterons uniquement les résultats d'essais interprétés selon la méthode la plus classique avec le calcul des pertes singulières comme défini dans l'équation II.8. La méthode de calcul des pertes de charge linéaires à partir de la formule de Colebrook n'est pas assez aboutie pour être utilisée dans cette thèse.

II.4.2.4. Détermination du taux d'érosion ε

Par définition le taux d'érosion ε est la masse érodée par unité de temps et d'aire, il peut donc s'exprimer sous la forme :

$$\dot{\varepsilon} = \rho_s \frac{dr(t)}{dt} \quad (II.15)$$

avec ρ_s la masse volumique sèche du matériau.

La détermination des paramètres d'érosion τ et ε nécessite de connaître l'évolution du rayon du trou $r(t)$ au cours de l'essai.

II.4.2.5. Détermination du rayon $r(t)$ à partir du signal de turbidité

Pham, (2008) puis Haghghi et al.(2013) ont proposé une méthode pour déterminer le rayon instantané $r(t)$ à partir des mesures de débit et de turbidité. La turbidité est un signal complexe car il dépend d'une part de la concentration en particules mais d'autre part de la taille, de la forme, de la rugosité de surface des particules ou encore de leur couleur. Une hypothèse forte qui est faite dans l'interprétation du signal de turbidité pour l'essai HET est que pour un sol donné la turbidité mesurée est proportionnelle à la concentration des effluents du sol. Dans le cas de l'érosion des sols traités à la chaux, nous verrons que cette hypothèse n'est pas vérifiée pour des taux de contrainte très élevés qui engendrent l'arrachement de particules plus grosses que celles arrachées pour de faibles contraintes de cisaillement. Cependant, la prise en compte de ce phénomène dans le calcul de la vitesse d'évolution du diamètre du trou au cours

de l'essai n'a pu être développée dans cette présente thèse et devra faire l'objet de recherches ultérieures. Nous utiliserons donc uniquement les équations précédemment données par Pham (2008) et Haghghi (2015) pour calculer le rayon $r(t)$.

En s'appuyant sur une relation de proportionnalité entre la turbidité et la concentration en sol de l'effluent, et en considérant que le gonflement du sol est nul et que le rayon du trou reste circulaire la détermination du rayon peut se faire par deux méthodes.

La première méthode consiste à calculer le diamètre du trou à partir du rayon initial et final ainsi que des produits QT cumulés. La démonstration est donnée dans la thèse de Pham (2008).

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + \frac{(r_f^2 - r_0^2) \sum_0^t Q(t)T(t)}{\sum_0^f Q(t)T(t)}} \quad (II.16)$$

Avec : $t \in (0, f)$ en seconde (s)

r_0 le rayon initial (m)

r_f le rayon final du trou mesuré d'après le moulage du trou (m)

$Q(t)$ le débit instantané ($L.s^{-1}$ ou en $m^3.s^{-1}$)

$T(t)$ la turbidité instantanée (ppm)

La seconde méthode consiste à déterminer le facteur de proportionnalité α entre la turbidité et la concentration en effluent du fluide en sortie de l'échantillon (II.15), d'après la masse érodé finale (II.2) et la somme cumulée des produits $Q(t)T(t)$

$$m_{er}(finale) = \frac{1}{\alpha} \sum_{i=0}^f Q(t_i)T(t_i)(t_i - t_{i-1}) \quad (II.17)$$

La masse érodée $m(t)$ à l'instant t s'exprime donc :

$$m_{er}(t) = \frac{1}{\alpha} \sum_{i=0}^t Q(t_i)T(t_i)(t_i - t_{i-1}) \quad (II.18)$$

Cette masse érodée est rapporté à l'augmentation du rayon du trou. On a (II.19) :

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + \frac{2}{\pi L \rho_s \alpha} \sum_{i=1}^t Q(t_i)T(t_i)} \quad (II.20)$$

Cette méthode est intéressante lorsque la texture de tous les sols étudiés est la même car il suffit de calculer le coefficient α une seule fois pour tous les essais. Dans le cas de cette thèse, la texture des différents matériaux est susceptible d'évoluer en fonction de leur composition et de leur histoire (durée de la cure et nombre de cycles subits), c'est pourquoi il faudrait calculer le coefficient α à chaque essai, ce qui revient à utiliser la première méthode. Nous utiliserons donc la première méthode pour le calcul du rayon $r(t)$ au cours des essais.

II.4.2.6. Relation entre turbidité et diamètre des particules érodées

Expérimentalement, nous avons constaté que la taille des particules érodées varie au cours des essais sur les sols traités à la chaux. Au cours de deux essais, les effluents ont été récoltés dans des seaux, par intervalle de volume de 15 à 25 litres. Une analyse granulométrique par tamisage a été menée pour les effluents de chaque seau (=chaque intervalle) et reliée aux contraintes de cisaillement τ enregistrées sur chaque intervalle (Figure II.19). Pour des contraintes τ inférieures à 800 Pa, la répartition granulométrique de matériau érodé est similaire à celle du sol non traité. Au-delà, plus la contrainte τ augmente, plus le diamètre des particules arrachées augmente. Pour $\tau > 1200$ Pa, seules 50% des particules érodées sont de diamètre inférieur à 80 μm , contre 80% lorsque la contrainte τ est inférieure à 800 Pa.

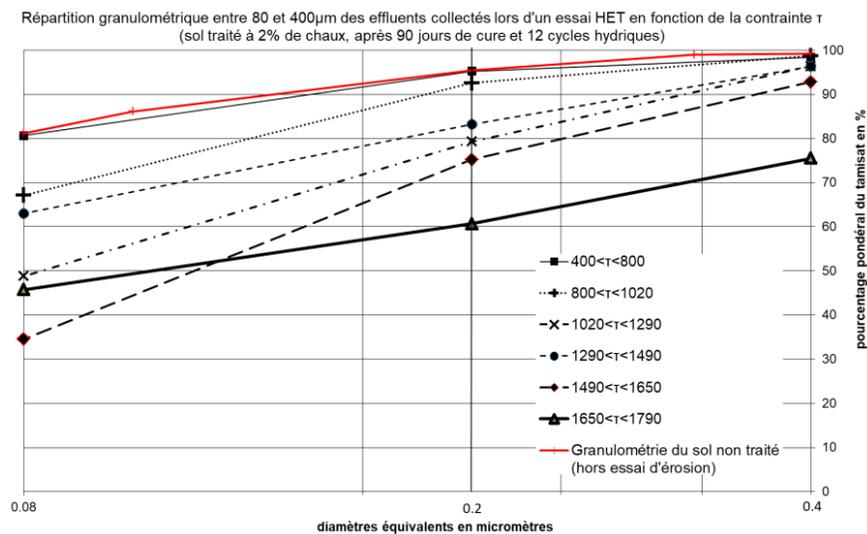


Figure II.19 : Répartition granulométrique des effluents en fonction de la contrainte de cisaillement τ , pour un sol traité à 2% de chaux, après 90 jours de cure et 12 cycles hydriques.

Le diamètre des particules érodées augmente donc avec la contrainte de cisaillement. Il existe donc une hétérogénéité de cohésion entre les particules du sol. Ce phénomène n'a pas été rapporté dans la littérature concernant l'érosion des sols non traités. Ce phénomène serait donc lié au traitement à la chaux. Notre travail n'a cependant pas apporté d'explication sur l'origine de cette hétérogénéité.

Nous avons cherché à caractériser les conséquences du changement de répartition granulométrique des effluents sur la relation entre signal de turbidité et masse érodée. Pour chaque intervalle de collecte, la somme cumulée sur chaque intervalle du produit de la turbidité par le débit ($Q \cdot T$) est mise en relation avec la masse sèche de sol, mesurée de façon directe avec une balance (Figure II.20).

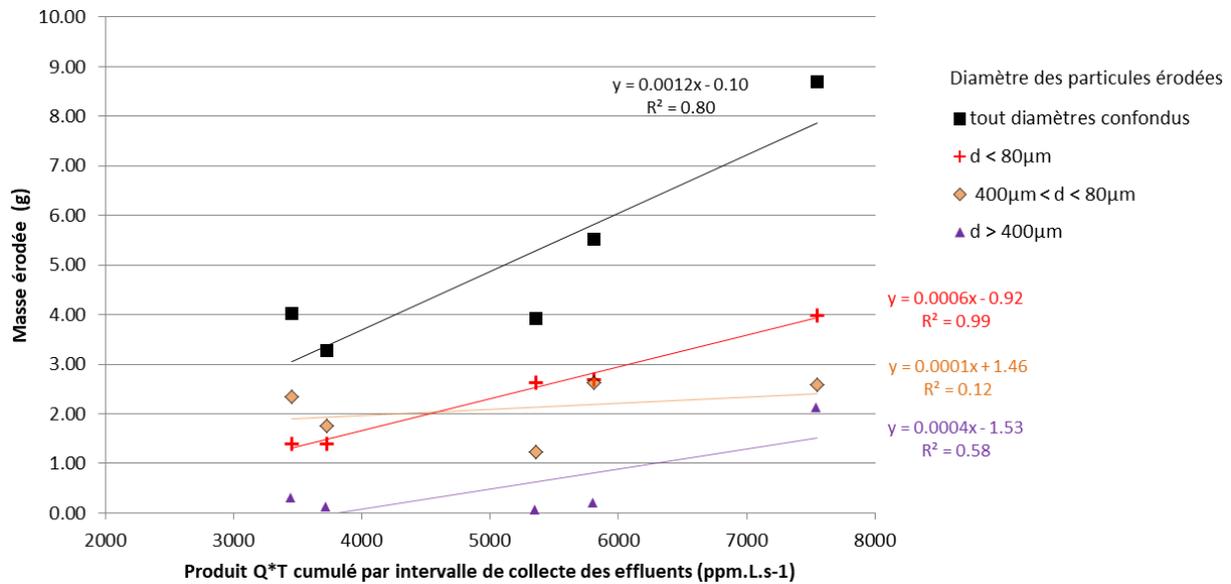


Figure II.20 : Relation entre la masse sèche érodée pour différentes tailles de particule et la valeur du produit Q*T cumulé sur les intervalles de temps durant lesquels les effluents sont collectés.

En lien avec la littérature qui propose l'existence d'une corrélation linéaire entre le produit QT et la masse érodée, nous cherchons également ici des corrélations linéaires bien que d'autres types de corrélation (polynomiale par exemple) pourraient apparaître plus pertinentes. La corrélation entre la masse de sol érodée dont le diamètre des particules est inférieur à 80 µm et le produit Q*T est très bonne (coefficient de corrélation est de 0,99). En revanche pour les particules sont de plus gros diamètre (> 80 µm), la corrélation est bien moindre (0,12 à 0,58). Cela se répercute sur la corrélation entre la masse érodée tous diamètres confondus et le produit Q*T. Ces mesures nous renseignent sur deux choses :

- la turbidité est représentative de la masse de particules érodées dont le diamètre est inférieur à 80 µm
- lorsque les particules sont de diamètre supérieur à 80 µm, le signal de turbidité sous-estime la masse érodée.

Dans le cas du limon de salin de Giraud traité à 2% de chaux et ayant subi 12 cycles à l'eau de mer, il faut considérer que pour des contraintes τ supérieures à 1500 Pa, la masse érodée et donc le diamètre du trou, évalué à partir du signal de turbidité, sont sous-estimés. Pour généraliser ces valeurs seuils, il faudrait réaliser ces mêmes mesures directes de masse érodée, pour le même matériau à différents stades de son vieillissement (i.e. après différents nombres de cycles). Cela n'a pu être réalisé dans cette thèse. Seule une approche qualitative peut être adoptée concernant l'interprétation du signal de turbidité pour des contraintes au-delà d'un seuil d'environ 1 kPa.

Nous allons maintenant détailler les portions de courbes à interpréter.

II.4.2.7. Exemple type de l'interprétation d'un essai, des données brut à la loi d'érosion interprétée

A partir des données enregistrées au cours de l'essai, les valeurs de la contrainte de cisaillement τ et le taux d'érosion ϵ sont calculés. Seuls les couples (τ ; ϵ) correspondants à la phase où la charge ΔP est constante tandis que le débit augmente sont utilisés pour définir la régression linéaire donnant la loi d'érosion (Figure II.21). Les phases pendant lesquelles les pertes de charge ΔP sont croissantes et décroissantes ne sont pas prise en compte.

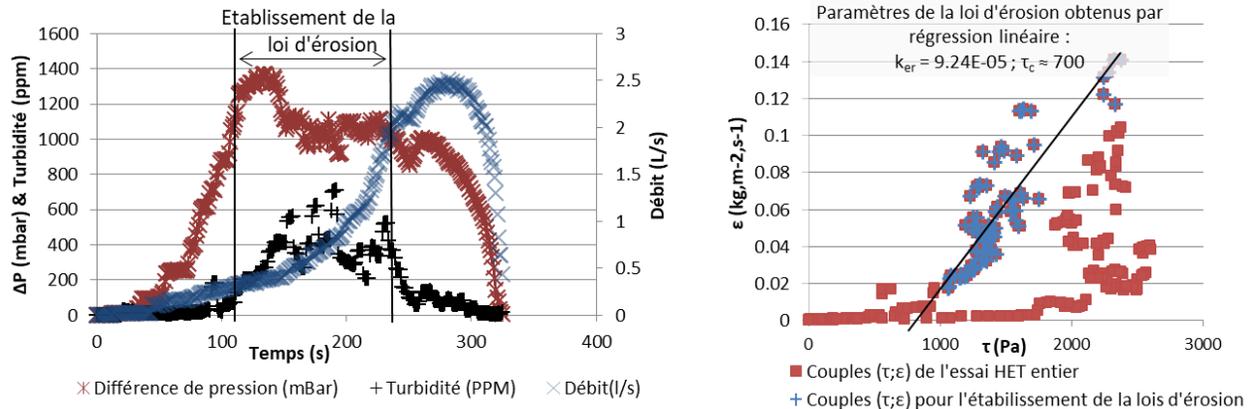


Figure II.21 : Exemple des données acquises au cours d'un essai HET sur un échantillon TW2% d98 après 12 cycles, et définition de l'intervalle sur lequel sont définies les lois d'érosion.

Dans certain cas, un très fort signal de turbidité apparaît dès le début de l'essai. Ce phénomène se produit même en l'absence d'échantillon de sol dans le circuit. Il serait dû à la présence de bulles d'air piégées dans le circuit, qui, mises en agitation quand le débit augmente au début de l'essai, génèrent une turbidité importante (Figure II.22). Cette turbidité chute après environ 30 secondes, une fois tout l'air éliminé. Ce signal parasite n'est pas pris en compte dans le calcul de l'évolution du rayon.

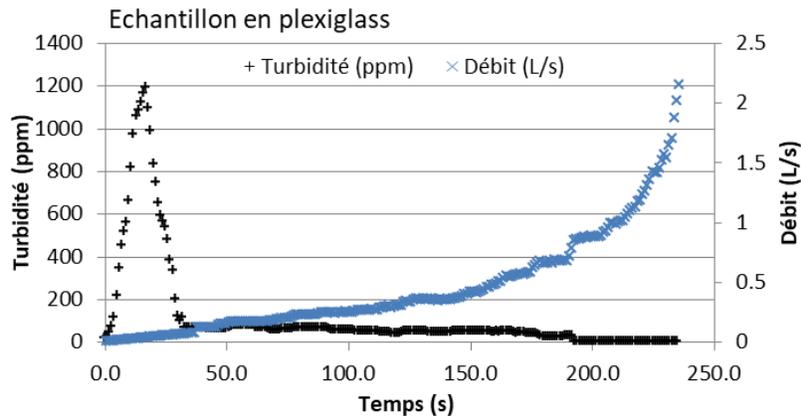


Figure II.22 : Signal de turbidité lors d'un essai sur un échantillon en plexiglass donc non érodable. La turbidité initiale ne traduit pas l'érosion.

II.4.3. Caractérisation de l'érosion externe par l'essai d'érosion à jet mobile (MoJET)

La résistance à l'érosion externe est caractérisée par l'essai d'érosion à jet mobile (MoJET) (Chevalier et al. 2012; Haghghi 2013). Contrairement à l'essai HET, la direction des jets est perpendiculaire au matériau, pour reproduire des sollicitations de types pluie ou vague frontale. L'eau et les effluents sont collectés pour connaître la quantité de matière érodée au cours du temps. Cet appareil a la particularité de pouvoir être utilisé aussi bien au laboratoire que sur un ouvrage in situ ce qui constitue un bon essai en vue d'une comparaison ultérieure de l'érosion du matériau fabriqué au laboratoire avec celui de l'ouvrage Digue2020 (in situ, non remanié).

II.4.3.1. Appareillage

Le MOJET (Figure II.23) est constitué d'un circuit hydraulique (réservoir d'eau, pompe et tuyaux) se terminant par 6 buses de 0,5 mm de diamètre fixé sur un axe rotatif mis en mouvement par un moteur à une vitesse de 5 tours/min. Le diamètre de la chambre d'érosion est de 15,2 cm, soit les dimensions des moules CBR (ASTM D698 2007e1). A la sortie de la chambre d'érosion, un bec collecteur permet l'évacuation des effluents. Au laboratoire, l'appareil est utilisé sur une pente inclinée à 10° de l'horizontale pour faciliter l'évacuation des effluents.

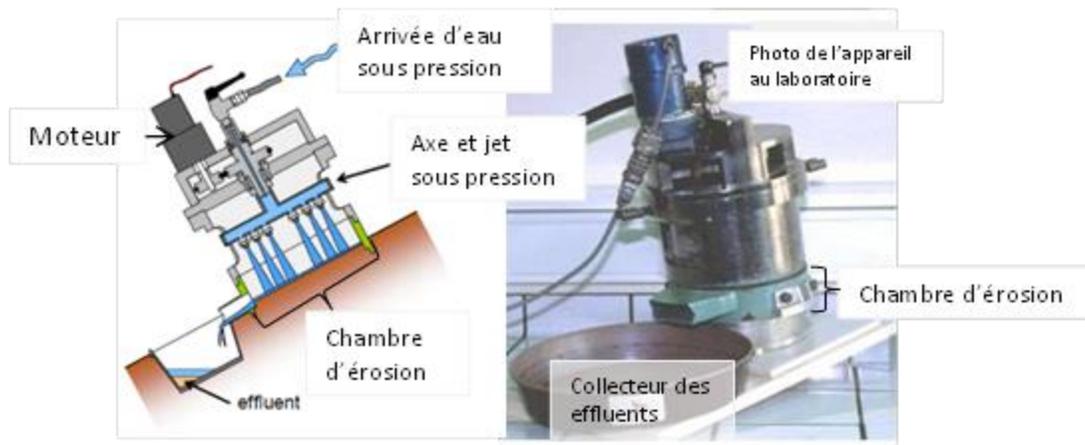


Figure II.23 : Schéma et photographie du module d'érosion du MOJET. En amont de cette partie se trouvent le réservoir d'eau et la pompe qui permet de contrôler le débit lors d'un essai (modifié d'après Haghghi, (2012)).

II.4.3.2. Mode opératoire

Le sol est compacté statiquement dans un moule CBR. La hauteur de l'échantillon compacté est de 3,5 cm. La chambre d'érosion est posée par-dessus le moule, et un bac préalablement taré est placé en sortie pour collecter les effluents. L'essai est alors lancé selon les paramètres suivants :

- débit 0.6 L/min soit une vitesse en sortie de chaque buse d'environ 8.5 m/s (soit une pression exercée par chaque buse de 11 kPa)

- durée totale de l'essai 12 minutes
- collecte séparée des effluents toutes les minutes pendant deux minutes puis toutes les deux minutes jusqu'à la fin de l'essai

A la fin de l'essai, les bacs contenant les effluents sont pesés pour contrôler le débit réel, puis mis à l'étuve à 110°C pour obtenir la masse sèche de sol érodé. Une inspection visuelle en fin d'essai est également réalisée pour repérer les éventuelles hétérogénéités dans la géométrie et la profondeur des sillons (Figure II.24).



Figure II.24 : Exemple d'un échantillon avant (à gauche) et après l'essai (à droite).

II.4.3.3. Interprétation des données

L'érodabilité du matériau est caractérisée par la masse sèche érodée au cours du temps, et par le taux d'érosion moyen (Figure II.25). Le taux d'érosion moyen est la masse de sol érodé sur un intervalle divisé par la durée de cet intervalle. A titre d'exemple, la Figure II.25 présente un résultat typique interprété. On note que le taux d'érosion est maximal au début de l'essai puis décroît. À mesure que les sillons se creusent l'énergie du jet est divisée par la surface totale du sillon, donc l'énergie reçue par surface de sol décroît.

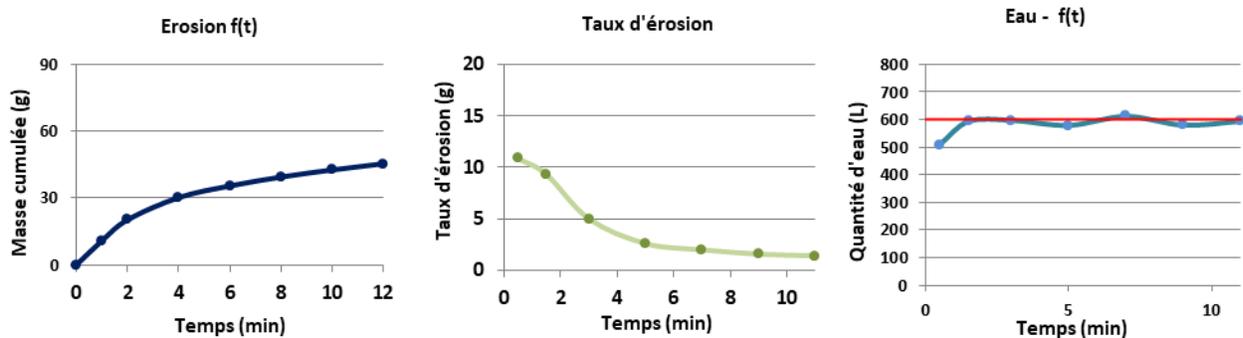


Figure II.25 : Exemple des résultats issus d'un essai MOJET. Le graphique de gauche permet de vérifier que le débit est bien constant au cours de l'essai.

II.4.3.4. Matériaux concernés par les essais MOJET

Pour s'adapter à la géométrie de l'érodimètre, la géométrie des échantillons et le mode de compactage sont différents des échantillons fabriqués pour tous les autres essais (HET, Rc, résistivité...). Dans le cas des échantillons destinés aux essais d'érosion externe, la nomenclature décrite dans la présentation de l'étude paramétrique (paragraphe II.1) n'est pas utilisée. Les essais de caractérisation de la sensibilité à l'érosion externe sont focalisés sur le matériau traité à 2% de chaux avec ou sans ajout d'eau de mer. La masse volumique sèche des échantillons est de $1.57 \pm 4.10^{-2} \text{ g.cm}^{-3}$. Les échantillons seront nommés par une périphrase comme dans la Figure II.26.

Les essais sont menés pour caractériser le matériau à différents temps de cure et nombres de cycles hydriques subits. La figure présente les différents cas testés. Pour chaque cas deux essais sont réalisés.

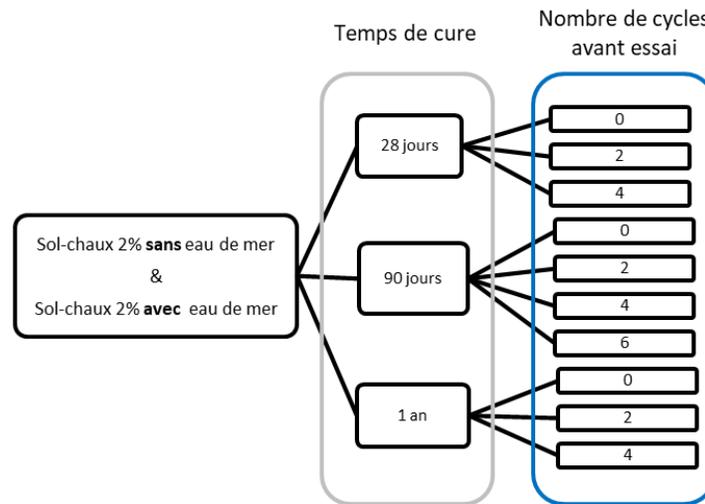


Figure II.26 : Caractéristique concernant le de temps de cure et le de nombre de cycles hydriques imposés aux échantillons soumis à l'essai MOJET. Ce graphique est valable uniquement pour les essais MoJET.

II.4.4. Détermination de la porosité totale et la répartition de la taille des pores par la mesure de porosimétrie au mercure.

II.4.4.1. Principe physique

La porosimétrie au mercure permet de renseigner la porosité totale d'un matériau et la distribution du volume envahie par le mercure en fonction du diamètre d'entrée des pores. Cette technique s'appuie sur la loi de Laplace (1806) qui donne pour un capillaire cylindrique plongé dans un fluide la relation entre la pression capillaire, la courbure du ménisque et la tension de l'interface liquide-gaz (équation II.22).

Equilibre des pressions capillaires

$$P_c = P_0 - P_l \quad (\text{II. 21})$$

Equation de Laplace (II.22)

$$P_c = \frac{2\gamma}{R}$$

Équation de Laplace exprimée en fonction du rayon capillaire (loi de

Jurin) (II.23)

$$P_c = \frac{2\gamma}{r} \cos \alpha$$

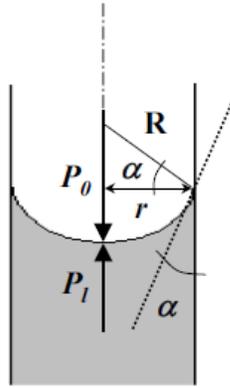


Figure II.27: géométrie d'un ménisque dans un capillaire de rayon r

Avec :

P_c la pression capillaire (Pa)

P_0 la pression de gaz (Pa)

P_l la pression de liquide (Pa)

R le rayon de courbure du ménisque (m)

r le rayon du capillaire (m)

α l'angle de contact liquide/solide (°)

γ la tension interfaciale liquide-gaz ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)

Dans le cas de l'injection de mercure on peut écrire :

$$P_c = P_{Hg} - P_{vap} \quad (\text{II.24})$$

Au cours d'un essai de porosimétrie, la pression de vapeur du mercure P_{vap} est très inférieure à sa pression de vapeur saturante c'est pourquoi P_{vap} peut être négligée devant la pression de mercure liquide P_{Hg} appliqué. Par conséquent on a :

$$P_c = P_{Hg} \quad (\text{II.25})$$

La valeur du rayon d'accès aux pores est donc associée aux valeurs de pression appliquée :

$$r = \frac{2\gamma}{P_{Hg}} \cos \alpha \quad (\text{II.26})$$

La pression de mercure à appliquer pour atteindre les pores est donc d'autant plus grande que leur rayon d'accès est petit.

II.4.4.2. Appareillage et conditions expérimentales

L'appareil de marque Micromeritics de l'Ifsttar est équipé de deux postes de mesure basse pression ($0.01\text{kPa} < P_{hg} < 100\text{kPa}$) et un poste de mesure haute pression ($100\text{ kPa} < P_{hg} < 400\text{ MPa}$) permettant d'accéder aux pores de rayon compris entre 3nm et $400\mu\text{m}$.

Lors de l'essai de porosimétrie au mercure la perméabilité du milieu ne doit pas être prise en compte. La mesure de la pression de mercure et du volume injecté doit être faite à l'équilibre. Pour respecter cela,

la durée d'un palier de pression doit être d'autant plus grande que le volume à injecter est grand (Pellerin, 1980). En s'appuyant sur les études de porosimétrie au mercure sur des sols traités au ciment (Ho et al., 2018) et en prenant l'hypothèse d'une répartition de volume des pores similaires dans le cas du sol traité à la chaux, les durées des paliers choisis sont les suivants : 10 secondes en basse pression ; 30 secondes en haute pression.

Lors d'un essai l'échantillon doit être parfaitement sec sinon la pression capillaire n'est plus égale à la pression appliquée et est influencée par la pression d'eau résiduel (Loi de Mariotte). C'est pourquoi avant un essai, les échantillons de sol traité à la chaux sont trempés dans l'azote liquide pour stopper toutes réactions dans le sol puis sont lyophilisés pour extraire par sublimation toute l'eau présente dans l'échantillon sans modifier la microstructure du matériau.

II.4.4.3. Interprétation de la courbe d'injection du mercure

L'interprétation des courbes de pression de mercure consiste à assimiler le milieu poreux à un ensemble de tubes capillaires cylindriques. La loi de Jurin (II.23) donne alors le diamètre d'entrée des différents pores et le volume injecté pour chacun des diamètres nous donne le volume des pores. La courbe du logarithme du diamètre des pores en fonction du volume cumulé de mercure introduit fait apparaître les différentes familles de pores du matériau et leurs volumes relatifs par rapport au volume total poreux (Figure II.28).

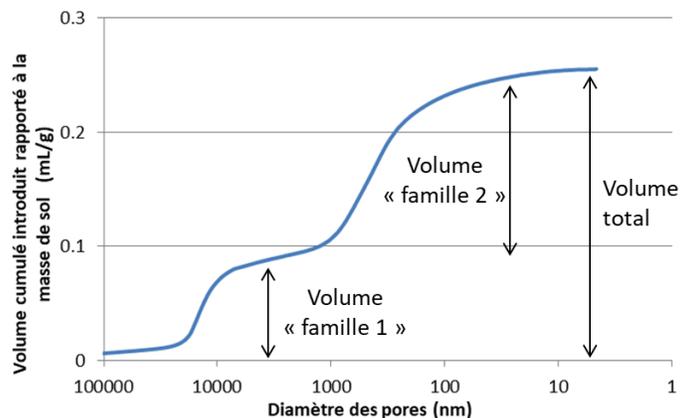


Figure II.28 : Résultat typique d'un essai de porosimétrie au mercure sur un sol traité à la chaux (1)

La dérivée de cette courbe fait apparaître plus clairement les diamètres des pores des différentes familles (Figure II.29).

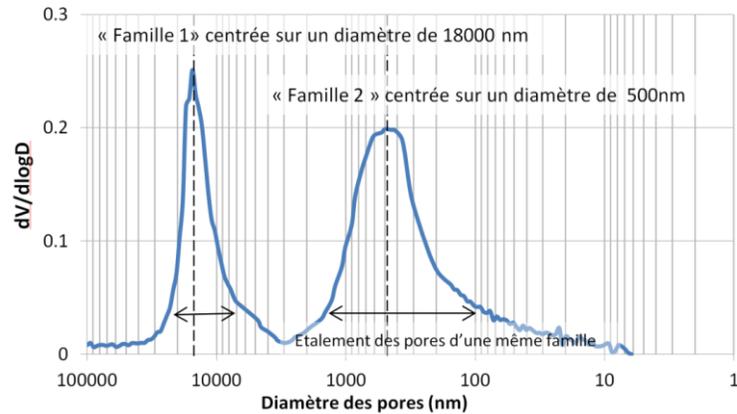


Figure II.29 : Résultat typique d'un essai de porosimétrie au mercure sur un sol traité à la chaux (2)

La porosité totale est donnée par le volume massique total (mL/g) injecté dans l'échantillon multiplié par la densité sèche de l'échantillon.

II.4.4.4. Répétabilité de la mesure et incertitude associée

Lors de la réalisation des essais, nous avons constaté une anomalie de mesure de l'appareil *Micrométrics*, lors du passage entre le régime de basse et de haute pression, aboutissant à des volumes totaux de mercure introduit différents lors de deux ou trois essais sur un même échantillon (Figure II.30 et Figure II.31). Ni le constructeur, ni les utilisateurs n'ont su corriger ce problème instrumental. Cette anomalie entraîne une incertitude de ± 1 point sur la valeur de porosité en pourcent, ce qui très significatif au vu des variations de porosité mesurées entre les différents échantillons à différents états de vieillissement (partie III.4). Ces incertitudes n'ont pas permis d'avoir une confiance suffisante dans les données pour les utiliser pour modéliser la perméabilité des matériaux. En revanche, ce problème instrumental n'a pas de répercussion sur l'évaluation de la répartition du diamètre des pores.

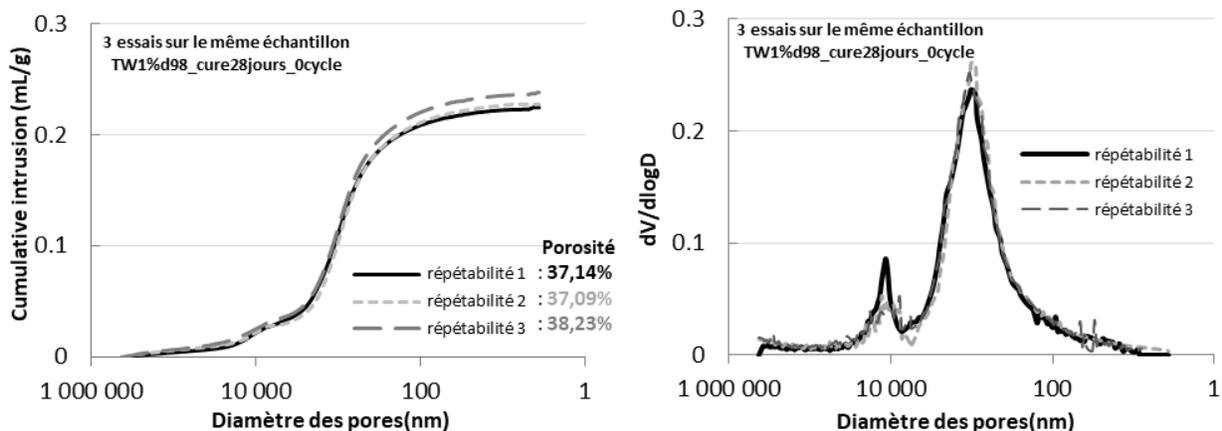


Figure II.30 : Essai de répétabilité sur un même échantillon de sol traité à 1% de chaux. A droite, les courbes du volume cumulé de mercure introduit dans l'échantillon à chaque essai et la valeur de porosité associée. A gauche les courbes donnant la répartition des tailles de pore dans le matériau.

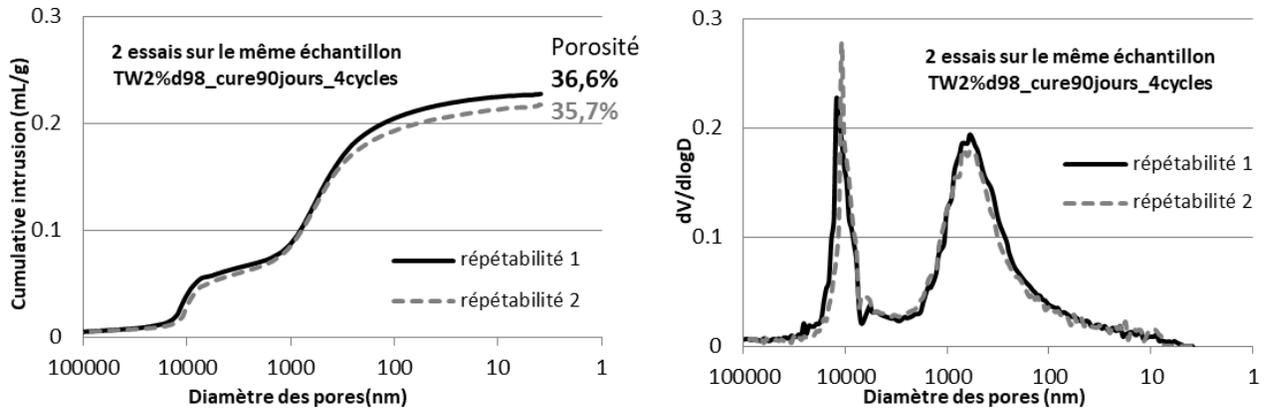


Figure II.31 : Essai de répétabilité sur un même échantillon de sol traité à 2% de chaux. A droite, les courbes du volume cumulé de mercure introduit dans l'échantillon à chaque essai et la valeur de porosité associée. A gauche les courbes donnant la répartition des tailles de pore dans le matériau.

II.4.5. Caractérisation de la résistivité électrique des matériaux

Les mesures de résistivité électrique sont menées sur un matériau traité à la chaux pour suivre la cinétique de l'activité pouzzolanique. Les mesures de résistivité électrique sont également exploitées pour suivre les variations des paramètres d'état du sol liées au vieillissement ou à l'endommagement du matériau donc liées à la variation des conditions environnementales, en particulier la pénétration répétée d'eau de mer dans le matériau.

Le caractère non destructif de la mesure permet de suivre un même échantillon tout au long de la cure et du vieillissement accéléré par cycles hydriques.

II.4.5.1. Principe physique

Le principe général est celui de la prospection électrique à courant continu tel que mis en œuvre en géophysique de subsurface (Jodry, 2016). Pour les mesures au laboratoire sur un échantillon de sol compacté, le principe est le même. On impose le passage d'un courant électrique continu d'intensité connue (I) à travers l'échantillon au moyen de deux électrodes et on mesure la différence de potentiel électrique (V) entre deux autres électrodes en contact avec l'échantillon. Notons que les équations fondamentales de ce problème de diffusion électrique, l'amplitude de la réponse électrique V varie linéairement avec l'intensité de la source (Fargier, 2011). En multipliant le rapport U/I par un facteur géométrique propre à la géométrie de l'échantillon et à la position des électrodes, on obtient une quantité appelée résistivité apparente. En prenant l'hypothèse d'un milieu homogène et isotrope, la résistivité apparente mesurée est alors égale à la résistivité effective du milieu.

II.4.5.2. Appareillage

II.4.5.2.1. Cellule de résistivité

Une cellule dédiée à la mesure de la résistivité des éprouvettes des sols traités à la chaux a été adaptée sur le modèle de celle développée par Du Plooy et al., (2013). Notre cellule est constituée de 6 électrodes annulaires encastrées dans deux demi porte-électrodes, et espacées entre elles de 2 cm (Figure II.32). Deux disques métalliques lacés aux extrémités de la cellule jouent le rôle d'électrodes d'injection, et les deux demi porte-électrodes viennent se plaquer contre l'éprouvette. Les demi-anneaux à même hauteur sur les deux portes électrodes sont électriquement reliés si bien qu'ils peuvent être considérés comme une unique électrode même si la cellule n'est pas entièrement fermée. Le nombre et la répartition des électrodes le long de l'axe d'élançement de l'éprouvette permettent de juger de l'homogénéité du matériau selon cet axe. En effet, chaque mesure de résistivité apparente est réalisée en injectant un courant continu entre les disques et en mesurant une différence de potentiel entre une paire d'anneaux. D'après Du Plooy et al. (2013), une telle mesure est essentiellement représentative de la résistivité électrique de la couche de matériau contenue entre les deux anneaux utilisés pour cette mesure. Ainsi, en balayant les différentes paires d'anneaux, on a accès à la variabilité de la résistivité (effective) du matériau sur la hauteur de l'échantillon, ainsi qu'à sa résistivité moyenne sur toute la hauteur.

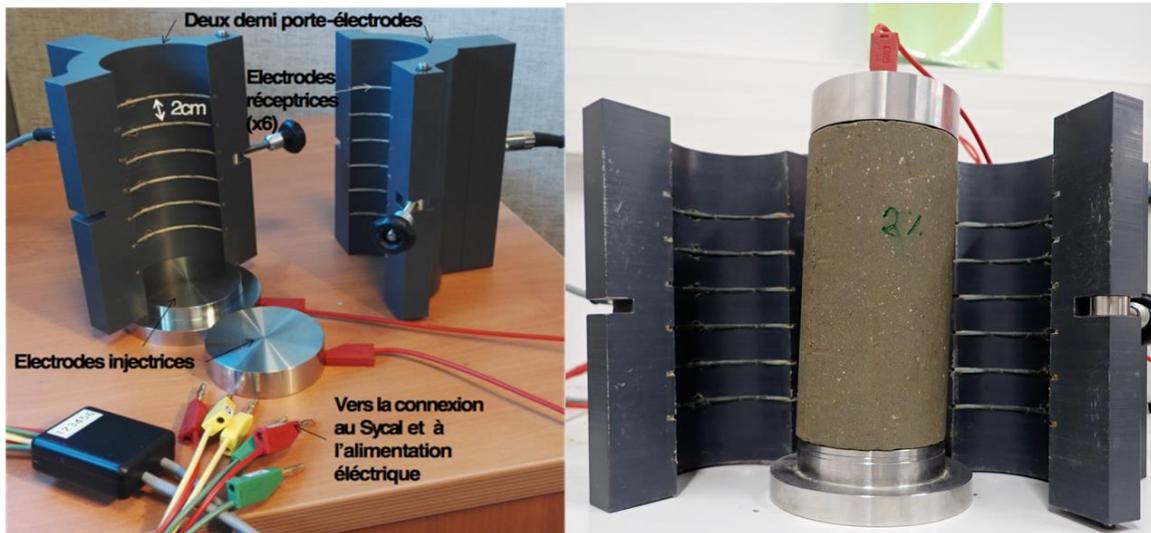


Figure II.32 : Présentation de la cellule de résistivité.

II.4.5.2.2. Le résistivimètre

Un resistivimètre Syscal Pro « Deep Marine », conçu et commercialisé par Iris Instruments, a fait l'objet d'un prêt de la part de cette même entreprise pour une durée de 1 an et demi. Ce type d'appareil permet de faire des mesures multivoies, c'est-à-dire entre plusieurs paires d'électrodes réceptrices à la

fois pour une seule injection de courant. L'appareil a été modifié spécialement pour réaliser des mesures au laboratoire avec des intensités de courant de l'ordre de quelques milliampères. L'intensité du courant injecté dans l'éprouvette doit être suffisamment faible pour ne pas modifier les équilibres chimiques dans le matériau (sans quoi le matériau serait perturbé et la mesure faussée). L'ampérage maximal supporté par l'appareil modifié est de 55 mA. Le courant d'injection est alimenté par une pile de 4,5V. Dans les cas exceptionnels où le matériau a une résistivité tellement faible qu'une tension de 4,5V génère une intensité plus grande que 55 mA, un générateur de courant continu dont le voltage est réglable est utilisé.

II.4.5.3. Mode opératoire

L'ensemble des branchements est réalisé comme indiqué Figure II.33. Les électrodes de réception sont branchées sur 6 voies par paires successives de sorte à mesurer la résistivité des cinq sous-volumes cylindriques d'un échantillon comme schématisé Figure II.33. L'éprouvette est introduite dans la cellule et l'essai est lancé avec les paramètres suivants :

- Signal électrique délivré de type « signal carré », avec une alternance de polarité (NB : il s'agit donc, au sens strict, d'un courant alternatif, mais de fréquence suffisamment basse pour qu'on puisse le considérer comme continu) ;
- Injection du courant et mesure durant 1 seconde (temps suffisamment long pour s'assurer de la stationnarité du courant, et suffisamment court pour ne pas risquer de modifier le matériau) ;
- Configuration de type « Dipôle-Dipôle » sur les 6 anneaux de réception ;
- Par défaut l'appareil réalise 4 fois de suite chaque mesure et les moyenne (« stacks ») ; nous imposons entre 4 et 10 *stacks* supplémentaires pour nous assurer d'une meilleure qualité de mesure. Si après 4+4 mesures (*stacks*) la dispersion des valeurs (i.e. le coefficient de variation Q) est inférieure à 1% alors la mesure est considérée comme bonne et aucun *stack* n'est ajouté. Sinon des mesures supplémentaires sont réalisées jusqu'à ce que le coefficient de variation soit inférieur à 1% ou que l'on arrive au bout des 10 *stacks* supplémentaires. Dans ce dernier cas, nous choisissons de ne pas retenir ces valeurs, l'échantillon est ressorti de la cellule puis placé à nouveau et la mesure est relancée.

A la fin de l'essai, les valeurs mesurées ainsi que les paramètres de l'essai s'enregistrent voie par voie, chaque voie correspondant à une paire d'électrodes annulaires.

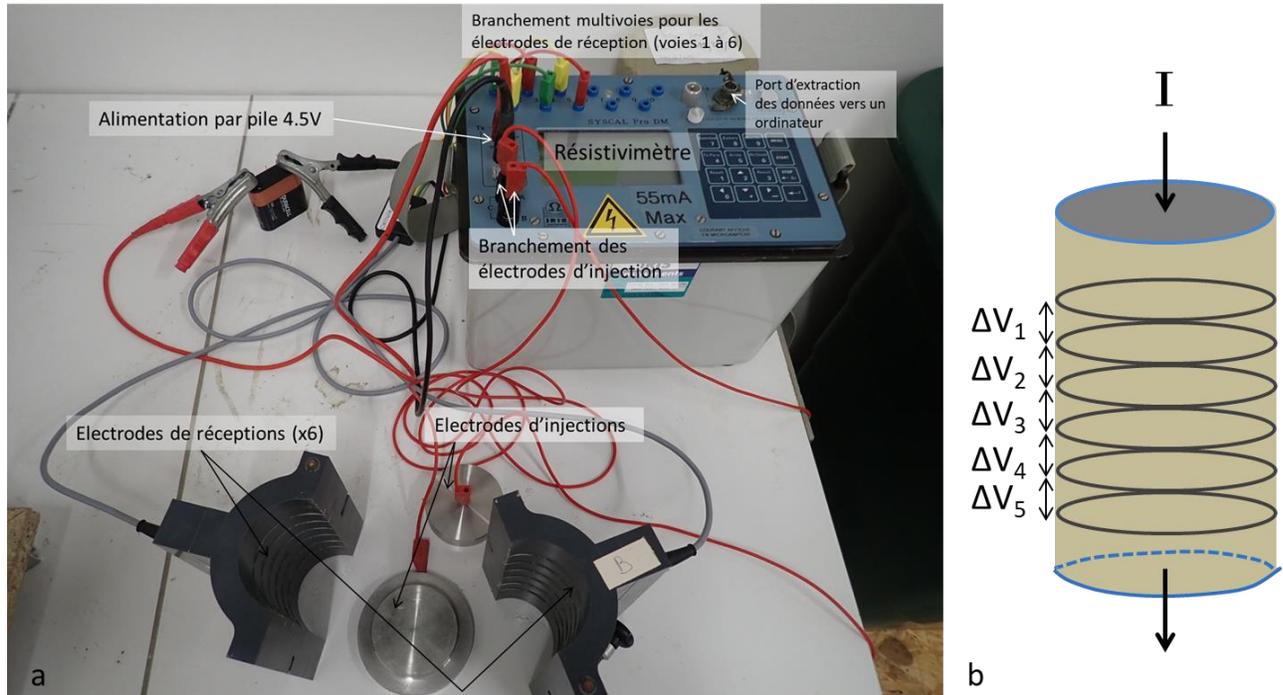


Figure II.33 : a) Branchement des différents éléments du dispositif de mesure de la résistivité électrique du matériau; b) Schéma des différents volumes investigués par les 5 paires successives d'électrodes annulaires de réceptions.

II.4.5.4. Calcul et analyse des résistivités

II.4.5.4.1. Calcul de la résistivité

Pour chaque volume i investigué (i entre 1 et 5), la résistivité ρ_i est calculée (II.27)

$$\rho_i = \frac{\Delta V_i}{I} G \quad (\text{II.27})$$

avec : ΔV_i la différence de potentiel entre les électrodes de réception de l'intervalle i ; I l'intensité du courant injecté, identique pour tous les sous-volumes i de l'échantillon pour une même mesure ; et G le facteur géométrique, identique pour tous les intervalles car tous de même géométrie et de même volume.

Dans le cas d'un cylindre de rayon r et de hauteur h (Du Plooy et al., 2013) : $G = \frac{\pi r^2}{h}$ (II.28)

Dans notre cas le rayon est constant et égal à 3,5 cm et la distance h entre les électrodes deux à deux est de 2 cm. Par conséquent le facteur géométrique est constant et égal à 19,2 cm pour toutes les mesures réalisées entre les paires d'électrodes voisines.

Comme indiqué précédemment, on supposera que la résistivité apparente ainsi obtenue pour chaque paire d'électrodes annulaires donne une bonne estimation de la résistivité effective du volume de matériau compris entre ces deux électrodes. Cela devient cependant de moins en moins vrai lorsque le matériau est sollicité par les cycles.

II.4.5.4.2. Analyse comparative des valeurs de résistivité mesurées

Pour chaque acquisition la moyenne des résistivités des cinq sous-volumes est calculée.

Pour les acquisitions qui sont faites au cours de la cure des échantillons, c'est cette valeur moyenne qui est comparée entre les différentes éprouvettes à différents temps de cure et pour différentes formulations du matériau initial.

Pour les acquisitions réalisées au cours des cycles de sollicitations hydriques :

- pour un même échantillon, les résistivités des 5 sous-volumes sont comparées à chaque cycle ;
- pour comparer les échantillons entre eux, on compare la résistivité moyenne des échantillons à chaque cycle.

II.4.5.5. Fréquence des mesures

Certains échantillons sont suivis au cours de leur cure (à température et teneur en eau des échantillons constants) dans le but de quantifier les variations de résistivité des matériaux liées au développement des composés cimentaires. Durant la cure, les échantillons sont emballés dans un film plastique et enfermés dans un sachet hermétique pour les isoler du milieu extérieur et empêcher leur séchage. On notera cependant que le protocole de mesure nécessite de sortir quelques instants les éprouvettes de leur environnement de cure, ce qui génère la perte de 0,4 % de la teneur en eau des échantillons entre la fabrication et 90 jours de cure, et de 1 % entre la fabrication et un an de cure. Cette modification de la teneur en eau est à prendre en compte dans l'interprétation des valeurs de résistivité des matériaux au cours de la cure.

Fréquence des mesures pendant la cure :

- pour chaque composition : 2 à 4 échantillons sont suivis entre 7 et 90 jours avec des mesures toutes les 1 à 2 semaines
- pour chaque composition : 2 à 3 échantillons sont suivis entre 7 jours et 1 an avec des mesures toutes les 1 à 2 semaines
- un échantillon de type TW2% $\text{d}98$ et un échantillon de type TW1% $\text{d}98$ sont suivis de 1 heure après leur fabrication et jusqu'à 7 jours, toutes les 2 heures pendant les 7 premières heures, puis 1 fois par 24h.

Au cours des cycles hydriques déclenchés après 90 jours et 1 an de cure, les mesures de résistivité sont réalisées aux extremums de teneur en eau de chaque cycle, jusqu'à 12 cycles pour les échantillons concernés. L'objectif est de caractériser l'effet répété des cycles à l'eau de mer sur la résistivité et de l'interpréter au regard de la modification des paramètres d'état du matériau. Chaque mesure est réalisée sur 2 à 3 échantillons dans le même état (composition et nombre de cycles subis).

II.4.5.6. Qualité des données

II.4.5.6.1. Vérification de la linéarité entre réponses électriques et intensité de la source de courant

Comme nous l'avons vu au paragraphe II.4.5.1, l'amplitude d'une réponse électrique donnée (différence de potentiel V) doit varier linéairement avec l'intensité I du courant injecté. Il s'agit ici de vérifier que c'est bien le cas en pratique, c'est-à-dire que cette linéarité est bien vérifiée dans la gamme d'intensités, typiquement entre 0,01 et 50 mA, que nous pouvons générer avec le résistivimètre utilisé. Celui-ci ne permet pas de contrôler directement l'intensité I injectée dans l'échantillon, celle-ci dépend de la tension U imposée par le générateur (par ex. pile de 4,5 V) entre les deux électrodes d'injection (disques) et des résistances de contact entre les disques d'injection et le matériau. L'intensité injectée peut donc varier suivant les conditions. En revanche cela ne doit pas changer les résistances de transfert mesurées entre chaque paire d'électrodes de réception, c'est-à-dire que pour chaque paire d'électrodes annulaires mesurant une différence de potentiel V_i , le rapport V_i/I ne doit pas dépendre de l'intensité I . C'est ce que nous cherchons à vérifier.

Pour deux matériaux traités à la chaux (avec ou sans sel), le rapport V/I est mesuré pour différentes intensités (Figure II.34). Les mesures de V sont faites entre les deux électrodes annulaires les plus éloignées (distance les électrodes : 10 cm). Comme on le voit sur le graphe de cette figure, la résistance de transfert V/I peut être considérée comme constante pour des intensités de courant injecté supérieures à 0,01 mA. On prendra donc 0,01 mA comme intensité minimale acceptable pour réaliser une mesure. C'est également cette valeur qui est préconisée par le constructeur comme intensité minimale en deçà de laquelle la qualité des mesures n'est pas assurée.

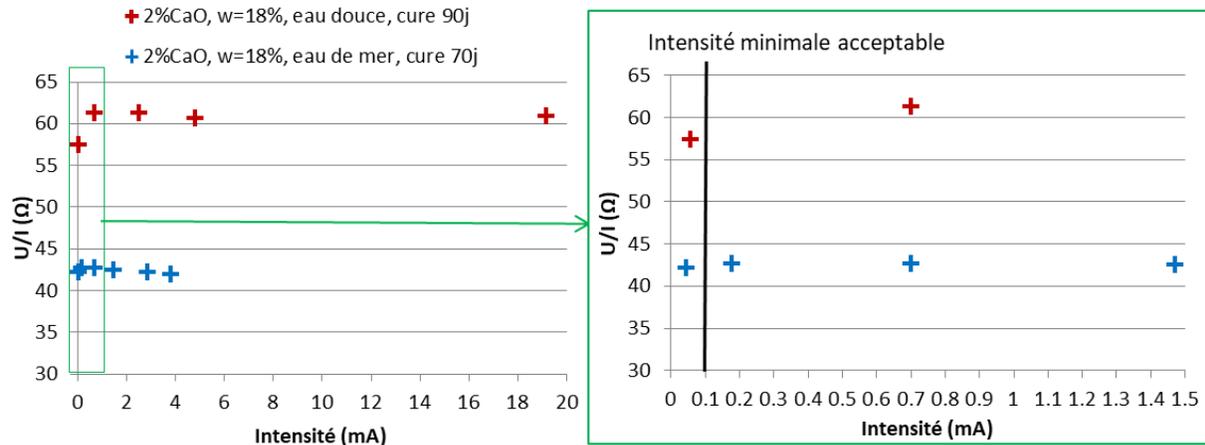


Figure II.34: Variation du rapport U/I en fonction de l'intensité traversant les échantillons.

II.4.5.6.2. Répétabilité et répétitivité des mesures

La répétabilité est le fait de multiplier l'acquisition d'une même mesure, par le même appareil, sans déplacer ou modifier l'objet de la mesure. La qualité de la répétabilité dépend de l'appareil de mesure. Des tests de répétabilité sont menés en déclenchant les mesures par le résistivimètre les unes après les autres sans sortir l'éprouvette de la cellule de résistivité.

La reproductibilité est la qualité d'une mesure qui donne le même résultat si on la répète dans des conditions identiques et dans un court intervalle de temps. La reproductibilité dépend du protocole de mesure. Des tests de reproductibilité du protocole sont réalisés en multipliant la mesure sur une même éprouvette. Entre chaque mesure l'éprouvette est extraite de la cellule puis replacée à l'intérieur pour la mesure suivante. Ces tests sont réalisés sur des éprouvettes de différentes compositions et à différents temps de cure.

Les résultats de ces tests sont présentés Tableau II.10.

Le calcul de l'écart-type entre les mesures de répétabilité donne une valeur au-dessous de laquelle la variation de valeur de résistivité entre deux éprouvettes n'est pas significative et ne peut amener à conclure d'une différence entre les deux éprouvettes.

La répétabilité des mesures de l'appareil Syscal Pro est très bonne, avec au maximum un coefficient de variation de 0,1%. On remarque que les écarts-types augmentent légèrement lorsqu'on augmente le nombre d'acquisitions successives. Nous supposons que cela est lié au chargement de l'éprouvette lors d'acquisitions répétées sur un très court intervalle de temps (environ 10 secondes entre chaque acquisition). Pour éviter cela, et parce qu'on s'est assuré de la bonne répétitivité de l'appareil, chacune des acquisitions est faite une seule fois.

La reproductibilité de l'essai est très acceptable avec au plus un coefficient de variation de 2,1%. Cette variabilité peut s'expliquer par la variation des résistances de contact entre les électrodes réceptrices et le matériau, ou par un endommagement superficiel des éprouvettes au contact répété des électrodes réceptrices qui modifierait légèrement les mesures. Par la suite, nous considérerons que la différence de résistivité entre différents échantillons est significative si le coefficient de variation entre ces mesures est supérieur à 2%.

Tableau II.10 : Synthèse des essais de répétabilité et de répétitivité. Les coefficients de variation (%) est le rapport de l'écart type sur la moyenne des mesures de résistivité sur un même échantillon.

Type d'échantillon (temps de cure)	Evaluation de la répétabilité de la mesure par le resistivimètre Syscal Pro : déclenchement successif de la mesure			Evaluation de la reproductibilité du protocole de mesure : entre chaque mesure l'éprouvette testée est retirée puis réintroduite dans la cellule d'électrodes		
	Nombre de mesures	Ecart type (Ohm.m)	Coefficient de variation	Nombre de mesures	Ecart type (Ohm.m)	Coefficient de variation
TW2%d98 (1 jour)	6	0,0009	0,05 %	6	0,0414	2,1 %
TW2%d98 (7 jours)	4	0,00037	0,02 %	4	0,013	0,6 %
TW1%d98 (7 jours)	4	0,00012	0,007 %	4	0,040	2,1 %
TW2% d98 (90 jours)	7	0,0068	0,03 %			
SW2%d98 (90 jours)	4	0,00054	0,1 %	4	0,008	1,4 %
TW2%d95 (90 jours)	2	0,0023	0,07 %			
TWe2%d98 (1 an)	10	0,0033	0,08 %	10	0,059	1,4 %
TWe2%d95 (1 an)	6	0,0036	0,1 %	5	0,068	1,9 %
Sol naturel (1 an)	11	0,0032	0,09 %	7	0,036	1,0 %

II.4.6. Caractérisation de la vitesse des ondes sismiques dans le matériau

II.4.6.1. Principe physique et intérêt de la mesure

Les ondes de compression (P) et de cisaillement (S) se propagent dans le solide à des vitesses dépendant notamment de l'élasticité du matériau. Le traitement d'un sol à la chaux entraîne la formation de composés cimentaires (ou composés pouzzolaniques) dans le sol qui augmentent la cohésion des grains entre eux et modifient donc les propriétés élastiques du matériau. Les vitesses des ondes sont donc sensible à la présence de composés pouzzolaniques et à leur quantité. Nous cherchons donc à utiliser les vitesses des ondes P et S comme des indicateurs du développement des réactions pouzzolaniques et de la dégradation supposée des composés cimentaires lors des cycles hydriques à l'eau de mer. Connaissant la densité de nos matériaux les vitesses sismiques nous permettent de déterminer des modules élastiques et de cisaillement du matériau dans ces différents états de dégradation (Benmeddour et al. 2012; Yesiller et al. 2001). A l'image des mesures de résistivité électrique, ces mesures de vitesse sont non destructives pour les échantillons, elles peuvent être répétées un grand nombre de fois sur un même échantillon à différents temps de cure et cycles de sollicitation hydrique.

II.4.6.2. Appareillage

Le dispositif de mesure est constitué par (Figure II.35) :

- un générateur de courant haute fréquence ;
- un couple de sondes piézo-électriques pour l'émission (une sonde) et la réception (une sonde) des ondes P émises à une fréquence de 100 kHz ;
- un couple de sondes piézo-électriques pour l'émission (une sonde) et la réception (une sonde) des ondes S émises à une fréquence de 50 kHz ;
- un oscilloscope ;
- un support de maintien des sources et des échantillons pendant les mesures.

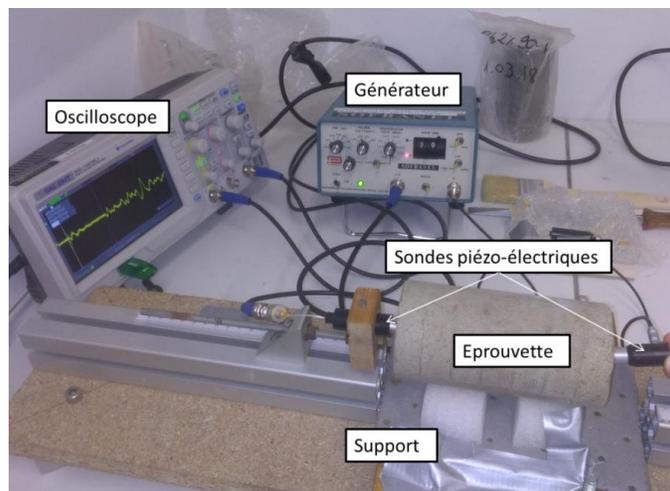


Figure II.35 : Dispositif de mesure des temps de propagation des ondes P et S dans les éprouvettes de sol traité à la chaux

II.4.6.3. Mode opératoire

Pour réaliser une mesure de vitesse, la longueur de l'échantillon est mesurée avant qu'il soit placé sur le support. Les sondes pour la mesure des ondes P sont plaquées au centre de chacune des faces puis le générateur et l'oscilloscope sont allumés. Le générateur envoie un courant électrique qui génère la vibration de la sonde d'émission, l'onde se propage dans l'échantillon et la vibration du capteur est transformée en signal électrique. Le générateur multiplie les signaux issus des sondes piézoélectriques par un gain en décibel. La valeur de ce gain est choisie par l'utilisateur, de sorte que l'amplitude du signal reçu soit suffisante pour lire avec précision le temps d'arrivée de l'onde P. L'oscilloscope permet d'additionner (*stack*) 256 fois le signal dans le but de réduire le bruit. Cela ne suffit pas à obtenir un oscillogramme faiblement bruité (Figure II.36). Le signal est enregistré 3 fois sur un support externe (clé USB), et les trois fichiers sont additionnés via un script sur en langage *Python*, ce qui nous donne un oscillogramme équivalant à 768 *stacks* (Figure II.37) (*voir justification paragraphe II.4.6.4*). A partir des fichiers enregistrés sur l'oscilloscope ce même script permet d'afficher l'oscillogramme dans une figure et d'y réaliser le pointé de la première arrivée de l'onde P. Rapporté à la longueur de l'échantillon on obtient la valeur de la vitesse des ondes P et le module d'élasticité E_0 (équation I.13).

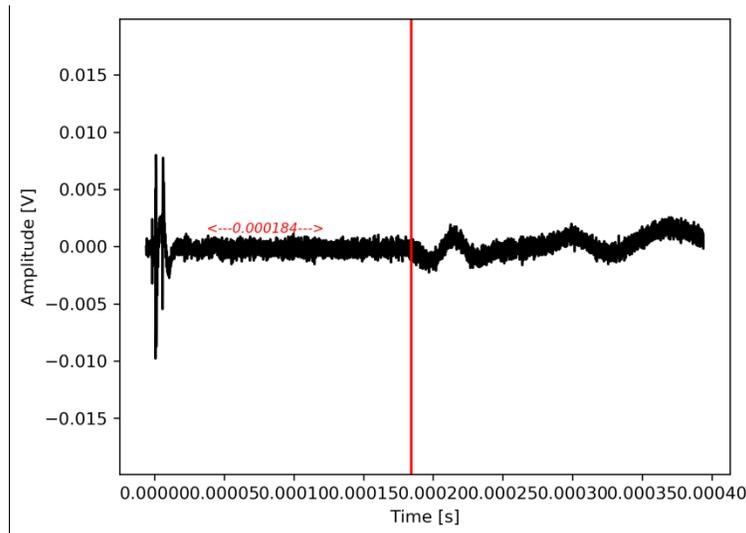


Figure II.36 : Exemple d'un signal acquis sur un échantillon type TW2% d98, pour les ondes P, après de 1 an de cure + 2 cycles hydriques. Ici le signal est stacké 256 fois

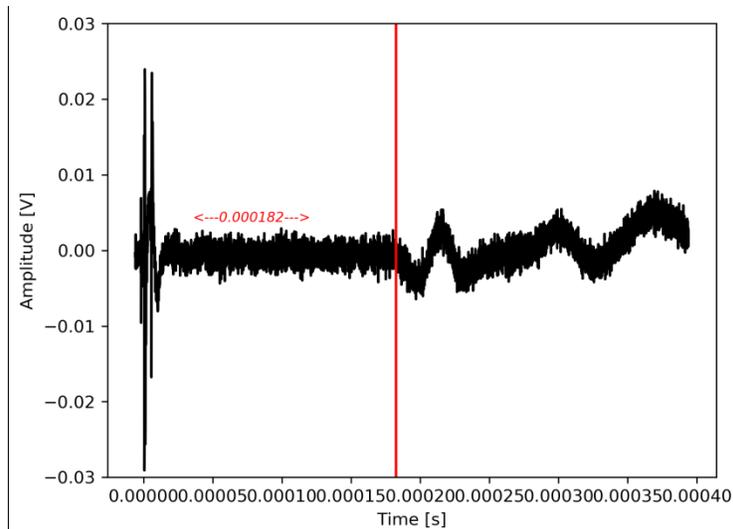


Figure II.37 : Même mesure que la figure précédente mais ici avec 3x256 stacks (ondes P)

Pour la mesure du temps de propagation des ondes S, les *sondes P* sont remplacées par les *sondes S*. Les ondes S sont plus lentes que les ondes P, et bien que les sondes soient conçues pour générer et recevoir spécifiquement des ondes S, il se peut qu'une partie des ondes S se convertissent en ondes P à l'interface échantillon-air, ce qui pourrait fausser le pointé de la première arrivée des ondes S. Pour lever cette incertitude, les mesures sont faites deux fois en inversant la polarité du récepteur par rapport à l'émetteur. Les ondes S ayant une propagation orientée perpendiculaire à la direction de propagation, changer l'orientation d'une des sondes de 180 degrés permet d'inverser la polarité du signal reçu (Figure II.38). En superposant les signaux issus des deux configurations de sondes, la première arrivée des ondes S correspond au temps pour lequel les deux oscillogrammes s'inversent. La fréquence du signal reçu doit également être contrôlée pour s'assurer que le temps d'arrivée pointé est bien celui des ondes S. Dans certains cas, lorsque le matériau est très sec la première inversion entre deux signaux de polarité différente correspond à l'arrivée des ondes deux fois converties (S-P-S) qui ont une fréquence plus élevée que la fréquence d'émission des ondes S. Il faut ignorer cette première arrivée et retenir le temps d'arrivée des ondes ayant la même fréquence que la source.

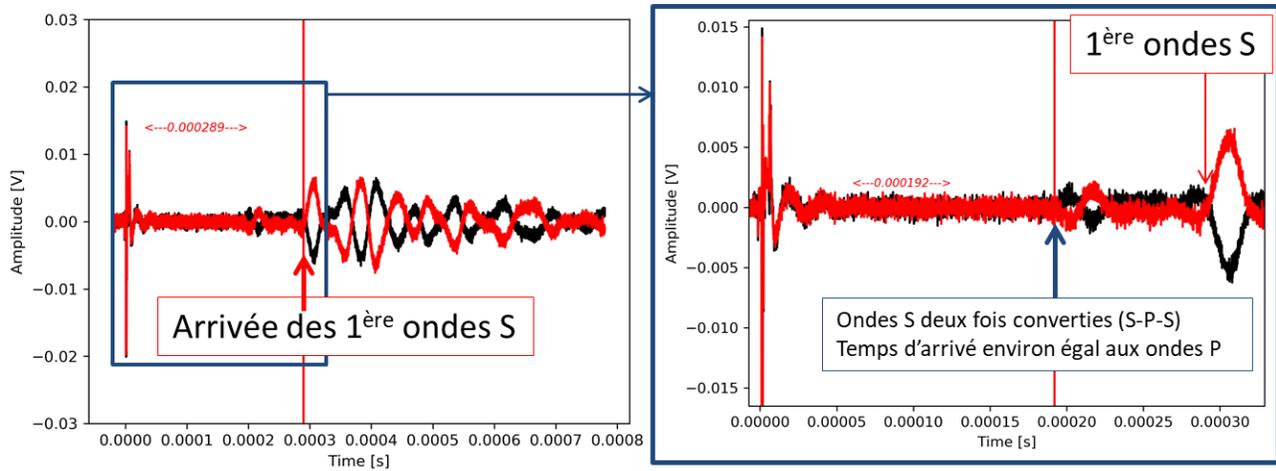


Figure II.38 : Exemple de superposition des oscillogrammes pour les ondes S avec une inversion de polarité entre les sources, et la détection d'ondes S deux fois converties.

II.4.6.4. Amélioration de la qualité de la mesure

Du fait du fort amortissement du matériau par rapport à la puissance de la source les signaux reçus sont fortement bruités. Le fait de sommer ('stack' en anglais) temporellement une succession de signaux permet statistiquement de réduire les signaux incohérents (i.e. le bruit), et d'augmenter l'amplitude des signaux cohérents (ie signaux correspondants à l'enregistrement de l'onde de déformation). L'oscilloscope utilisé permet de faire cela jusqu'à maximum 256 *stacks*. Or il est constaté que les signaux sont encore très bruités, c'est pourquoi plusieurs enregistrements peuvent être faits pour être ensuite sommés par ordinateur. L'augmentation du nombre de *stacks* ne permet pas indéfiniment de réduire le bruit du signal. Le calcul du Ratio Signal sur Bruit (SNR pour Signal/Noise Ratio) en fonction du nombre de *stack* donne le nombre de *stack* minimal pour réduire le bruit au maximum. Ce ratio est calculé pour 256 à 7*256 *stacks*. Il apparaît que le ratio est optimal pour 2*256 *stacks*, puis décroît sensiblement (Figure II.39). Les valeurs de ces ratios peuvent varier en fonction du matériau traversé. Pour prendre une marge de sécurité sur la qualité du signal pour tous les matériaux étudiés dans cette thèse dans leurs différents états de dégradation, nous choisissons d'exploiter les signaux sommés 768 fois pour les ondes P. Les signaux issus des ondes S sont sommés seulement 512 fois car d'une part la qualité du signal est meilleure que pour les ondes P et que la mesure est réalisée deux fois par échantillon (inversion des polarités entre les deux mesures) ce qui donne une qualité de signal satisfaisant pour un pointé de l'arrivée de l'onde avec une précision de l'ordre de la microseconde.

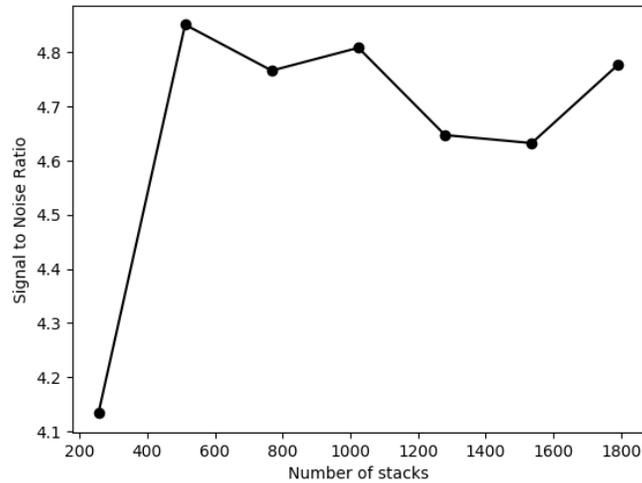


Figure II.39 : Ratio signal sur bruit fonction du nombre de stacks

II.4.6.5. Limites de la mesure

Le matériau étudié atténue très fortement les ondes sismiques si bien qu'avec notre dispositif de mesure, les données ne sont pas exploitables pour des mesures sur des échantillons âgés de moins de 30 jours. Suite au développement de la cimentation du matériau avec la cure, les mesures sont possibles à 90 jours. Cependant, les mesures s'avèrent de nouveau inexploitable après plusieurs cycles (4 maximum). Seuls les cycles après 1an de cure ont pu être suivis dans leur totalité. Ces limitations expliquent les résultats parcellaires de cette caractérisation du matériau.

II.4.6.6. Fréquence des mesures

Au vu des limites liées à la qualité du signal, les mesures des vitesses sismiques ont été réalisées

- au cours de la cure entre 130 et 365 jours, toutes les 2 semaines environ ;
- au cours des cycles hydriques (aux teneurs en eau maximales et minimales) sur des échantillons ayant curés 90 jours. Mesures possibles jusqu'à 4 cycles maximum, parfois moins sur matériau type TW1 et TW2 ;
- au cours des cycles hydriques sur des échantillons ayant curés 1 an, jusqu'aux 6 cycles prévus dans le protocole, quel que soit le matériau. Ce sont ces mesures qui sont présentés dans le chapitre 4.

II.5. Conclusion du chapitre 2

Dans ce chapitre a été présentée la méthodologie de l'étude de la durabilité du limon Salin de Giraud traité à la chaux en environnement maritime. La Figure II.40 présente une synthèse du raisonnement présenté dans ce chapitre. La Figure II.41 présente le détail de l'ensemble des situations et le nombre de répétition pour chacun des essais et des formulations choisis.

L'étude de la durabilité au laboratoire s'appuie sur la reproduction de l'environnement d'une digue maritime par des cycles d'humidification séchage à l'eau de mer. La multiplication du nombre de cycles hydriques provoque le vieillissement accéléré des matériaux. Les caractérisations de la résistance mécanique, de la microstructure et de l'érosion à différents stades du vieillissement donnent les vitesses d'évolution de ces différentes propriétés. Les mesures géophysiques, non destructives, permettent de caractériser pour chacune des grandeurs physiques mesurées, les gammes de valeur caractéristiques d'un sol traité à la chaux. D'autre part elles permettent de multiplier le nombre de mesure faites au cours du vieillissement par rapport aux mesures destructives.

La variabilité des matériaux choisis pour l'étude reproduit des hétérogénéités pouvant exister dans une digue. Le cas du sol traité contenant de l'eau de mer, est lui un matériau expérimental qui ne reproduit pas les pratiques actuelles de construction mais dont l'intérêt dans le cas des digues maritimes pourrait être grand si la durabilité de ce matériau s'avère au moins égale à celle des autres matériaux.

Les chapitres 3 et 4 présentent l'ensemble des résultats de chacun des essais en fonction du temps de cure du matériau et du nombre de cycles hydriques subis.

Comment évaluer la durabilité d'un sol traité à la chaux dans une digue maritime ?

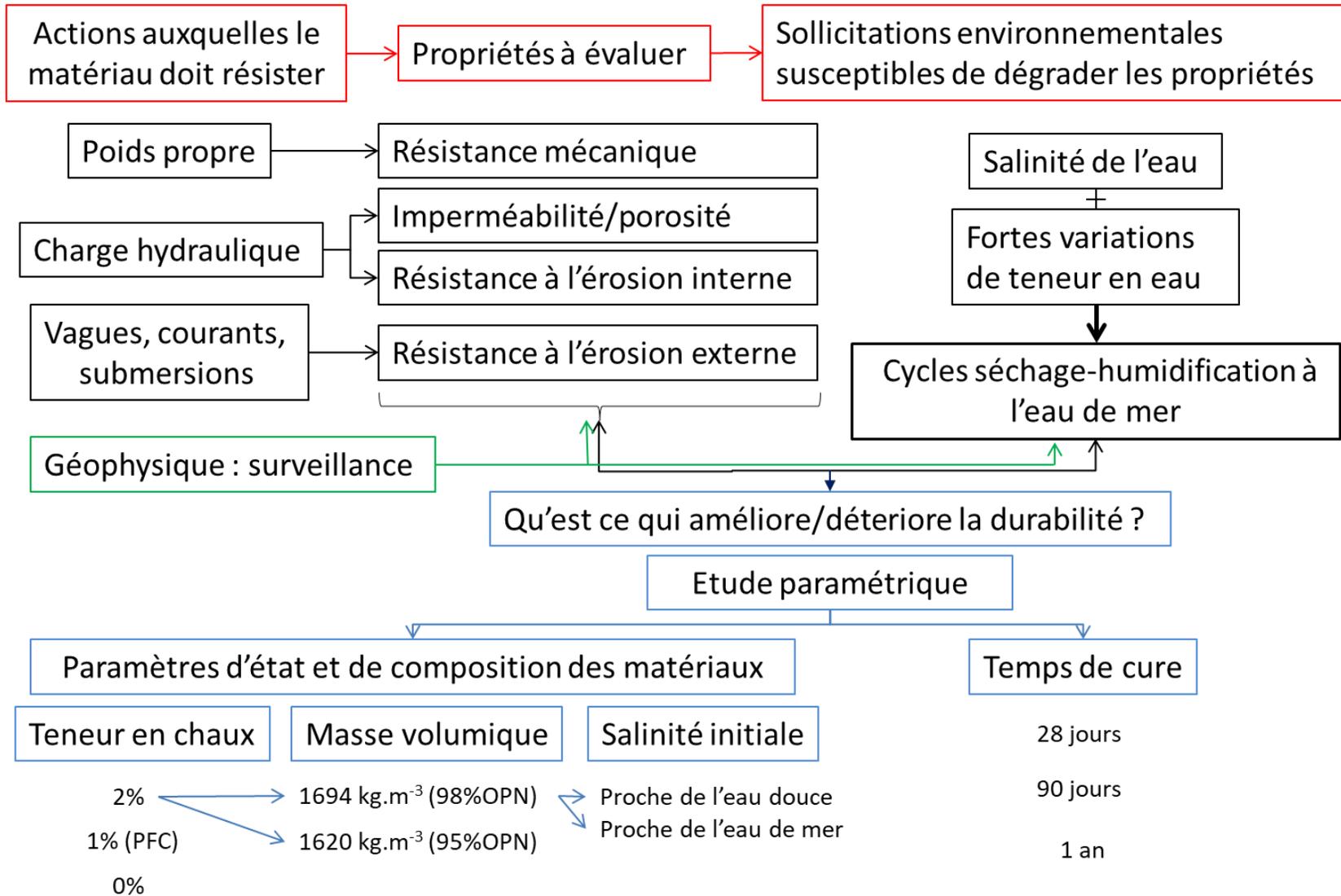


Figure II.40 : Bilan de la méthodologie d'étude de la durabilité d'un matériau d'une digue maritime

	Temps de cure (en jours)	de 0 à 365	28			90							365				
			0	2	4	0	2	4	6	8	10	12	0	2	4	6	
Nombre de cycle		0	0	2	4	0	2	4	6	8	10	12	0	2	4	6	
Nombre d'essais réalisés	Résistance en compression simple	TW2%d98		3	3	3	3	3	3	3	3		3	3	3	3	
		SW2%d98		3	3	3	3	3	3	3	3		3	3	3	3	
		TW1%d98		3	3	3	3	3	3	3	3		3	3	3	3	
		TW2%d95		3	3	3	3	3	3	3	3		3	3	3	3	
		Limon non traité		3			3							3			
	Erosion interne HET	TW2%d98					3	2	2	3	2		2	2	2		2
		SW2%d98					2	2	2	2	3		2	2	2		1
		TW1%d98					3	2	1	2	2	1		2	1		1
		TW2%d95					2	3	3	3	3		3	2	2		2
		Limon non traité					<i>echec</i>							2			
	Erosion externe MoJET	Chaux 2% + eau douce		2	2		2	2	2	2				2	2	1	
		Chaux 2% + eau de mer		2	2		2	2	2	2				2			
		Limon non traité												2			
	Porosité au mercure	TW2%d98		3	4	2	4	3	4	3	3		2	2	1		2
		SW2%d98		2	1	2	1	2	1	2	1		1	3	1		1
		TW1%d98		6	3	2	1	2		2	1	1		2			2
		TW2%d95					2	1		2	1			1	1		1
		Limon non traité		2			2							2			
	Résistivité électrique	TW2%d98	5				24	21	17	12	8	4	4	7	3	2	2
		SW2%d98	6				12	10	8	6	4	2	2	7	5	3	3
TW1%d98		5				6	6	6	6	5	2		6	2	2	2	
TW2%d95		4				16	15	12	9	6	6	3	6	4	2	2	
Limon non traité		3				4							4				
Vitesses des ondes P et S		<i>à partir de 140 jours</i>															
	TW2%d98	5											10	3		2	
	SW2%d98	6											7	3		2	
	TW1%d98	5											5	2		1	
	TW2%d95	4											5	3		2	
	Limon non traité	3											2				
Nombre total d'éprouvettes		276															
Nombre total d'essais réalisés		709															

Figure II.41 : Tableau récapitulatif de l'ensemble des essais réalisés

III. Chapitre 3: Quantification expérimentale de la durabilité du limon traité à la chaux

Dans ce chapitre sont présentés l'ensemble des résultats des essais destructifs décrits dans le chapitre 2 (compression simple, *Hole Erosion Test*, et *Mobile Jet Erosion Test* et porosimétrie au mercure) sur le limon de Salin de Giraud traité à la chaux. Les impacts des cycles de séchage-humidification à l'eau de mer, de la composition en chaux et en sel, de la densité du matériau, et du temps de cure sur les différentes propriétés du sol traité sont quantifiés. Le volume de résultat est important. Il est décliné par types de propriétés caractérisées.

Nous traiterons dans un premier temps de la résistance mécanique avec les résultats des essais de résistance en compression simple, puis de l'érosion interne (HET) et externe (MoJET). Dans un dernier temps nous changerons d'échelle d'étude avec les résultats de porosimétrie. La mise en relation des variations de ces différentes propriétés fait l'objet d'une partie du chapitre 5.

III.1. Evaluation la durabilité vis-à-vis de la résistance en compression simple

Pour évaluer la durabilité vis-à-vis de la résistance en compression simple nous cherchons :

- Dans un premier temps à quantifier l'effet des cycles hydriques à l'eau de mer sur la résistance en compression simple des différents matériaux, après une cure de 90 jours qui permet à priori d'après la bibliographie d'avoir un rapport optimal entre temps d'attente et performances élevées du matériau. Du point de vue d'une digue, cette durée de cure semble réaliste pour un matériau du talus à plusieurs dizaines de centimètre de la surface du talus. Cette dernière hypothèse ne pourra être vérifiée qu'avec des mesures in-situ dans l'ouvrage construit dans le cadre du projet Digue2020.
- Dans un second temps, nous nous intéressons à l'effet du temps de la cure en l'absence de sollicitations sur les valeurs de résistances en compression pour quantifier l'effet de la variabilité de composition et de densité des matériaux.
- Enfin, nous caractériserons l'effet du temps de cure sur les cinétiques des dégradations de la résistance en compression simple provoquées par les cycles hydriques à l'eau de mer dans le cas du matériau de référence et du matériau contenant de l'eau de mer au moment du traitement.

III.1.1. Effet des cycles hydriques à l'eau de mer après 90 jours de cure

Après leur fabrication les échantillons sont laissés 90 jours en cure à teneur en eau et température constante. Les éprouvettes subissent ensuite le vieillissement accéléré par cycles hydriques et tous les deux cycles, trois éprouvettes sont prélevées pour réaliser les essais de compression simple. Dans cette partie III.3.1, nous appellerons « état initial » les propriétés mesurées après 90 jours de cure sans cycles hydriques.

La Figure III.1 donne pour les différents matériaux l'évolution de la valeur de résistance en compression simple (R_c) en fonction du nombre de cycles hydriques appliqués.

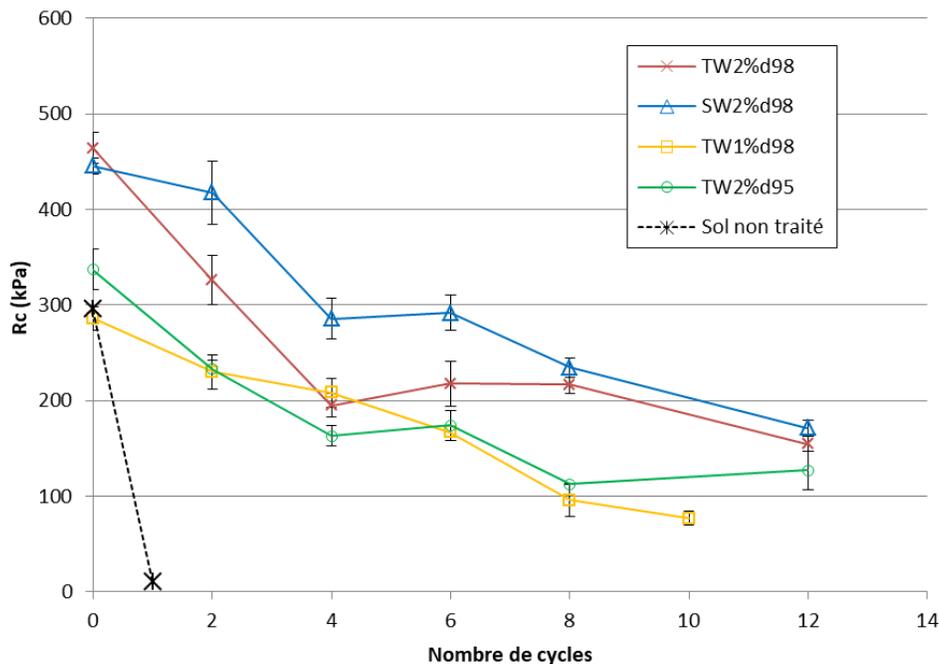


Figure III.1 : Valeurs des résistances en compression simple (R_c) pour les différents matériaux étudiés en fonction du nombre de cycles hydriques.

Pour tous les matériaux, la valeur de résistance en compression simple décroît avec le nombre de cycles, cependant trois tendances se dégagent :

- Cas des matériaux traités avec 2% de chaux : décroissance asymptotique. Entre 0 et 4 cycles la résistance en compression simple, chute de -35% à -60% de la valeur initiale puis de seulement -5% à -20% de la valeur initiale au cours des 8 cycles suivants. La disparité des vitesses de chute des valeurs de R_c est synthétisée dans le Tableau III.1.
- Cas du matériau traité à 1% de chaux : la décroissance est quasi linéaire, avec une perte de -70% de la valeur initiale après 10 cycles, soit environ -20 kPa par cycles.

- Cas du sol non traité : perte de cohésion et gonflement immédiat. Dès la première humidification à l'eau de mer le matériau gonfle, et s'effondre sur lui-même si bien que la poursuite des cycles n'est pas possible et que l'essai de résistance en compression simple n'est pas réalisable. La valeur de la R_c après un cycle, indiqué dans la Figure III.1 est une valeur fictive signifiant que le matériau a perdu toute sa cohésion, on peut donc supposer que la valeur de R_c est quasi nulle.

Tableau III.1 : Vitesse de décroissance des valeurs de la résistance en compression simple par rapport à la valeur de R_c initiale (R_c à 0 cycle) et vitesse absolue par cycles (en kPa/cycle).

Matériau	Entre 0 et 4 cycles		Entre 4 et 12 cycles	
	Perte en pourcentage de la valeur initiale	Valeur moyenne de la perte par cycle	Pourcentage supplémentaire de perte par rapport à la valeur initiale	Valeur moyenne de la perte par cycle
SW2% ϕ 98	-35%	-40 kPa	-20%	-14 kPa
TW2% ϕ 98	-60%	-70 kPa	-5%	-5 kPa
TW2% ϕ 95	-50%	-45 kPa	-10%	-4.5 kPa

En termes de valeur de résistance en compression simple les conclusions tirées de ces essais sont les suivantes :

- La résistance en compression simple est toujours plus élevée, quel que soit le nombre de cycles, dans le cas du matériau contenant de l'eau de mer lors de sa préparation (SW2% ϕ 98).
- La R_c augmente très significativement avec l'augmentation de la masse volumique sèche de 95 % de l'OPN (1620 kg/m³) à 98 % de l'OPN (1694 kg/m³). Cette différence de résistance liée aux différences de masse volumique tend à se réduire après 4 cycles.
- L'augmentation de la teneur en chaux de 1 % à 2 %, pour une même densité engendre un gain de 150 kPa à l'état initial. Ce gain est également observé après 8 cycles, ce qui n'est pas le cas au cours des cycles précédents en raison de cinétiques de dégradation différentes.

Les valeurs de R_c et les cinétiques de dégradation permettent de hiérarchiser la durabilité du matériau en fonction de cette propriété. Du plus durable au moins durable : SW2% ϕ 98 > TW2% ϕ 98 > TW2% ϕ 95 > TW1% ϕ 98 > sol non traité. Ce classement est le même que celui relatif à la résistance à l'érosion interne.

On s'intéresse maintenant à l'effet du temps de cure sur les valeurs des R_c initiales et sur la vitesse de dégradation de cette propriété lors du vieillissement du matériau.

III.1.2. Effet du temps de cure

III.1.2.1. Effet du temps de cure sur les valeurs de résistance en compression simple en l'absence de cycles hydriques.

III.1.2.1.1. Résultat et analyse des résultats des essais de cette thèse

Les réactions pouzzolaniques qui aboutissent à la formation des composés cimentaires sont responsables de l'augmentation de la résistance mécanique en compression simple (Le Roux and Rivière, 1969). Ces réactions sont longues et limitées par la quantité de chaux. Une augmentation de la résistance mécanique est donc attendue dans un premier temps puis on s'attend à une stagnation de cette valeur avec une variabilité de cette valeur en fonction de la quantité de chaux en présence et éventuellement en fonction de la salinité du matériau initiale.

La Figure III.2 présente les résultats de l'évolution des valeurs de R_c en fonction du temps de cure pour les différents matériaux de l'étude. Comme attendu d'après la littérature la R_c augmente avec le temps de cure pour les différents matériaux. L'absence de mesures intermédiaires entre 90 et 365 jours ne permet pas de conclure quant à l'évolution asymptotique des résistances au-delà de 90 jours, en revanche la vitesse moyenne d'accroissement de la résistance entre 90 et 365 jours est plus faible qu'entre 28 et 90 jours.

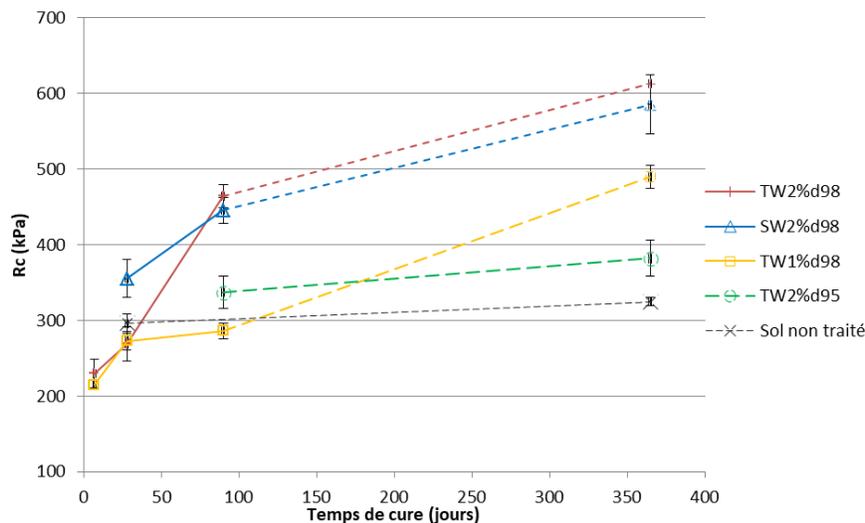


Figure III.2 : Evolution de la résistance en compression simple en fonction du temps de cure pour les différents matériaux. Les courbes en pointillé entre 90 et 365 indiquent qu'en l'absence de mesures intermédiaires sur cet intervalle, la pente de ces droites est à prendre avec précaution.

Les valeurs des résistances dépendent de la formulation et de la densité des matériaux.

- Effet de la salinité du sol

Après 28 jours de cure, les échantillons traités à 2% de chaux avec eau de mer (SW2%d98) la R_c est de 350 kPa contre 250 kPa pour les échantillons équivalents préparés avec de l'eau douce (TW2%d98). En

revanche après 90 jours, les deux matériaux ont des valeurs de R_c très proches, autour de 450 kPa avec des valeurs sensiblement supérieures dans le cas du matériau non salé (TW2% d_{98}), soit 464 ± 10 kPa contre 445 ± 5 kPa pour le matériau salé. Entre 90 et 365 jours de cure, la résistance augmente encore de +150 kPa pour les deux matériaux en conservant le même écart de valeur.

Ces observations confirment le rôle de l'eau de mer comme accélérateur de prise du sel (Le Borgne, 2010; Rajasekaran et al., 1997). En revanche la présence de sel apparait neutre sur la résistance mécanique au long terme, en l'absence de sollicitations environnementales.

- Effet du dosage en chaux

A 7 et 28 jours de cure, le dosage en chaux n'influence pas la valeur de la résistance mécanique, en revanche après 90 jours de cure la résistance du sol traité à 2% de chaux (TW2% d_{98}) est de 175 kPa supérieure à celle du sol traité à 1% de chaux (TW1% d_{98}). La résistance augmente très peu pour le matériau traité à 1% de chaux entre 28 et 90 jours ce qui indique que la chaux a déjà été consommée en très grande partie à 28 jours. En revanche l'accroissement de la R_c entre 90 jours et 1 an montre que les réactions pouzzolaniques se poursuivent malgré la faible disponibilité de la chaux.

On note qu'après 28 jours de cure, la résistance du sol non traité est supérieure à la résistance des sols traités non salés. Cela s'explique par une densité plus élevée des éprouvettes de sol non traité par rapport à celle de sol traité, et par les réactions pouzzolaniques à 28 jours qui ne sont pas assez développées pour compenser cette densité plus faible. Le sol contenant du sel possède lui une R_c déjà bien supérieure au sol naturel après 28 jour de cure, ce qui confirme le rôle d'accélérateur des réactions pouzzolaniques de l'eau de mer.

- Effet de la densité

Pour une diminution de densité de 74 kg/m^3 soit la différence de densité entre les compactages à 98.5 et 95% de l'OPN, la valeur de R_c chute de 128kPa à 90 jours (comparaison des matériaux TW2% d_{98} et TW2% d_{95}). Cette différence est même de 300 kPa après 1 an de cure. A 1an la R_c du matériau TW2% d_{95} est inférieur de 110kPa à la R_c du matériau TW1% d_{98} malgré un dosage en chaux plus élevé.

La différence de densité entre les matériaux explique les valeurs de R_c plus faible du matériau TW2% d_{95} . Cependant la perte de densité ne peut expliquer à elle seule les valeurs observées après 1an de cure. L'hypothèse émise pour expliquer en partie ces faibles valeurs de densité est une mobilisation de la chaux dans des réactions de carbonatation au contact du CO_2 de l'air. Le matériau étant moins dense les échanges avec l'air extérieur, ou peut être rien qu'avec l'air présent dans le matériau, ont favorisé la carbonatation qui n'apporte pas de gain de cohésion entre les particules du sol et donc de gain de

résistance mécanique (Thompson, 1968). Cette hypothèse serait à vérifier par une quantification chimique des carbonates.

III.1.2.1.2. Comparaison avec les sols traités à la chaux étudiés par d'autres auteurs

La Figure III.3 présente, en plus de nos résultats, les valeurs de R_c d'une marne traitée à 3 % de chaux (Le Roux and Rivière, 1969b) et d'un limon A1, dont les caractéristiques sont très proches du limon des Salins de Giraud, traité avec 2 % de chaux dans le cadre du projet DigueElite (Bonelli et al., 2018), et dont la densité est proche de notre matériau compacté à 95 % de l'OPN.

Les résistances en compression simple de nos matériaux sont les plus faibles. La nature des matériaux et en particulier la nature des argiles qui n'est pas précisée pour les matériaux de la bibliographie peuvent être à l'origine de ces différences. Ne connaissant pas non plus les teneurs en eau des matériaux de la littérature, des comparaisons quantitatives ne sont pas bienvenues. Nous retiendrons uniquement que les matériaux étudiés dans cette thèse ont globalement des résistances mécaniques, en l'absence de sollicitation environnementale, plus faibles que celle que l'on peut trouver dans la littérature.

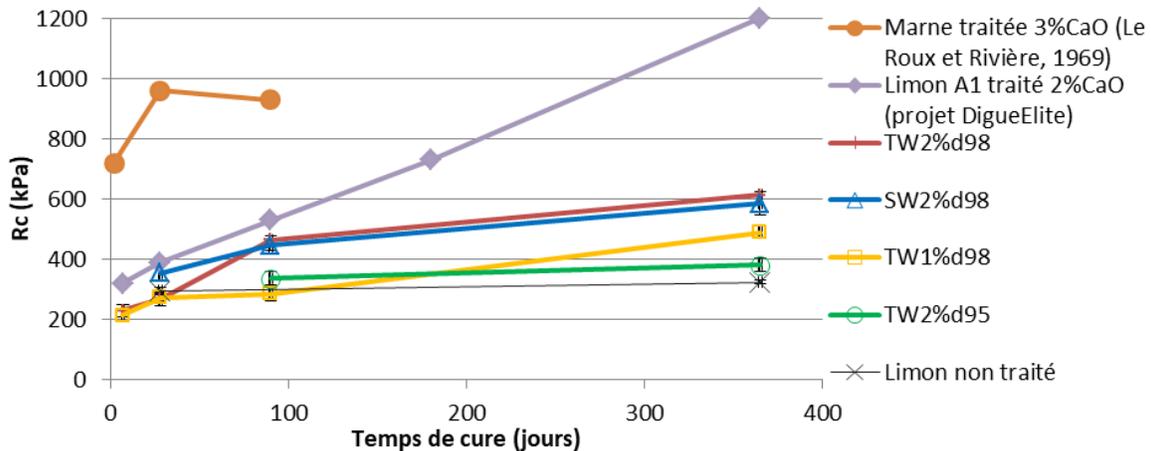


Figure III.3 : Comparaison de l'évolution de la R_c en fonction du temps de cure de différents sols traités à la chaux dont les valeurs sont issues de la littérature avec les résultats de nos essais.

III.1.2.2. Effet du temps de cure sur les vitesses de dégradation de la R_c au cours du vieillissement accéléré.

Le temps de cure améliore la R_c (III.1.2.1) et les cycles de séchage-humidification à l'eau de mer après 90 jours de cure la dégradent (III.1.1). Nous cherchons désormais à savoir si la cinétique de dégradation au cours des premiers cycles est dépendante du temps de cure des matériaux. Nous nous intéressons au cas du matériau de référence TW2%d98 et à son pendant à l'eau de mer SW2%d98. A 28 jours, les essais sont réalisés après 0, 2 et 4 cycles. A 90 jours, ils sont réalisés à 0, 2, 4, 6, 8 et 12 cycles. A 1 an, ils sont réalisés à 0, 2, et 6 cycles.

Dans le cas du matériau de référence TW2%d97, quel que soit le temps de cure, la diminution de la R_c est quasi linéaire au cours des 4 premiers cycles (Figure III.4). La diminution de la R_c par rapport aux valeurs initiales est d'environ -30% par cycle quel que soit le temps de cure. Au-delà de 4 cycles, pour des temps de cure de 90 et 365 jours, la R_c ne décroît que d'environ 2 % de la valeur initiale par cycle. Les mesures à 28 jours de cure ne vont pas au-delà de 4 cycles donc il n'est pas possible de savoir s'il y a une stabilisation de la R_c près 4 cycles dans ce cas-là.

Dans le cas du matériau contenant initialement de l'eau salée SW2%d98 (Figure III.5), quel que soit le temps de cure, la R_c diminue avec le nombre de cycles. Entre 0 et 2 cycles la R_c perd environ 50 % de sa valeur initiale dans le cas d'une cure de 28 jours et seulement 30 % de sa valeur initiale dans le cas de la cure de 1 an. Dans les deux cas, la vitesse de décroissance (en kPa/cycle) diminue après 2 cycles. Les valeurs R_c et la vitesse de décroissance sont équivalentes à la moyenne des comportements à 28 jours et 1 an.

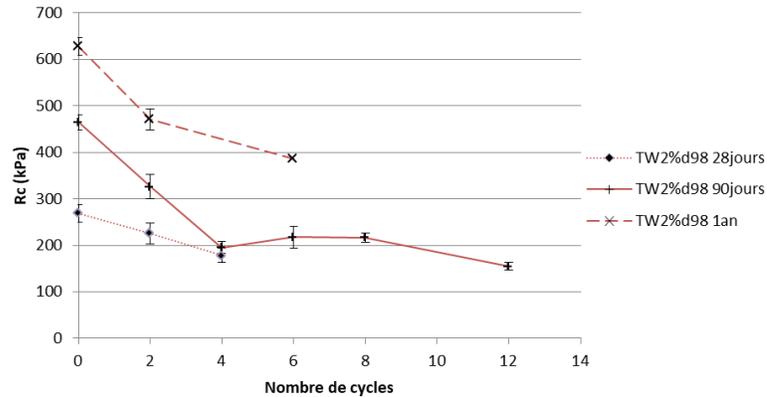


Figure III.4 : Evolution de la R_c en fonction du nombre de cycles et du temps de cure pour le matériau TW2%d98

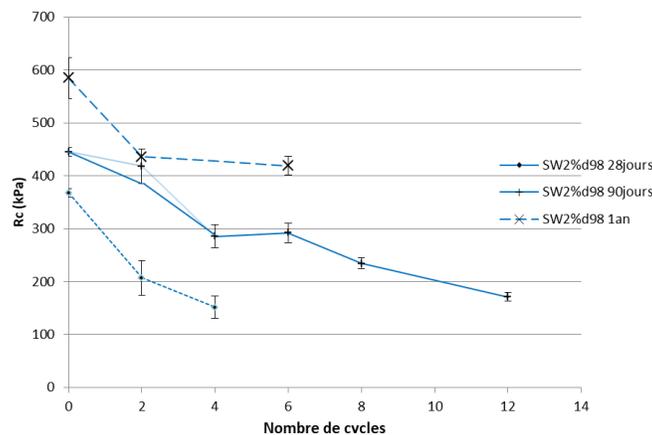


Figure III.5 : Evolution de la R_c en fonction du nombre de cycles et du temps de cure pour le matériau SW2%d98

Pour le matériau TW2%d95 (Figure III.6), seules les valeurs de R_c à 90 jours et 1 an sont disponibles. Les gradients de décroissance avec les cycles sont quasi identiques quel que soit le temps de cure. Dans le cas de TW1%d98 (Figure III.7), la vitesse de décroissance de la R_c est plus élevée lorsque le temps de

cure augmente (à 28 jours -30 % de la valeur initiale contre -20 % de la valeur initiale à 90 jours). A 1 an de cure, le nombre de valeurs ne permet pas de conclure sur une tendance d'évolution de la propriété avec les cycles.

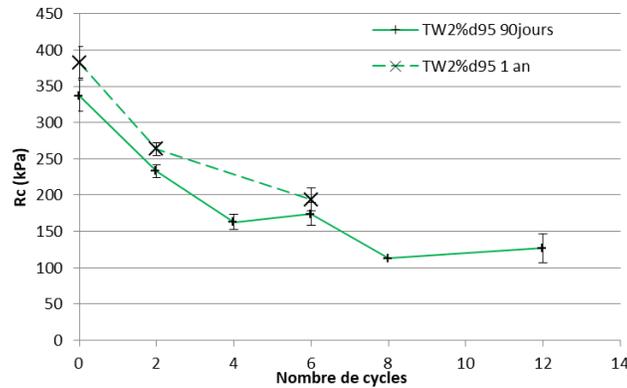


Figure III.6 : Evolution de la R_c en fonction du nombre de cycles et du temps de cure pour le matériau TW2%d95

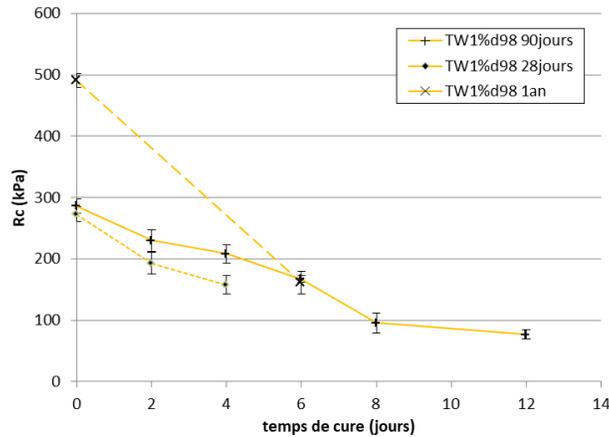


Figure III.7 : Evolution de la R_c en fonction du nombre de cycles et du temps de cure pour le matériau TW1%d98

L'ensemble de ces résultats nous permet de conclure que le gradient de diminution des valeurs de R_c dépend peu du temps de cure. En revanche, les valeurs initiales de R_c augmentent avec le temps de cure. La durabilité vis-à-vis de la résistance en compression simple, qui dépend à la fois de la valeur de la R_c et de son gradient (ou vitesse) d'évolution, augmente donc avec le temps de cure des matériaux.

III.1.3. Effet de la salinité de l'eau sur l'évolution des R_c

Mehenni (2015) a soumis des échantillons de limon traité à la chaux à des cycles d'humidification séchage en utilisant de l'eau du robinet. Les différences majeures entre son protocole et le nôtre sont la salinité de l'eau et la durée de chaque cycle. Nous utilisons de l'eau de mer et la durée d'un cycle complet est dans notre cas de 72 h ou 86 h, tandis que dans le cas de Mehenni (2015) utilise de l'eau du robinet et chaque cycle à une durée de plusieurs semaines. La nature du limon entre les deux études

diffère légèrement, avec un limon plus argileux dans le cas de notre étude (20 % de minéraux argileux contre 6 % dans les études de Mehenni (2015)). Ces différences rendent la comparaison des valeurs de résistance non pertinente, en revanche nous nous intéressons aux tendances d'évolution de la résistance avec les cycles. La Figure III.8 superpose l'évolution des résistances des matériaux étudiés dans cette thèse (limon de Salin de Giraud) soumis à des cycles à l'eau de mer, et l'évolution des résistances du limon de Saint Quentin soumis à des cycles à l'eau de mer. Dans les deux études, les cycles débutent après 90 jours de cure, en revanche dans le cas des cycles à l'eau douce, l'application des 12 cycles dure plus de 250 jours. C'est pourquoi l'évolution des R_c après 1 an de cure est également présentée dans le cas des cycles à l'eau de mer.

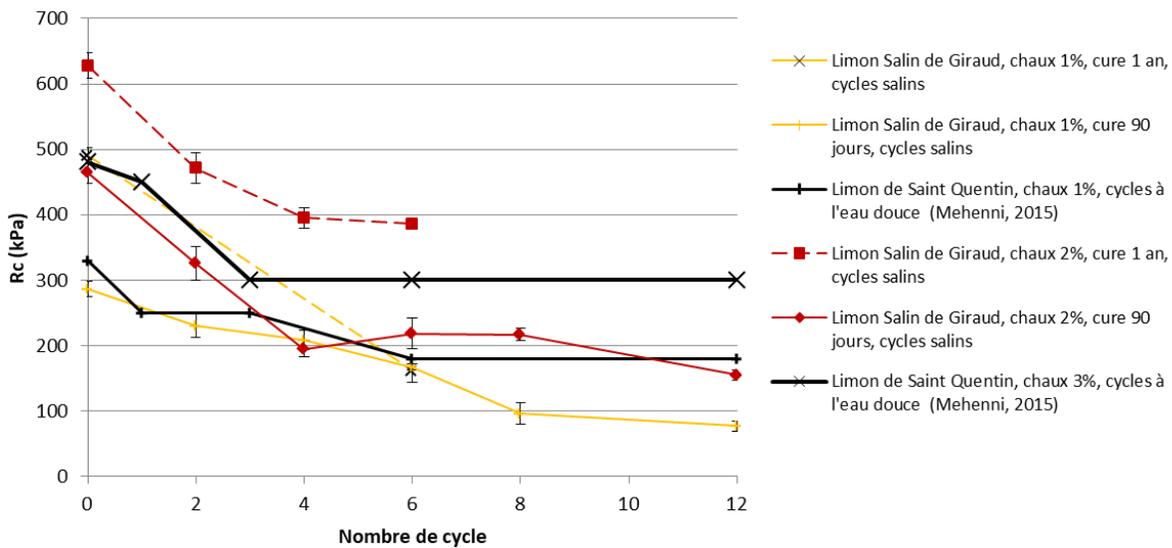


Figure III.8 : Comparaison de l'évolution de la résistance en compression simple dans le cas de cycles à l'eau douce (Mehenni, 2015) et à l'eau de mer. La différence de limon et des durées de réalisation des cycles est à prendre en compte dans l'interprétation.

L'effet de la teneur en chaux du sol est le même que l'eau soit saline ou non. Pour un traitement à 2 ou 3 %, la résistance chute d'environ 50 % en 3 à 4 cycles puis reste quasi constante jusqu'à 12 cycles. Avec un traitement à 1 %, dans les deux cas la vitesse de décroissance de la R_c est plus faible que pour des traitements plus élevés. En revanche cette décroissance dure plus longtemps. La décroissance dure plus longtemps dans le cas des cycles salins ce qui témoignerait d'une agression plus importante du matériau par l'eau de mer. Cependant le temps très long des cycles à l'eau douce laisserait le temps aux réactions pouzzolaniques de se poursuivre durant les cycles, ce qui n'est pas le cas pour des cycles de 72 h. Ces deux facteurs contradictoires ne permettent donc pas de conclure de manière définitive de l'impact de la salinité de l'eau sur la résistance mécanique du sol traité à la chaux.

III.1.4. Conclusion sur la durabilité vis-à-vis du paramètre résistance en compression simple

Les cycles hydriques à l'eau de mer dégradent la résistance en compression simple à des vitesses variables en fonction de la teneur en chaux, de la densité et de la présence d'eau de mer dans le sol avant traitement. Ces résistances restent cependant très supérieures à celle du limon non traité, qui dès le premier cycle hydrique gonfle, perd toute cohésion, et s'effondre sous son propre poids. Dans le cas des matériaux traités, aucun changement de volume n'est observé. Le temps de cure influe sur les valeurs de R_c mais pas sur les cinétiques de décroissance liées aux cycles hydriques.

On rappelle que la durabilité dépend à la fois de la vitesse de variation du paramètre mesuré et de sa valeur nominale. Plus la vitesse est faible et plus la valeur nominale est élevée, plus le matériau est durable.

En prenant la vitesse de décroissance de la R_c comme critère de durabilité, la conclusion est que le matériau traité le plus durable est celui contenant de l'eau de mer avant traitement avec 2% de chaux (SW2% ρ_{98}). Cependant la différence de R_c entre SW2% ρ_{98} et le matériau de référence (TW2% ρ_{98}) le matériau de référence diminue avec le nombre de cycle. L'écart relatif entre SW2% ρ_{98} et TW2% ρ_{98} est 50 % après 4 cycles (écart maximal) mais n'est plus que de 10 % après 12 cycles. Une étude plus complète de la durabilité relative des matériaux est présentée dans le chapitre de synthèse (V.1.2).

Une diminution de densité de 98 % de l'OPN à 95 % ne modifie pas la vitesse de décroissance de la R_c avec les cycles. En revanche la valeur de R_c initiale est plus grande dans le cas de la densité la plus élevée. L'augmentation de la densité du matériau augmente sa durabilité.

Pour un nombre de cycles supérieur à 8, la diminution de la teneur en chaux entre le traitement à 2% et celui à 1% est plus dommageable pour le matériau que la diminution de densité de 98 à 95% de l'OPN.

La résistance en compression simple du sol traité à la chaux dépend des produits des réactions pouzzolaniques (= les composés cimentaires), présents en plus ou moins grande quantité en fonction de la formulation du matériau. Il semblerait que ces composés soient en partie dégradés au cours des cycles hydriques. Le développement des réactions pouzzolaniques qui aboutissent à la synthèse de nouveaux composés dans la porosité du sol et leur détérioration au cours des cycles, impacte probablement la valeur de la porosité totale et la répartition de la taille des pores. La réponse à cette question fait l'objet de la partie III.4.

III.2. Evaluation de la durabilité vis-à-vis de l'érosion de conduit

La durabilité vis à vis de l'érosion interne est évaluée par l'essai d'érosion de conduit (Hole Erosion Test (HET)). La résistance à l'érosion du matériau est caractérisé par une loi d'érosion dont les paramètres déterminés avec les essais d'érosion HET sont les paramètres τ_c et K_{er} (respectivement contrainte de cisaillement critique et coefficient d'érosion, voir II.4.2). Nous avons vu dans le chapitre 1 que la résistance à l'érosion est proportionnelle à τ_c et inversement proportionnelle à K_{er} . L'agent érodant dans tous les essais présentés est, pour des raisons techniques, de l'eau douce provenant du réseau d'eau potable (Champs-sur-Marne). D'après les travaux de Haghghi (2012), la nature du fluide érodant à une influence négligeable sur l'érosion par rapport à celui du débit imposé, à condition que le matériau ne soit pas dispersif. Le limon traité à la chaux n'étant pas dispersif (démonstré par Haghghi (2012) et vérifié expérimentalement pour le limon traité de cette thèse) l'utilisation de l'eau du robinet ne constitue pas un biais important vis-à-vis des conditions réelles d'une digue maritime où le fluide érodant est l'eau de mer. L'eau utilisée au cours des cycles de sollicitations hydriques est en revanche de l'eau de mer standardisée définie selon la norme NF P18-837.

Dans un premier temps est quantifié l'impact des cycles hydriques à l'eau de mer sur chacun des matériaux traités à la chaux après 90 jours de cure. Ces cycles représentent l'alternance des périodes d'immersion et d'émersion qui ont pour conséquence le séchage puis l'humidification par l'eau de mer des matériaux de la digue côté mer. Les comportements de ces matériaux sont ensuite comparés entre eux pour quantifier l'influence de la formulation et de la compacité sur l'évolution de la résistance à l'érosion avec les cycles hydriques. Dans un deuxième temps est quantifiée l'influence du temps de cure sur les vitesses de dégradation de la résistance à l'érosion lié aux cycles hydriques à l'eau de mer. Les résultats des essais d'érosion après 1 an de cure et 0 à 6 cycles hydriques sont comparés avec ceux dont le temps de cure avant les cycles n'est que de 90 jours.

III.2.1. Effets des cycles hydriques à l'eau de mer sur l'érosion

L'érosion des matériaux traités à la chaux est caractérisée par l'essai HET à différents stades de vieillissement, c'est-à-dire à l'issue d'un nombre variable de cycles d'humidification-séchage à l'eau de mer. Dans cette partie III.1.1. L'érosion des matériaux aux différentes compositions est quantifiée après qu'ils aient subi entre 0 et 12 cycles hydriques après 90 jours de cure. On cherche à évaluer pour chacun des matériaux les vitesses de variation de la contrainte critique d'érosion τ_c et du coefficient d'érosion K_{er} en fonction du nombre de cycles effectués. Le choix des portions de courbes à utiliser pour obtenir une régression pertinente et obtenir les paramètres de l'érosion est décrit dans le chapitre II.

III.2.1.1. Cas du matériau de référence : TW2%d98

La Figure III.9 présente les valeurs de la contrainte de cisaillement τ et du taux d'érosion associé calculées à partir des données de pression, débit et turbidité enregistrées lors des essais HET sur le matériau TW2%d98. Chaque essai est réalisé deux à trois fois mais pour une plus grande lisibilité un seul essai est présenté (exception à 12 cycles en raison de la grande variabilité des résultats). La Figure III.10 présente la synthèse des valeurs moyennes sur deux ou trois essais de la contrainte de cisaillement critique τ_c et du coefficient d'érosion pour les différents essais. Les barres d'erreur représentent la dispersion des données autour de la moyenne.

Les résultats montrent trois comportements du matériau distincts, en l'absence de cycles, après 2 à 6 cycles et au-delà de 8 cycles.

En l'absence de cycle, la contrainte critique d'érosion τ_c est d'environ 1450 Pa, et le coefficient d'érosion est d'environ $6.10^{-5} \text{ s.m}^{-2}$. Après 2 cycles, la valeur de τ_c reste quasi identique à la valeur initiale (0 cycle), en revanche le coefficient d'érosion double. Après 4 et 6 cycles, la valeur de τ_c reste égale à la valeur initiale à ± 100 Pa. Le coefficient d'érosion (*ker*) ne change pas entre 2 et 4 cycles mais décroît à 6 cycles, ce qui traduit une érosion plus lente dans ce cas-là. Après 8 cycles, τ_c chute autour de 800 Pa soit une diminution de 45 % par rapport à la valeur initiale. Le *ker* à 8 cycles est le même qu'à 2 et 4 cycles. A 12 cycles τ_c décroît de 200 Pa par rapport à sa valeur à 8 cycles soit une diminution de 15% supplémentaires de τ_c à 0 cycles. A 12 cycles, l'écart type entre les valeurs de *ker* lors des différents essais est d'autant plus important que l'écart entre la valeur à 8 et à 12 cycles. Il est donc impossible de conclure sur le sens et la valeur absolue de variation de *ker* au-delà de 8 cycles. Nous pouvons uniquement conclure que l'hétérogénéité entre les échantillons augmente lorsque le nombre de cycles subis augmente.

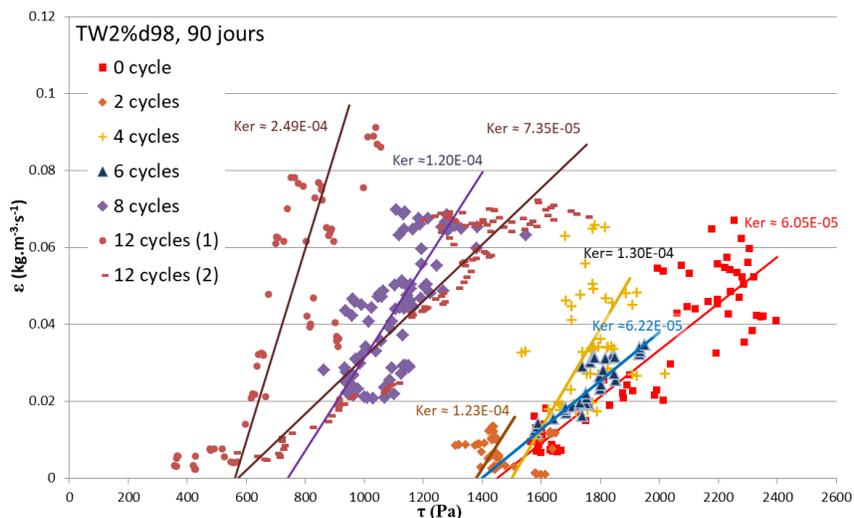


Figure III.9 : Résultats comparés des essais d'érosion HET pour le matériau TW2%d98, après 90 jours et un nombre croissant de cycles hydriques.

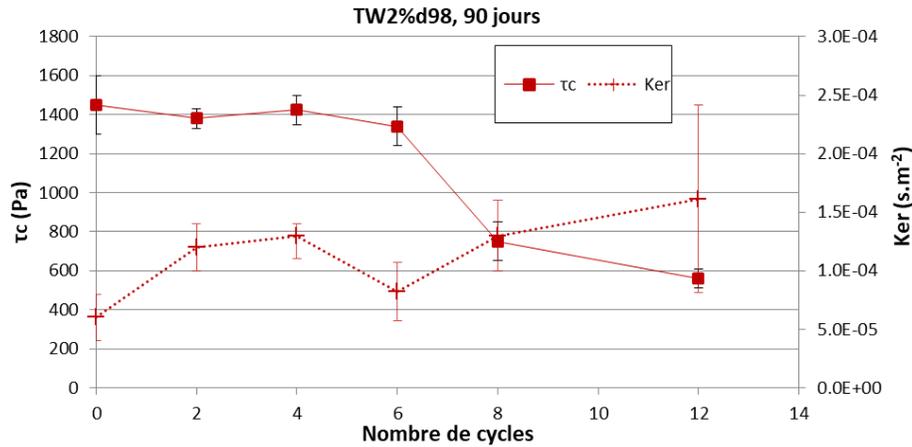


Figure III.10 : Moyennes des valeurs des contraintes de cisaillement critique et du coefficient d'érosion en fonction du nombre de cycles pour le matériau TW2% d98.

Les 6 premiers cycles hydriques ne modifient pas la contrainte tangentielle critique (τ_c), ce qui montre que la cohésion des particules du sol est peu affectée par les cycles jusqu'à 6. Au-delà du seuil de 6 cycles, la contrainte chute de plus de 50 % par rapport à la valeur initiale de τ_c . Cela traduit une chute brutale de cohésion du sol. En prenant en compte l'ensemble des écarts types du coefficient d'érosion (Figure III.10), nous pouvons conclure que *ker* augmente d'environ 50 % au cours des deux premiers cycles puis demeure peu sensible à l'augmentation du nombre de cycles.

Exprimé en fonction de la classification de Wan & Fell (2002) (Tableau III.2), l'érosion est modérément lente pour le matériau non cyclé et modérément rapide pour les matériaux ayant subi des cycles (exception faite du matériau à 6 cycles). Cette classification fait ressortir le fait que le coefficient d'érosion est peu dépendant du nombre de cycles. En revanche, cette classification ne prend pas en compte la contrainte critique, qui elle décroît après 6 cycles.

Tableau III.2 : Valeur du coefficient $I_{HET} = -\log(Ker)$, et description de l'érosion d'après la classification de Wan & Fell (2002) en fonction du nombre de cycle pour le matériau TW2% d98.

Cycles appliqués	0	2	4	6	8	12	Sol non traité (0 cycle)
I_{HET}	4,22	3,91	3,88	4,21	3,92	3,79	2,95
Description de l'érosion : classification de Wan & Fell	Modérément lent	Modérément rapide	Modérément rapide	Modérément lent	Modérément rapide	Modérément rapide	Très rapide

La classification de Briaud (2008), bien qu'elle n'ait pas été développée pour les valeurs issues de l'essai HET peut être utilisée pour comparer l'érosion des matériaux en fonction du nombre de cycles (Figure III.11). La vitesse d'érosion exprimée dans cette classification est calculée à partir de la vitesse de l'ouverture du trou ($\Delta r(t)$). Selon cette classification, l'érosion du sol traité à la chaux reste lente avec ou

sans cycle hydrique. La gamme de vitesse d'érosion reste également la même entre 0 et 12 cycles. Seule la contrainte τ permet de discriminer les deux essais, l'érosion ayant lieu pour des contraintes plus faibles pour le matériau à 12 cycles. En comparaison le sol non traité est classé comme un matériau moyennement érosif, ce qui est moins pessimiste que dans la classification de Wan & Fell.

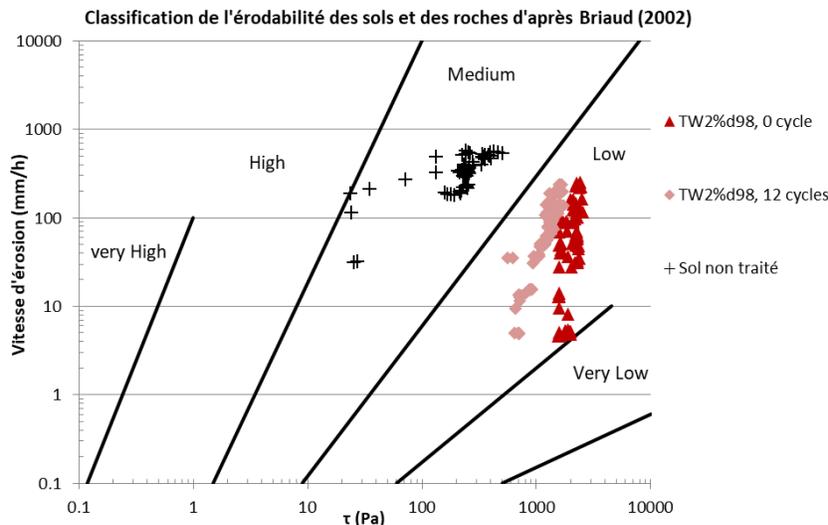


Figure III.11 : Projection des essais HET après 0 et 12 cycles pour le matériau TW2% d98 après 90 jours de cure, dans le graphique de la classification de l'érosion de Briaud (2002). Comparaison avec l'érosion du sol non traité

III.2.1.2. Cas du matériau initialement salé : SW2% d98

On s'intéresse à présent à l'érosion en fonction du nombre de cycles à l'eau de mer dans le cas du matériau contenant de l'eau de mer avant traitement.

La Figure III.12 présente les valeurs de la contrainte de cisaillement τ et du taux d'érosion associé calculées à partir des données de pression, débit et turbidité enregistrées lors des essais HET. La Figure III.13 présente la synthèse des valeurs moyennes sur 2 ou 3 essais de la contrainte de cisaillement critique τ_c et du coefficient d'érosion pour les différents essais. Les barres d'erreurs représentent la dispersion des données autour de la moyenne.

Les résultats montrent une décroissance de la contrainte τ_c avec l'augmentation du nombre de cycles, entre 1600 Pa avant les cycles à 200 Pa au bout des 12 cycles. La vitesse de décroissance diminue avec le nombre de cycles. La diminution du τ_c est de 350 Pa par cycle entre 0 et 2 cycles, de 150 Pa par cycle entre 2 et 6 cycles puis d'environ 35 Pa par cycle au-delà de 6 cycles. Le coefficient d'érosion est quasi constant autour de $5 \cdot 10^{-5} \text{ s} \cdot \text{m}^{-2}$ avec et sans les cycles. On note tout de même une augmentation de $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ s} \cdot \text{m}^{-2}$ à 2, 4 et 6 cycles.

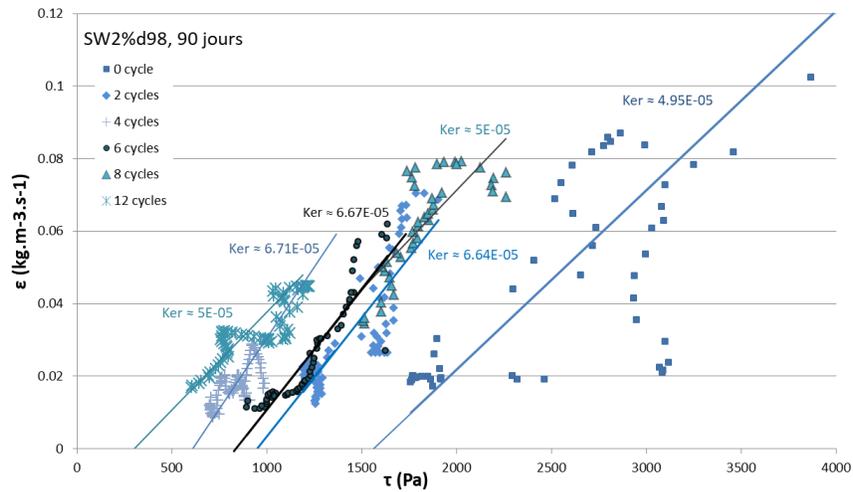


Figure III.12 : Résultats comparés des essais d'érosion HET pour le matériau SW2%d98, après 90 jours et un nombre croissant de cycles hydriques.

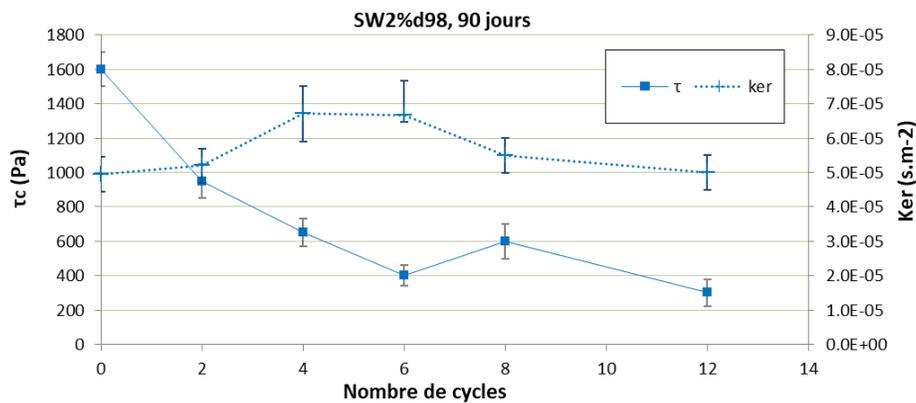


Figure III.13 : Moyennes des valeurs des contraintes de cisaillement critique et du coefficient d'érosion en fonction du nombre de cycles pour le matériau SW2%d98

La faible variation du coefficient d'érosion avec les cycles se traduit dans la classification de Wan & Fell par une érosion modérément lente pour tous les matériaux (Tableau III.3) quel que soit le nombre de cycles. En comparaison avec le matériau TW2%d98 (Tableau III.2), le matériau SW2%d98 est plus résistant à l'érosion. En prenant en compte la contrainte τ_c , la résistance à l'érosion ne peut pas être considérée comme invariante avec les cycles et cette diminution de résistance avec les cycles se remarque dans la classification de Briaud (Figure III.14). Cette perte de résistance avec les cycles est faible, le matériau reste classé dans la catégorie « faible érodabilité ».

Tableau III.3 : Valeur du coefficient $I_{HET} = -\log(Ker)$, et description de l'érosion d'après la classification de Wan & Fell (2002) en fonction du nombre de cycle pour le matériau SW2%d98

Cycles appliqués	0	2	4	6	8	12	Sol non traité (0 cycle)
I_{HET}	4,30	4,18	4,17	4,18	4,30	4,30	2,95
Description de l'érosion : classification de Wan & Fell	Modérément lent	Très rapide					

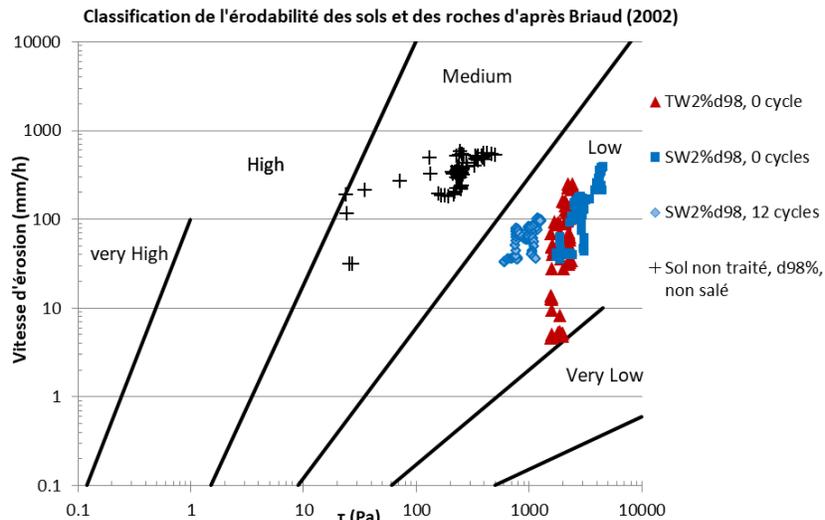


Figure III.14 Projection des essais HET après 0 et 12 cycles pour le matériau SW2%d98 après 90 jours de cure, dans la classification de l'érosion de Briaud et al (2002). Comparaison avec l'érosion du sol non traité, non salé.

Le ralentissement de la vitesse de décroissance de τ_c avec les cycles et une érosion modérément lente permet de conclure à une bonne stabilité de la résistance à l'érosion face aux cycles. Le coefficient d'érosion ker est deux à trois fois plus élevé dans le cas du matériau de référence (non salé) par rapport au sol salé SW2%d98. Paradoxalement, τ_c pour le matériau de référence est toujours au moins deux fois supérieur au τ_c du matériau SW2%d98 à partir du moment où les matériaux subissent les cycles hydriques. Cependant, la décroissance de τ_c ralentit avec les cycles tandis que dans le cas de TW2%d98, τ_c augmente avec les cycles. Au long terme, la contrainte τ_c serait donc plus grande dans le cas du sol salé. Le matériau SW2%d98 est donc plus résistant à l'érosion au long terme que le matériau de référence. La présence d'eau de mer dans le sol avant traitement est positive vis-à-vis de durabilité. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Haghghi (2012) sur l'érosion des sols argileux en présence d'eau de mer (mais dans le cas sans traitement à la chaux) qui a montré que la présence d'eau de mer dans le sol améliore sa résistance à l'érosion par l'augmentation des forces électrostatiques entre les argiles. Dans le cas du sol traité à la chaux, deux effets positifs de la salinité s'additionneraient avec comme

conséquence une cohésion plus importante entre les particules du sol : le rôle d'accélérateur de prise du sel sur la chaux et l'augmentation des forces électrostatiques entre les argiles.

III.2.1.3. Cas du matériau avec un dosage plus faible en chaux : TW1%d98

On s'intéresse à présent à l'érosion en fonction du nombre de cycles à l'eau de mer dans le cas du matériau traité avec 1% de chaux (TW1%d98).

La Figure III.15 présente les valeurs de la contrainte de cisaillement τ et le taux d'érosion associé pour les essais HET à différents nombre de cycles. La Figure III.16 présente la synthèse des paramètres des lois d'érosion (τ_c et k_{er}) en fonction du nombre de cycles. En raison d'une dégradation importante des échantillons, beaucoup ont été endommagés lors de leur manipulation pendant les cycles. Un seul essai dans chaque configuration a été possible. Les barres d'erreurs représentent l'incertitude sur les positions et les pentes des droites de régression linéaire choisie à partir des données expérimentales exposées Figure III.15.

La contrainte τ_c est d'environ 400 Pa avant les cycles et décroît de manière quasi linéaire avec le nombre de cycles. La faible valeur initiale de τ_c et l'absence d'asymptote dans la décroissance de cette propriété en fait un matériau beaucoup moins durable au vu de la résistance à l'érosion que ceux traités à 2 % de chaux pour un même taux de compaction (SW2%d98 et TW2%d98). Le taux d'érosion double entre 0 et 10 cycles. Par ailleurs de coefficient d'érosion à 8 cycles est supérieur de $4.10^{-4} \text{ s.m}^{-2}$ au coefficient à 10 cycles ce qui n'est pas attendu et qui amène à considérer qu'à 8 ou à 10 cycles, le coefficient d'érosion pourrait être respectivement plus faible ou plus élevé si l'essai avait été répété avec un ou plusieurs autres échantillons.

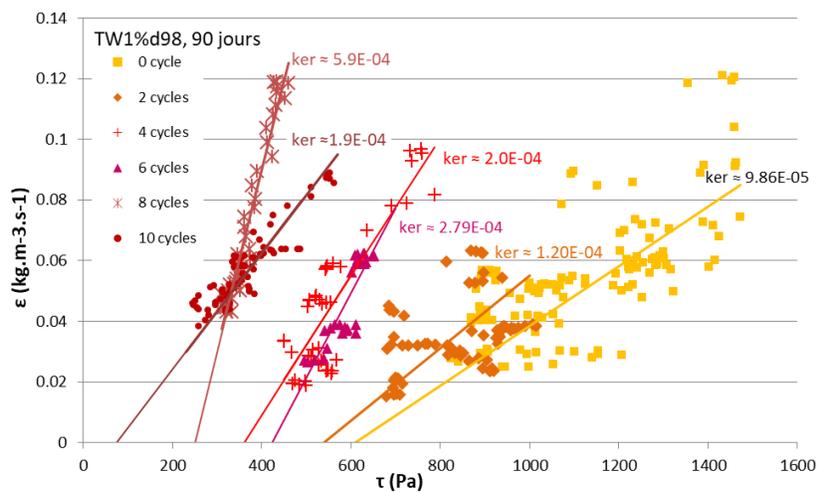


Figure III.15 : Résultats comparés des essais d'érosion HET pour le matériau TW1%d98, après 90 jours et un nombre croissant de cycles hydriques.

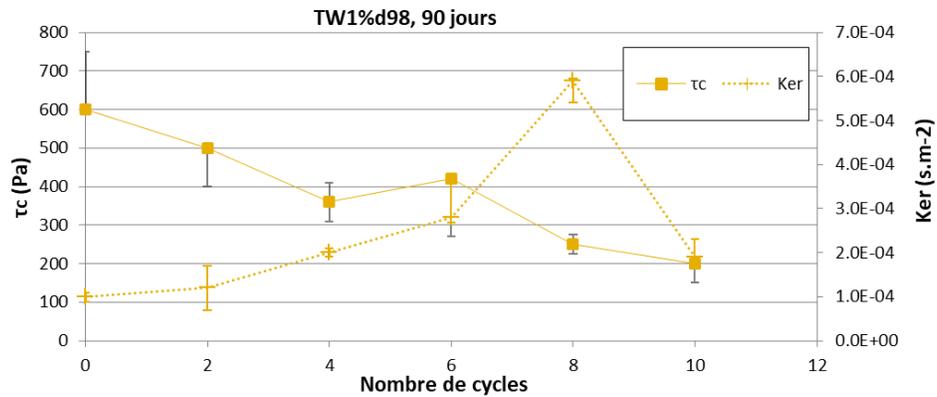


Figure III.16 : Synthèse des valeurs des contraintes de cisaillement critique et du coefficient d'érosion en fonction du nombre de cycles pour le matériau TW1%d98.

Les cycles hydriques provoquent le passage d'une érosion modérément lente à modérément rapide si l'on se place dans la classification de Wan et Fell (

Tableau III.4). Dans la classification de Briaud, qui prend en compte les valeurs de la contrainte τ , le matériau à l'état initial est classé comme faiblement érodable, comme les matériaux TW2%d98 et SW2%d98, et comme modérément érodable après 10 cycles, ce qui le rapproche du comportement du sol non traité (Figure III.17).

Tableau III.4 : Valeur du coefficient $I_{HET} = -\log(Ker)$, et description de l'érosion d'après la classification de Wan & Fell (2002) en fonction du nombre de cycle pour le matériau TW1%d98.

Cycles appliqués	0	2	4	6	8	10	Sol non traité (0 cycle)
I_{HET}	4,09	3,92	3,70	3,55	3,23	3,72	2,95
Description de l'érosion : classification de Wan & Fell	Modérément lent	Modérément rapide	Très rapide				

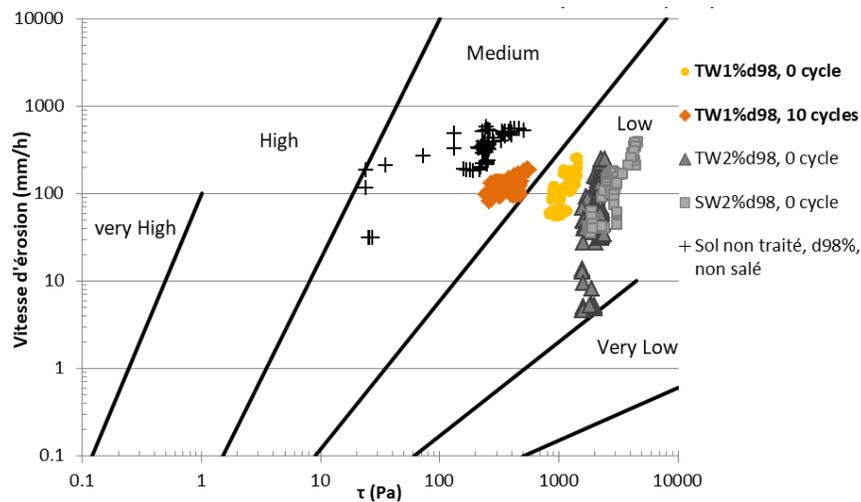


Figure III.17 : Projection dans la classification de l'érosion de Briaud (2008) des essais HET après 0 et 10 cycles pour le matériau TW1%d98 après 90 jours de cure. Comparaison avec l'érosion du sol traité à 2% de chaux et celui non traité.

La diminution de la teneur en chaux de 2 % à 1 % est très dommageable sur la résistance à l'érosion, dès l'état initial, et plus encore après les cycles hydriques.

III.2.1.4. Cas du matériau ayant une densité inférieure au matériau de référence : TW2%d95

On s'intéresse à présent à l'érosion en fonction du nombre de cycles à l'eau de mer dans le cas du matériau de plus faible compacité que les autres matériaux mais avec le dosage de référence et une préparation à l'eau douce: TW2%d95.

La Figure III.18 présente les valeurs de la contrainte de cisaillement τ et le taux d'érosion associé pour les essais HET à différents nombre de cycles. La Figure III.19 présente la synthèse des valeurs moyennes sur 2 essais de la contrainte de cisaillement critique τ_c et du coefficient d'érosion pour les différents essais. Les barres d'erreurs représentent la dispersion des données autour de la moyenne. La variabilité entre les matériaux censés avoir le même comportement est plus grande dans le cas du matériau compacté à 95 % de l'OPN en comparaison à celui compacté à 98 % de l'OPN pour un même traitement.

La contrainte de cisaillement critique avant les cycles est d'environ 400 Pa et chute de moitié après deux cycles. Le coefficient d'érosion lui double (1.10^{-4} à 0 cycle et 2.10^{-4} après 2 cycles). Le sens de variation de τ_c s'inverse de 2 à 6 cycles avec une augmentation jusqu'à 300 Pa. Le coefficient d'érosion décroît lui aussi avec ces sollicitations ce qui conforte l'observation d'une augmentation de la résistance à l'érosion entre 2 et 6 cycles. Cette résistance décroît de nouveau de 6 à 12 cycles car le τ_c décroît jusqu'à 50 Pa.

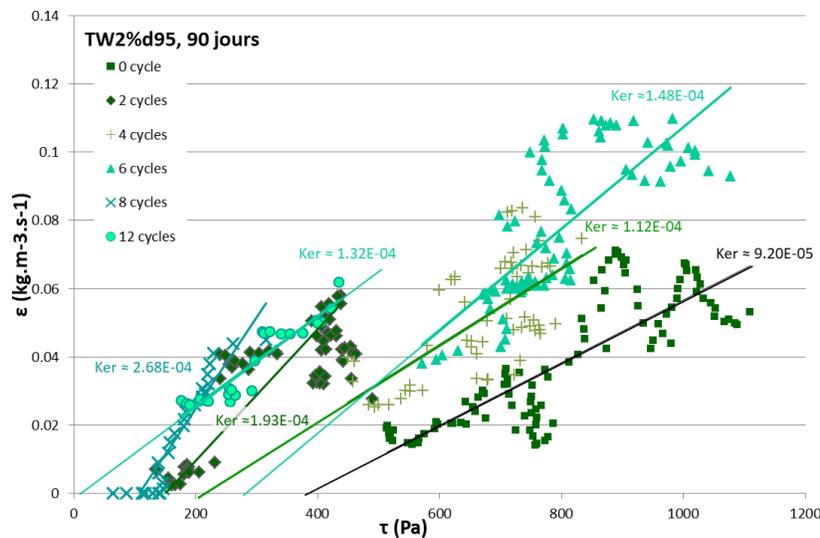


Figure III.18 : Moyennes comparées des essais d'érosion HET pour le matériau TW2%d95, après 90 jours et un nombre croissant de cycles hydriques.

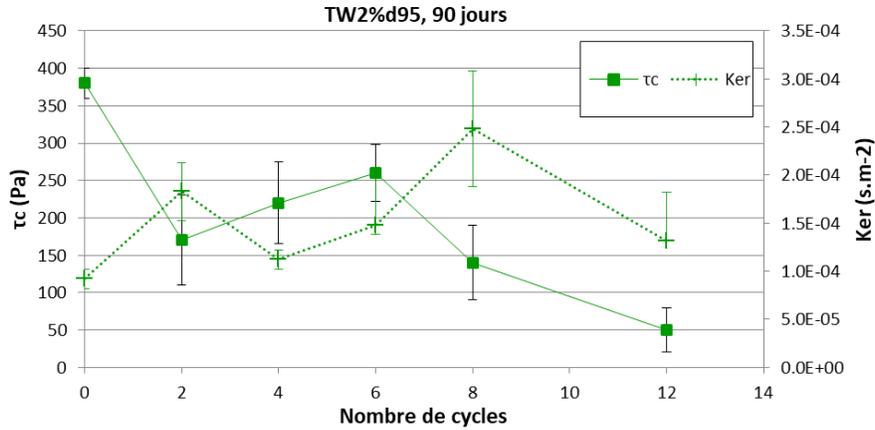


Figure III.19 : Synthèse des valeurs des contraintes de cisaillement critique et du coefficient d'érosion en fonction du nombre de cycles pour le matériau TW2%d95.

D'après la classification de Wan et Fell, les cycles hydriques provoquent le passage d'une érosion modérément lente à modérément rapide (Tableau III.5). Dans la classification de Briaud, le matériau à l'état initial est classé comme faiblement érodable et comme modérément érodable après 12 cycles. Sa résistance à l'érosion se rapproche de celle du sol non traité (Figure III.20).

Tableau III.5 : Valeur du coefficient $I_{HET} = -\log(Ker)$, et description de l'érosion d'après la classification de Wan & Fell (2002) en fonction du nombre de cycle pour le matériau TW2%d95

Cycles appliqués	0	2	4	6	8	12	Sol non traité (0 cycle)
I_{HET}	4,03	3,71	3,95	3,82	3,57	3,57	2.95
Description de l'érosion : classification de Wan & Fell	Modérément lent	Modérément rapide	Très rapide				

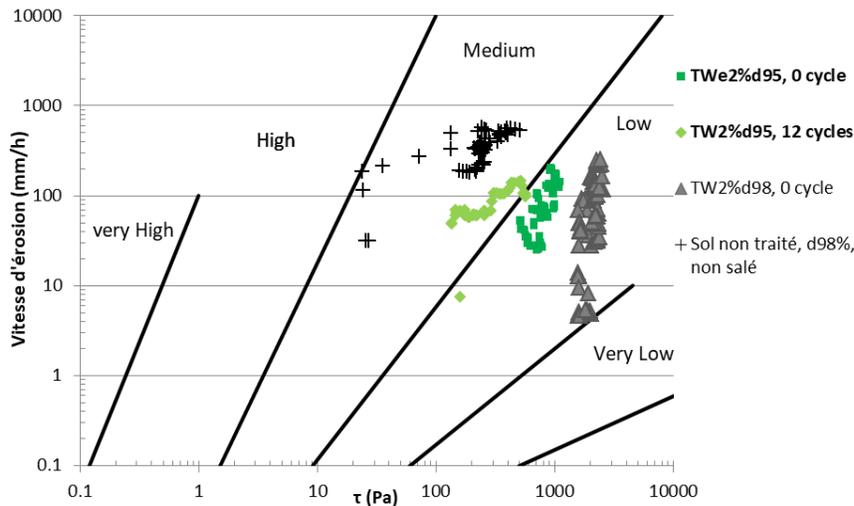


Figure III.20 : Projection des essais HET après 0 et 12 cycles pour le matériau TW2%d95 après 90 jours de cure, dans la classification de l'érosion de Briaud et al (2002).

III.2.1.5. Comparaison des résistances à l'érosion des différents matériaux

Il a été vu que la résistance à l'érosion varie pour tous les matériaux en fonction du nombre de cycles hydriques appliqués. A l'état initial (0 cycle) la résistance à l'érosion dépend de la formulation et de la densité du matériau (Figure III.21).

Les matériaux salés (SW2%d98) et non salés (TW2%d98) ont une résistance à l'érosion très proche, avec cependant une résistance légèrement supérieure pour le matériau salé dont la valeur de τ_c égale à 1600Pa est de 10% supérieure à celle du matériau non salé. De plus, le coefficient d'érosion du matériau salé est 20% inférieur à celui du matériau non salé.

La diminution du traitement à la chaux de moitié (TW1%d98) par rapport au matériau de référence TW2%d98 entraîne une chute de τ_c de 250%. Cette même chute est observée avec la diminution de masse volumique de 98% de l'OPN à 95% de l'OPN (soit ici une baisse de 74 kg.m^{-3}). Par rapport au matériau de référence TW2%d98, le coefficient d'érosion lui augmente de 30% quand le dosage en chaux diminue de moitié, et il augmente de 50% lorsque la masse volumique chute de 98% de l'OPN à 95%. La teneur en chaux et la densité sont donc des paramètres déterminants pour la résistance à l'érosion des sols traités à la chaux. En l'absence de sollicitations environnementales (cycles), plus la teneur en chaux et la densité sont élevées, plus le matériau est résistant à l'érosion. La salinité du sol semble être favorable par rapport à la résistance à l'érosion ce qui confirme les travaux de Haghghi (2012) mais dans le cas d'un sol traité à la chaux.

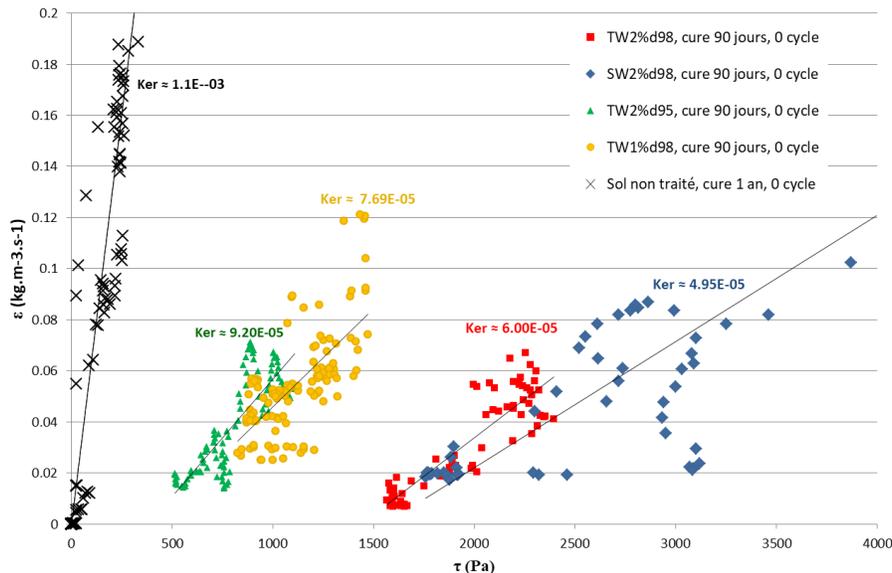


Figure III.21 : Résultats comparés des essais d'érosion HET pour les différents matériaux, après 90 jours de cure.

L'évolution du coefficient d'érosion k_{er} en fonction de la contrainte critique τ_c et du nombre de cycles (Figure III.22) présente une cinétique différente en fonction du matériau. Le matériau traité à 1% de

chaux a les coefficients d'érosion les plus élevés quel que soit le nombre de cycles appliqués, et pour lequel la vitesse d'augmentation du coefficient d'érosion avec le nombre de cycles est la plus élevée. Le matériau TW1%d98 est le matériau le moins durable vis-à-vis de la résistance à l'érosion. Le comportement du matériau traité à 2% de chaux et compacté à 95% de l'OPN, TW2%d95, a un comportement proche de celui traité à 1% de chaux, avec la même gamme de variation des valeurs de τ_c et une vitesse d'évolution de k_{er} en fonction de τ_c . En revanche les valeurs de k_{er} du matériau TW2%d95 sont inférieures à celles du TW1%d98. Le matériau traité à 1% de chaux est donc celui dont l'érosion est la plus rapide. Une baisse de teneur en chaux est plus dommageable vis-à-vis de la résistance à l'érosion qu'une baisse de la densité.

Le matériau de référence TW2%d98 est celui pour lequel les 6 premiers cycles de séchage-humidification ont le moins de conséquence sur la valeur de τ_c . En revanche, le coefficient d'érosion et donc la vitesse d'érosion du matériau est plus grande dans le cas du matériau de référence que dans le cas du sol salé traité à la chaux dans les mêmes proportions (SW2%d98). De plus, la vitesse d'évolution de k_{er} en fonction de τ_c est également plus grande pour TW2%d98 par rapport à SW2%d98 ce qui montre que la résistance à l'érosion se dégrade plus vite lorsque le sol traité ne contient pas de sel avant le traitement à la chaux. La salinité du sol est donc un avantage vis-à-vis de durabilité au regard de la résistance à l'érosion de conduit.

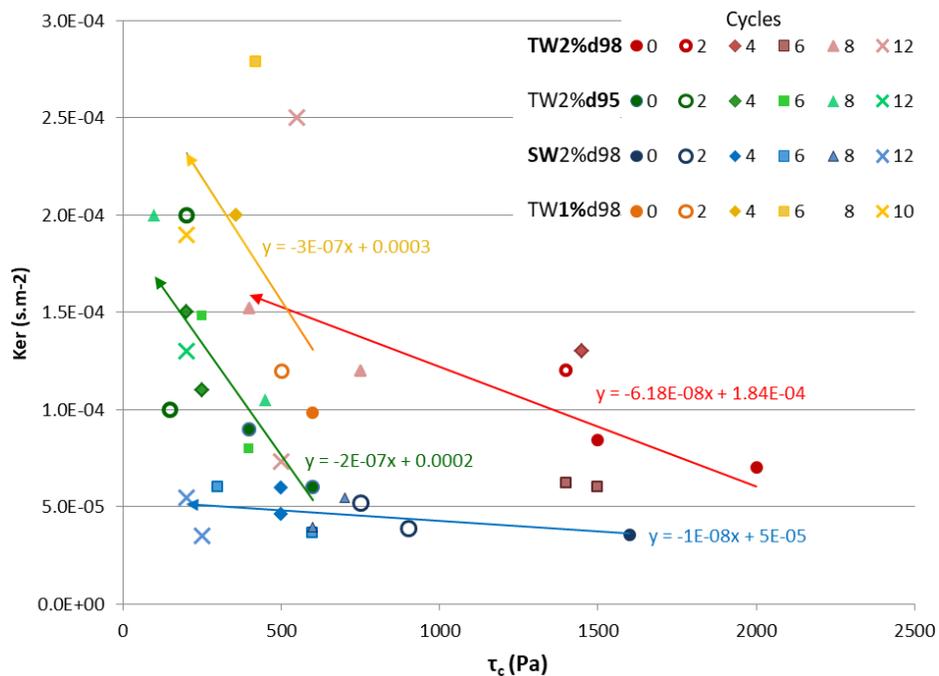


Figure III.22 : $k_{er} = f(\tau_c)$ pour les 4 matériaux étudiés après 0 à 12 cycles de séchage-humidification à l'eau de mer. Le sens des flèches indique la tendance d'évolution des paramètres de l'érosion avec l'augmentation du nombre de cycles.

III.2.1.6. Conclusion

Les cycles hydriques à l'eau de mer, appliqués après 90 jours de cure, dégradent la résistance à l'érosion du limon traité à la chaux mais cette résistance reste supérieure à celle du limon non traité. Cela est vrai jusqu'à au moins 12 cycles quel que soit le taux de traitement et de compactage des matériaux. Cependant tous les matériaux étudiés soumis aux cycles hydriques ne présentent pas la même résistance à l'érosion. Au vu de l'ensemble des résultats, nous pouvons conclure que les paramètres qui améliorent le plus la résistance à l'érosion à l'issue de la cure, et qui limitent le plus la dégradation de cette propriété lorsque le matériau est soumis aux cycles hydriques à l'eau de mer sont, par ordre d'importance: **la teneur en chaux élevée ; la densité élevée ; la salinité initiale du sol avant traitement.**

Nous cherchons maintenant à quantifier l'effet du temps de cure sur la vitesse de dégradation de la résistance à l'érosion lors des cycles hydriques.

III.2.2. Effet du temps de cure sur l'évolution des lois d'érosion

Les essais d'érosion interne dont les résultats sont présentés dans cette sous-partie, sont réalisés sur des échantillons dont les temps de cure est de 1an, qui ont subi entre 0 et 6 cycles hydriques à l'eau de mer. L'objectif de ces mesures est de déterminer le gain de résistance apporté par une cure d'une durée supérieure à 90 jours et, si cette cure plus longue provoque un changement dans la vitesse de décroissance de la résistance à l'érosion avec les cycles hydriques.

La Figure III.23 présente pour la comparaison des paramètres de l'érosion (τ_c et k_{er}) pour chaque matériau en fonction du temps de cure (en couleur = cure 90 jours ; en noir = cure 1an) et du nombre de cycles appliqués. Les résultats détaillés des essais à 1 an sont présentés dans l'Annexe 3.

Deux types de comportement se distinguent :

- Les sols traités préparés à l'eau douce :

Le paramètre τ_c augmente de 250 à 400 Pa entre 90 jours et 1an mais chute plus rapidement lors de l'application des cycles hydriques à 1 an qu'à 90 jours. Après 6 cycles la valeur de τ_c est plus faible de 100 à 400 Pa pour les matériaux dont la cure est de 1 an plutôt que 90 jours. Cette conclusion doit être modérée par l'augmentation de la durée de la cure au-delà de 90 jours. Le coefficient d'érosion k_{er} à 0 cycle est plus élevé d'environ $2.10^{-5} \text{ s.m}^{-2}$, mais augmente moins vite avec le nombre de cycles, après 1 an de cure qu'après 90 jours. Après 6 cycles la différence de k_{er} en fonction du temps de cure est inférieure à $5.10^{-5} \text{ s.m}^{-2}$. Cette différence est faible devant les valeurs k_{er} .

- Le sol traité préparé avec de l'eau de mer :

La valeur de τ_c est identique à 90 jours et 1 an, mais la vitesse de décroissance avec les cycles est plus faible à 1 an qu'à 90 jours. Après 6, la valeur de τ_c est supérieure de 200 Pa dans le cas d'une cure de 1 an contre une cure de 90 jours (respectivement 600 Pa et 400 Pa). Le coefficient d'érosion k_{er} à 0 cycle est plus élevé d'environ 10^{-5} s.m^{-2} (soit 20% de la valeur à 0 cycle après 90 jours) et augmente plus vite avec les cycles après 1 an de cure plutôt que 90 jours. Cependant les valeurs de k_{er} reste significativement plus basses que dans le cas des matériaux TW1% $\text{d}98$ et TW2% $\text{d}95$.

Au vu de l'ensemble de ces observations l'augmentation du temps de cure améliore la résistance à l'érosion uniquement si le matériau ne subit pas de cycles hydriques et qu'il a été préparé avec de l'eau douce. L'évaluation de la durabilité doit considérer les propriétés des matériaux après les cycles hydriques à l'eau de mer qui représentent les sollicitations environnementales s'appliquant sur une digue maritime. La conclusion est donc que le temps de cure n'améliore pas de manière significative la durabilité des matériaux traités à la chaux soumis à un environnement marin. L'indice I_{HET} de la classification de Wan & Fell (Annexe 4) qui illustre bien l'invariance de l'érodabilité avec le temps de cure lorsque les effets de l'environnement sont pris en compte.

Les résistances relatives des différents matériaux ne dépendent pas non plus du temps de cure. Les conclusions restent les mêmes après 90 jours ou 1 an de cure (voir III.1.1.6).

Une hypothèse est formulée pour expliquer ces comportements. L'augmentation du temps de cure fait augmenter la quantité de composés cimentaires ce qui augmente la cohésion des particules. La contrainte nécessaire à leur arrachement est donc plus importante. C'est ce que l'on observe en l'absence de cycles. Dans le cas du matériau préparé avec de l'eau salée nous avons vu dans la bibliographie que le sel agit comme un accélérateur de prise, la quantité de composés pouzzolaniques serait donc déjà au maximum atteignable pour une quantité de chaux donnée et par conséquent aucune différence n'apparaît si la cure dépasse 90 jours. Les matériaux, à l'exception de celui contenant initialement de l'eau de mer, seraient donc plus rigides après 1 an de cure qu'après 90 jours de cure. Lors des phases de séchage, les forces de succion provoqueraient une microfissuration du matériau qui faciliterait la pénétration de l'eau lors de phases d'humidification et accélérerait la dissolution des composés cimentaires surnuméraires dans le matériau à 1 an. Par la suite, nous chercherons à vérifier cette hypothèse avec l'analyse de la répartition de la porosité par des mesures en porosimétrie au mercure. Si cette microfissuration est avérée, une nouvelle famille de pore doit être visible après les cycles hydriques dans les matériaux dont la cure est de 1 an.

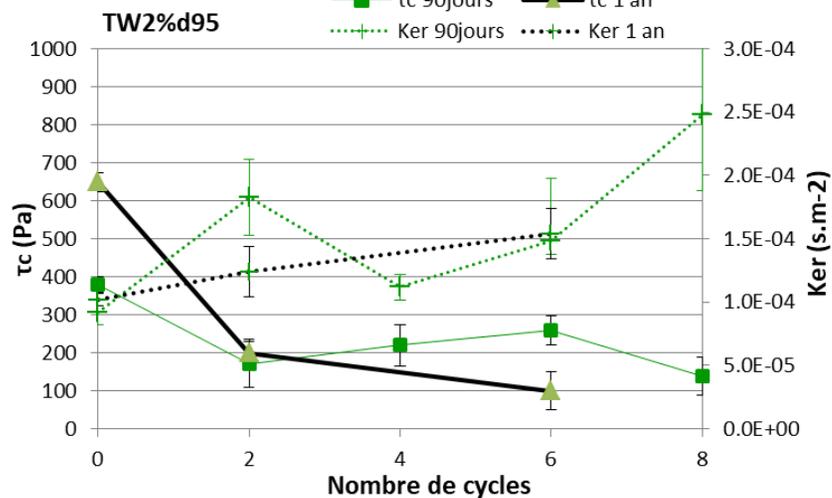
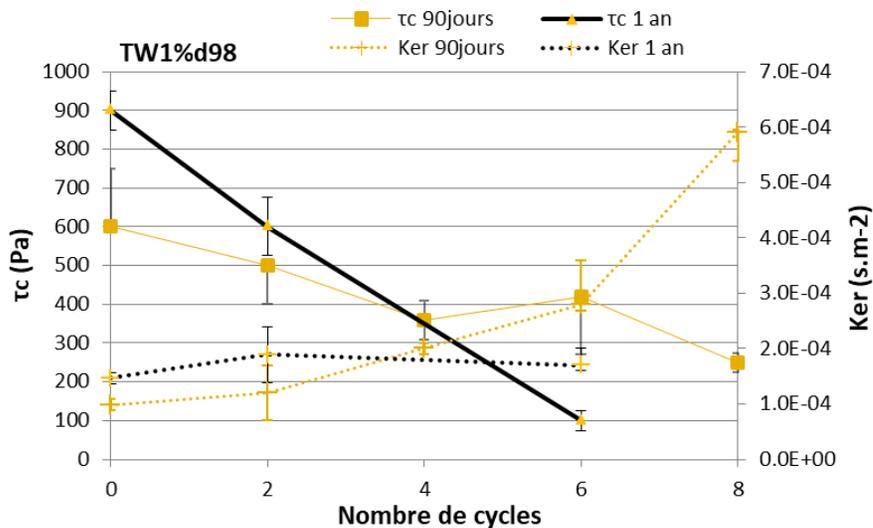
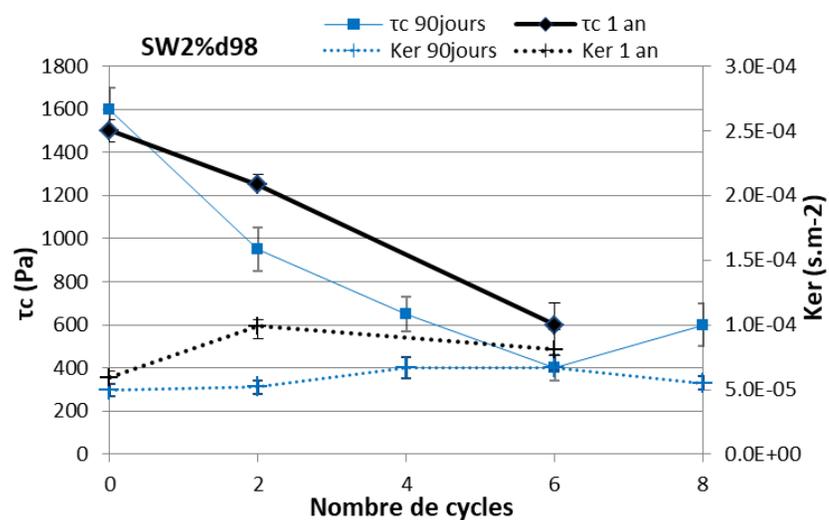
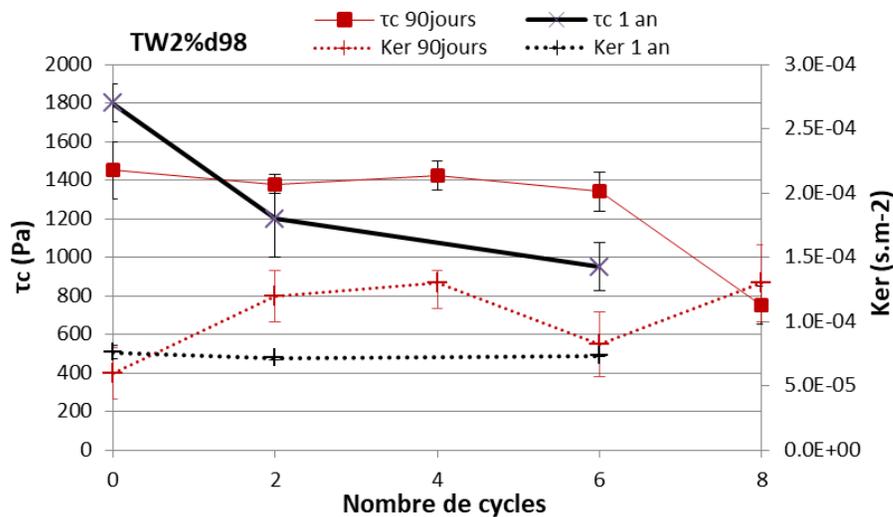


Figure III.23 : Comparaison pour les 4 matériaux traité à la chaux de l'évolution des paramètres de l'érosion k_{er} et τ_c avec les cycles en fonction du temps de cure.

III.2.3. Conclusion sur la résistance à l'érosion de conduit du sol traité à la chaux

L'étude de l'érosion interne confirme que le traitement à la chaux augmente la résistance à l'érosion par rapport au limon non traité. Dans la classification de Wan & Fell (2002) le limon non traité est dans le groupe « 2 » qualifiant une érosion « très rapide » tandis que le limon traité à la chaux appartient à la catégorie « 4 » avec une érosion « modérément lente ». Les cycles hydriques à l'eau de mer dégradent la résistance à l'érosion du limon traité à la chaux mais cette résistance reste supérieure à celle du limon non traité. Après les cycles hydriques l'érosion peut être désignée comme « modérément rapide » (catégorie « 3 » de la classification de Wan & Fell). Le matériau préparé avec de l'eau de mer (SW2%d98) fait figure d'exception et conserve une érosion « modérément lente » quel que soit le nombre de cycles appliqués en raison de son coefficient d'érosion constant malgré les cycles et environ trois fois plus faible que pour les limons non salés. La salinité du sol est donc favorable en termes de résistance à l'érosion et de durabilité du matériau.

La classification de l'érosion des sols de Briaud est plus optimiste que celle de Wan & Fell. Dans la première, l'érodabilité du sol traité est qualifiée de « faible » à « modérée » pour les matériaux traités selon leur formulation, leur densité et les nombres de cycles subis, et de « modérée » à la limite de « forte » pour les matériaux non traités. Cette classification discrimine mieux la différence de vitesse d'érosion entre les différents cycles puisqu'elle prend en compte les contraintes de cisaillement. Or c'est la contrainte de cisaillement critique τ_c qui est le paramètre le plus affecté par les cycles hydriques quelles que soit la formulation et la densité des matériaux traités à la chaux. La contrainte τ_c chute de 60 à 80% de sa valeur initiale après les 12 cycles hydriques, tandis que la variation du coefficient d'érosion k_{er} n'est que de +30 % en moyenne (ou 10% pour SW2%d98).

Le matériau le plus durable vis-à-vis de ce phénomène d'érosion est celui contenant du sel (SW2%d98), suivi du matériau de référence (TW2%d98). La baisse de la densité du matériau et plus encore la baisse de la teneur en chaux diminue la résistance à l'érosion donc la durabilité du matériau. Une analyse quantitative comparée de l'érosion des différents matériaux par rapport au matériau de référence est faite dans le chapitre 5.

L'augmentation du temps de cure entre 90 jours et 1 an augmente en valeur absolue la contrainte de cisaillement critique τ_c avant les cycles, mais dès le second cycle τ_c a la même valeur quel que soit le temps de cure. Le coefficient k_{er} n'est pas modifié lors de l'augmentation du temps de cure. La durabilité

vis-à-vis de l'érosion interne ne dépend donc pas du temps de cure, du moins au-delà de 90 jours de cure.

L'essai d'érosion de conduit (HET) caractérise l'érosion pour des contraintes hydrauliques tangentielles à l'interface sol-eau. Sur les matériaux à la surface d'une digue maritime, les contraintes exercées par les vagues peuvent être perpendiculaires à la surface. Il est donc nécessaire d'évaluer la résistance à l'érosion des sols traités à la chaux dans cette configuration-là. L'érosion est alors caractérisée par l'essai d'érosion à jet mobile.

III.3. Evaluation de la durabilité vis à vis de la résistance à l'érosion externe

La durabilité vis à vis de l'érosion externe est évaluée par l'essai Mobile Erosion JET (MoJET). Le même protocole d'essai est appliqué sur tous les échantillons. La grandeur des résultats présentés et comparés est la masse cumulée de sol érodé au cours des essais. On considère que cette massée érodée est représentative de la sensibilité à l'érosion. Les paramètres variant entre les essais sont le temps de cure, le nombre de cycles hydriques, et la présence ou non d'eau de mer dans le sol au moment du traitement à la chaux. La teneur en chaux est de 2 %. La masse volumique sèche de tous les échantillons testés est de $1,57 \pm 4 \cdot 10^{-2} \text{ g/cm}^3$. La nomenclature des échantillons pour cette partie n'est pas la même que pour l'ensemble des autres échantillons de cette thèse en raison de mode du compactage différent (compression statique) et de la densité obtenue plus faible que pour le reste des études. La teneur en eau des échantillons à l'issue de la cure est de $18 \pm 1 \%$. A l'issue des cycles hydriques, la teneur en eau étant difficile à contrôler, la teneur en eau des matériaux est indiquée pour chaque essai.

Dans un premier temps sont présentés les résultats des essais en fonction du temps de cure des matériaux, en l'absence de sollicitations hydriques. Dans une seconde partie sont présentées les conséquences des cycles hydriques à l'eau de mer sur l'érodabilité du matériau en fonction du temps de cure.

III.3.1. Conséquence cycles hydriques à l'eau de mer sur la résistance à l'érosion externe.

Les cycles hydriques sont appliqués après 28 jours, 90 jours et 1 an de cure.

III.3.1.1. Cas du matériau « Chaux 2% + eau douce »

- Cycles après 28 jours de cure (Figure III.24)

Il n'y a pas de différence claire entre la masse érodée en l'absence de cycle et après 2 cycles. La teneur en eau de l'échantillon semble avoir plus d'importance que le nombre de cycles appliqués. La quantité de

sol érodé est d'autant plus grande que la teneur en eau est faible. En tenant compte de cette observation, on remarque que la masse érodée après deux cycles pour une teneur en eau de 21 % est la même que celle en l'absence de cycle pour une teneur en eau de 19,1 %, ce qui laisse supposer que la masse érodée après deux cycles serait supérieure à celle en l'absence de cycle pour une même teneur en eau. La qualité des données n'est cependant pas suffisante pour conclure.

Par des observations visuelles (Figure III.25), il est constaté qu'une croûte épaisse et blanche d'environ 1 mm s'est formée à la surface du matériau ayant subi les cycles hydriques. Cette couche n'est pas présente de la même manière sur les deux échantillons testés. Cette croûte protège de matériau de l'érosion.

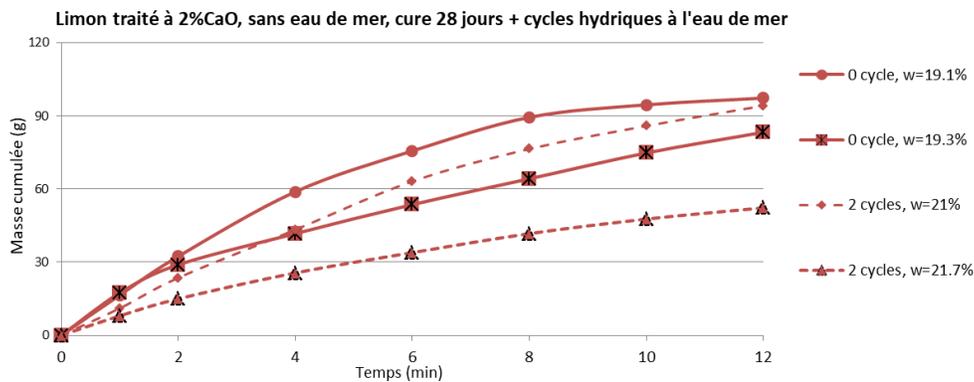


Figure III.24 : Masse cumulée du sol érodé au cours de l'essai MOJET, après 28 jours de cure, avec et sans cycles hydriques.

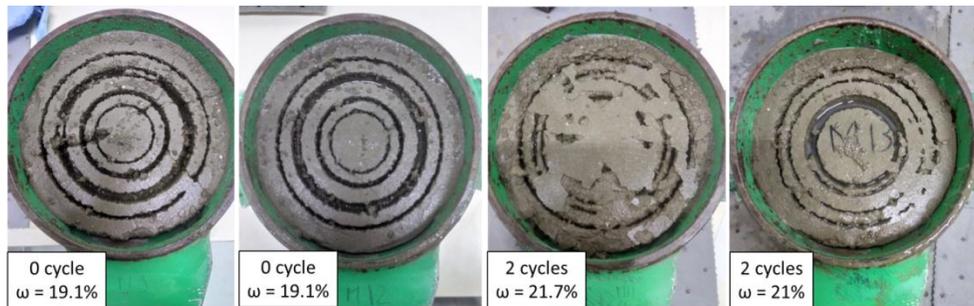


Figure III.25 : Photographie des échantillons à l'issue des essais MOJET. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.24.

- Cycles après 90 jours de cure (Figure III.26)

Les teneurs en eau des échantillons sont ici aussi très variables entre les essais ce qui complique fortement l'interprétation. L'unique mesure à deux cycles n'est pas interprétable, en revanche à 4 cycles la masse de sol érodé est supérieure à celle à 0 cycle alors que la teneur en eau est de 3 % supérieure. L'application de 4 cycles hydriques semble dégrader la résistance à l'érosion externe du sol. A l'inverse après 6 cycles, pour une même teneur en eau qu'à 0 cycle, la masse érodée finale est de d'environ 20 g inférieure à celle correspondant aux essais à 0 cycle. L'observation visuelle (Figure III.27) montre la formation d'une croûte en surface de l'échantillon. Cette croûte contient entre autre du chlorure de

sodium cristallisé (NaCl). La formation de cette croûte superficielle augmente donc la résistance à l'érosion externe du matériau. La résistance à l'érosion externe semble donc augmenter avec le nombre de cycle séchage-humidification à l'eau de mer.

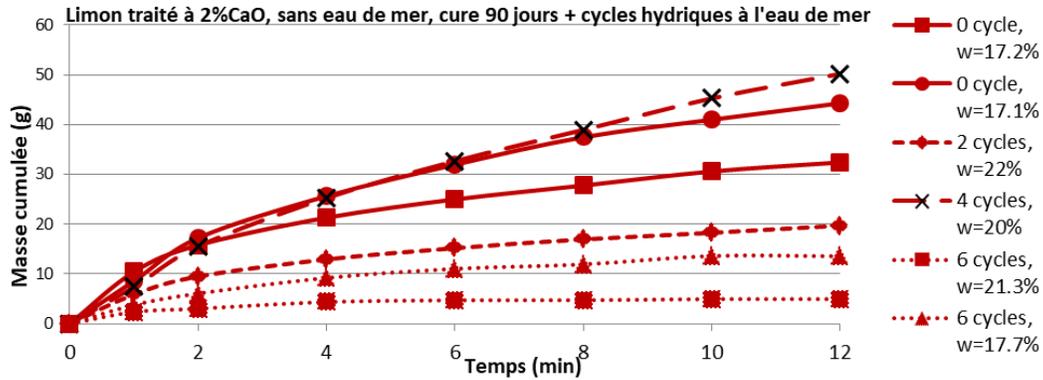


Figure III.26 : Masse cumulée du sol érodé au cours de l'essai MOJET, après 90 jours de cure, de 0 à 6 cycles hydriques.

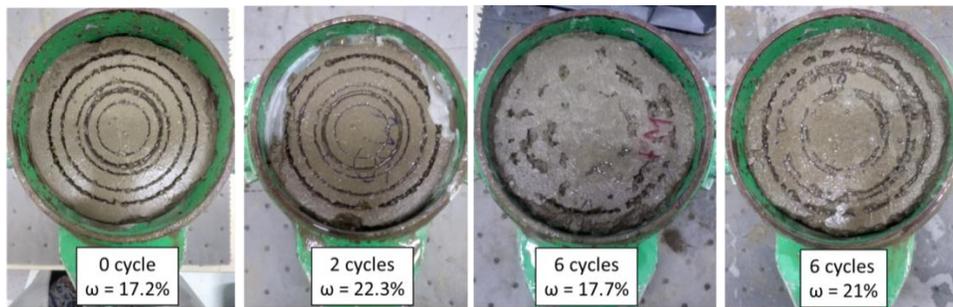


Figure III.27 : Photographie des échantillons à l'issue des essais MOJET. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.26.

- Cycles après 1 an de cure (Figure III.28)

Pour les échantillons après 1 an de cure, la masse érodée en l'absence de cycle est d'environ 10 g, soit environ trois fois inférieure à la masse érodée des échantillons à 90 jours de cure, et 8 fois inférieure à la masse érodée à 28 jours. En revanche, dans le cas d'une cure de 1 an, l'érosion est plus importante après l'application des cycles, ce qui n'est pas le cas pour des cures moins longues. La variabilité de la teneur en eau entre l'échantillon à 2 et 4 cycles ne permet pas de conclure à un sens de variation de l'érosion avec le nombre de cycles appliqués. La masse érodée après 2 ou 4 cycles est d'environ 25 ± 10 g soit une valeur proche de la masse érodée après 2 à 6 cycles pour une cure de 90 jours. La croûte superficielle observée précédemment à l'issue des cycles (Figure III.25 & Figure III.27) est également visible ici (Figure III.29).

Remarque : L'échantillon « 2 cycles w=15.9 % » présente une érosion de plus de 60 g mais l'observation de l'échantillon à l'issue de l'essai montre que l'érosion est localisée sur le bord de l'échantillon et non

pas à la verticale des jets, témoignant d'un endommagement non contrôlé du matériau sur ses bords (Figure III.29). Cet essai n'est pas pris en compte dans l'interprétation.

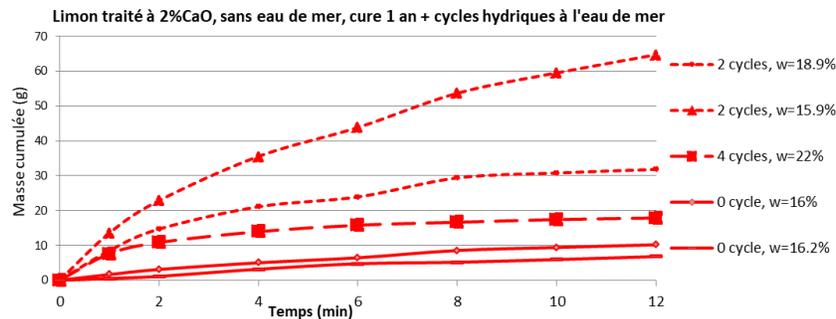


Figure III.28 : Masse cumulée du sol érodé au cours de l'essai MOJET, après 1 an de cure, de 0 à 4 cycles hydriques.

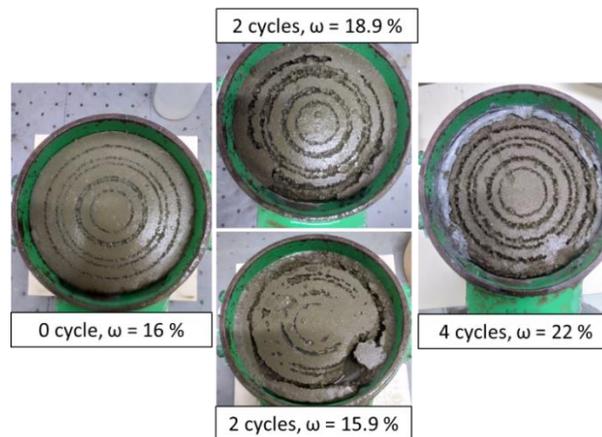


Figure III.29 : Photographie des échantillons à l'issue des essais MOJET. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.28.

- Conclusion partielle

Les essais à 28 jours ne permettent pas de conclure sur le sens de variation de la résistance à l'érosion consécutive aux cycles.

Lors des essais à 90 jours, il semblerait que les cycles hydriques augmentent la résistance à l'érosion. Cependant les variations de teneur en eau entre les échantillons testés pourraient également expliquer les variations de masse érodée. Un troisième phénomène intervient, la formation d'une croûte superficielle plus résistante à l'érosion mais très fine (≈ 2 mm) contenant des sels précipités. Notre hypothèse est que cette croûte se formerait lors des phases de séchage par la migration des ions vers la surface. Ces ions précipitent alors en surface et ne sont pas re-dissouts lors des phases d'humidification. L'augmentation du nombre de cycles semble augmenter l'occurrence d'apparition de cette croûte mais sa présence n'est pas systématique et nous n'avons actuellement pas l'explication de l'origine de cette variabilité.

Lors des essais après 1 an, les cycles hydriques semblent avoir un effet inverse à celui sur les matériaux à 90 jours, avec une augmentation de l'érosion en fonction de l'augmentation du nombre de cycle. Cependant encore une fois les variations importantes de teneur en eau entre les échantillons testés (teneur en eau comprise entre 15% et 22%) ne permettent pas de conclure sur les variations relatives de la résistance à l'érosion en fonction des cycles.

III.3.1.2. Cas du matériau « Chaux 2% + eau de mer »

- Cycles après 28 jours de cure (Figure III.30)

La cinétique d'érosion et la masse érodée totale ne varient pas significativement entre les échantillons cyclés deux fois et non cyclés lorsque les teneurs en eau sont proches à $\pm 1\%$. La masse érodée totale est de $50 \pm 5\text{g}$ pour des teneurs en eau de $19 \pm 1\%$. L'érosion de l'échantillon après 2 cycles, à 22 % de teneur en eau est plus lente, et la masse érodée totale est de 20 g inférieure à l'échantillon dont la teneur en eau est de 18% et ayant subi le même nombre de cycles. Dans le cas de l'échantillon à 22 % de teneur en eau après 2 cycles, une croûte superficielle est présente (Figure III.31), et comme vu précédemment, cette croûte limite l'érosion du sol. L'effet de la teneur en eau plus élevée (22 % contre 18 %) pourrait également expliquer les variations de masse érodée. Par conséquent, il n'est pas possible de conclure à partir de nos résultats sur l'effet des cycles hydriques sur l'érosion du matériau SW2% ω 98 âgé de 28 jours.

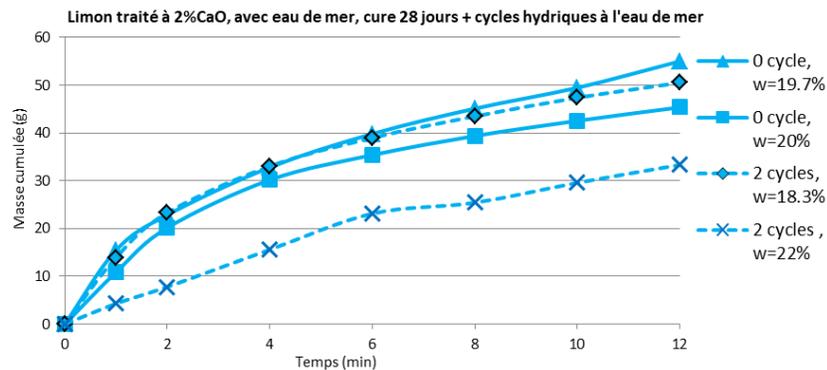


Figure III.30 : Masse cumulée du sol érodé au cours de l'essai MOJET, après 28 jours de cure, avec et sans cycles hydriques. Le matériau est traité à 2% de chaux et préparé avec de l'eau de mer.

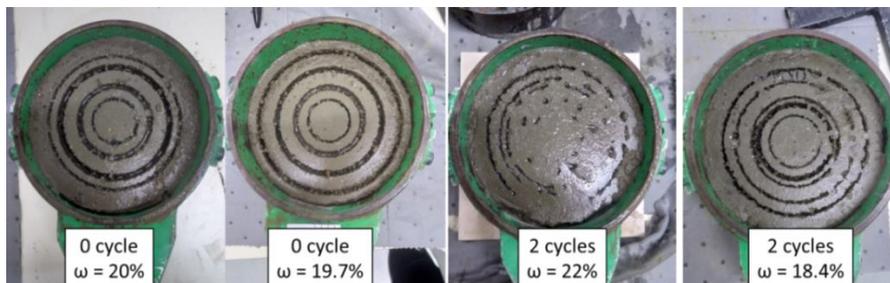


Figure III.31 : Photographie des échantillons à l'issue des essais MOJET. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.30.

- Cycles après 90 jours de cure (Figure III.32)

Après 90 jours de cure la masse érodée pour le matériau en l'absence de cycles est de 24 à 33 g en fonction des échantillons. Les cycles hydriques à l'eau de mer font baisser la masse érodée autour de 15 à 25 g en considérant uniquement les matériaux dont la teneur en eau au moment de l'essai est de $21 \pm 1\%$. Il n'apparaît pas un sens de variation claire de la masse érodée avec le nombre de cycle. La masse érodée semble dépendre à la fois de la formation ou non d'une croûte superficielle (Figure III.33) et de la teneur en eau. L'échantillon dont la teneur en eau est de 25 % est celui le moins érodable, avec une masse érodée finale de 7 g.

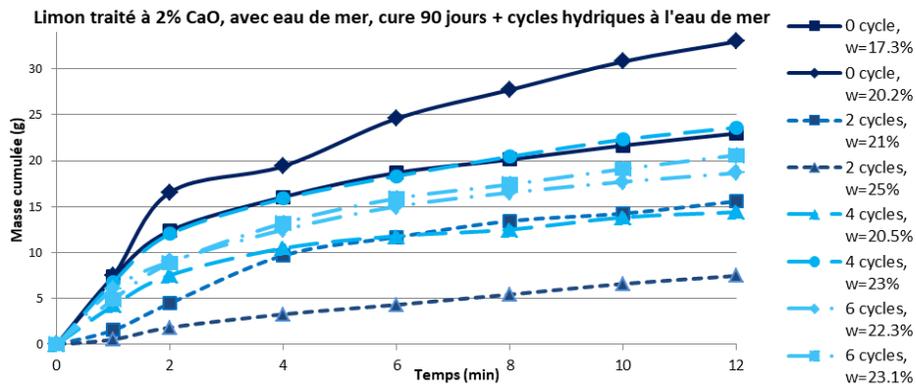


Figure III.32 : Masse cumulée du sol érodé au cours de l'essai MOJET, après 90 jours de cure, avec et sans cycles hydriques. Le matériau est traité à 2% de chaux et préparé avec de l'eau de mer.

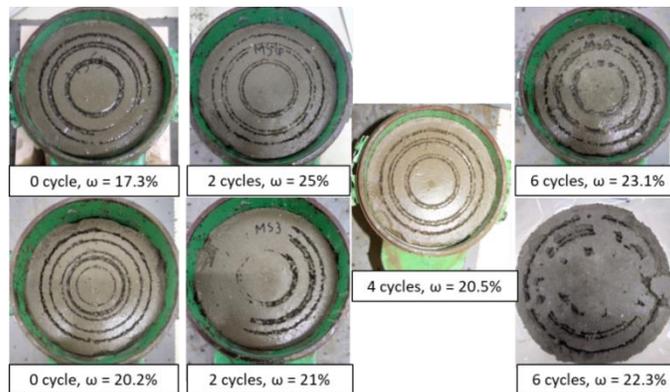


Figure III.33: Photographie des échantillons à l'issue des essais MOJET. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.32.

III.3.1.3. Conclusion sur l'effet des cycles hydrique à l'eau de mer sur la résistance à l'érosion externe.

La teneur en eau des échantillons et la présence ou non d'une croûte superficielle contrôle la masse de sol érodé lors des essais, de manière prépondérante par rapport au nombre de cycles hydriques réalisés. Plus la teneur en eau du matériau est faible, plus l'érosion est importante. La présence de la croûte superficielle limite fortement l'érosion externe.

L'apparition de la croûte est cependant liée à l'augmentation de la salinité du sol suite à l'humidification à l'eau de mer. Puis, lors du séchage, la migration des ions vers la surface du matériau augmente localement la concentration en sel, jusqu'à saturation de l'eau et précipitation des ions. Les cycles à l'eau de mer seraient donc indirectement responsables de l'augmentation de la résistance à l'érosion suite aux cycles.

Cela amène à conclure à un faible impact, voir un impact positif, de l'environnement marin sur les propriétés du matériau et donc à une bonne durabilité du limon traité à la chaux vis-à-vis de l'érosion externe.

III.3.1.4. Effet sur la résistance à l'érosion de la salinité initiale du matériau

L'érodabilité est caractérisée dans notre cas d'étude par la masse érodée totale à l'issue de chaque essai pour des matériaux de même densité. Plus la masse érodée est faible, meilleure est la résistance à l'érosion. La Figure III.34 présente une comparaison des masses érodées lors des essais en fonction de la présence ou non d'eau de mer lors de la préparation des matériaux (traitement à la chaux et compactage). Aucune tendance ne se dégage, et la forte disparité de teneur en eau ne permet pas de conclure quant à l'influence de la salinité initiale sur la résistance à l'érosion externe à la suite des sollicitations environnementales.

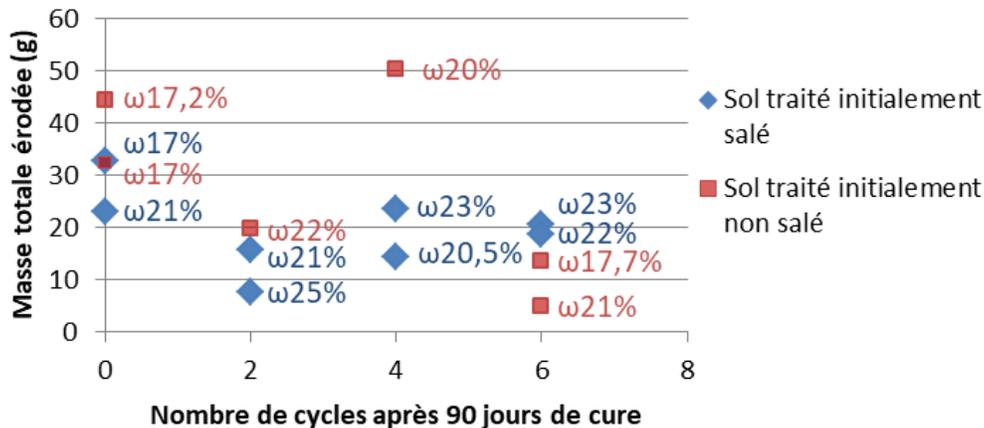


Figure III.34 : Comparaison des masses érodées totales au cours des essais MoJET à 90 jours en fonction de la salinité initiale du sol et du nombre de cycles hydriques à l'eau de mer appliqués. Les étiquettes à côté des points indiquent la teneur en eau.

III.3.2. Effet du temps de cure sur la résistance à l'érosion externe

Les essais sont menés après 28, 90 et 365 jours de cure, sans cycles hydriques appliqués.

- Sol traité à 2% de chaux, sans eau de mer (Figure III.35)

La masse totale érodée pour le sol traité après 1 an de cure est de 10 g contre 700 g pour le sol non traité, soit un écart relatif de 98 %. Le traitement à la chaux apporte donc un gain majeur de résistance à

l'érosion externe. Pour des temps de cure plus courts, le sol traité est également bien plus résistant à l'érosion que le sol non traité. A 28 jours la masse érodée est de 100 g, à 90 jours elle est de 30 g. L'amélioration de la résistance à l'érosion est plus grande entre 28 et 90 jours de cure qu'entre 90 jours et 1 an, ce qui concorde avec un développement rapide des réactions pouzzolaniques au début de la cure qui apporte de la cohésion entre les particules du sol, et donc limite l'érosion, puis un ralentissement de ces réactions et une cohésion du matériau qui évolue peu. Les photos (Figure III.37) montrent une désagrégation de moins en moins importante du sol avec le temps de cure.

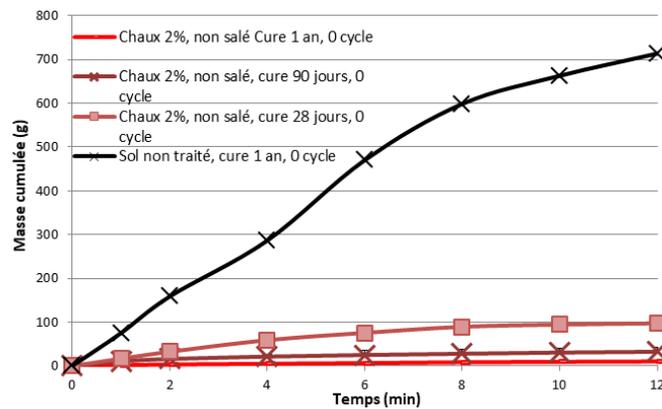


Figure III.35 : Masse cumulée de sol érodé au cours de l'essai MOJET (temps d'essai 12 min), en fonction du temps de cure et de la présence d'un traitement à la chaux, pour un sol ne contenant pas d'eau de mer. Pour les matériaux traités à la chaux, deux essais sont réalisés dans chaque cas mais la variabilité des résultats est inférieure à la taille des points sur le graphique.

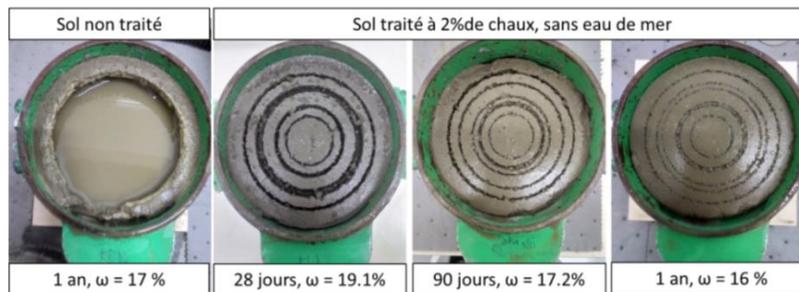


Figure III.36 : Photographies des échantillons à l'issue des essais MOJET, en fonction du temps de cure. Comparaison avec le sol non traité. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.35.

- Sol traité à 2% de chaux, avec eau de mer (Figure III.37)

La masse totale érodée pour le sol traité après 1 an de cure est de 3 g contre 700 g pour le sol non traité, soit un écart relatif de 99 %. Pour des temps de cure plus courts, le sol traité est également bien plus résistant à l'érosion que le sol non traité. A 28 jours la masse érodée est de 45g, à 90 jours elle est de 23g.

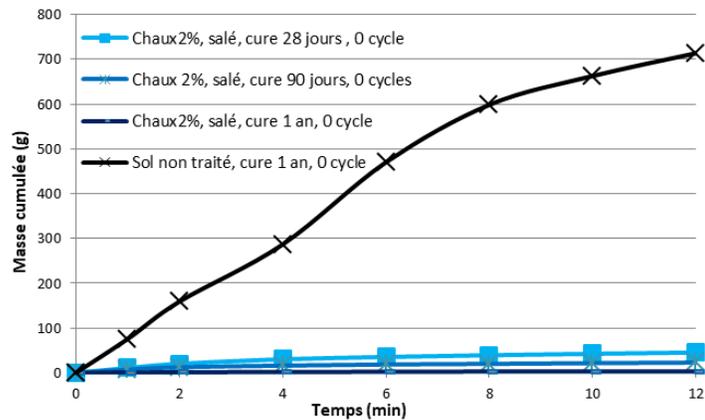


Figure III.37 : Masse cumulée de sol érodé au cours de l'essai MOJET (temps d'essai 12 min), en fonction du temps de cure et de la présence d'un traitement à la chaux, pour un sol contenant de l'eau de mer. Pour les matériaux traités à la chaux, deux essais sont réalisés dans chaque cas mais la variabilité des résultats est inférieure à la taille des points sur le graphique.

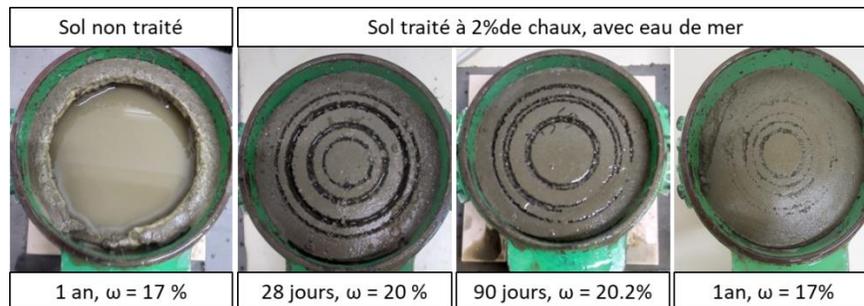


Figure III.38 : Photographie des échantillons à l'issue des essais MOJET, en fonction du temps de cure. Comparaison avec le sol non traité. Matériau correspondant à ceux de la Figure III.37

Le sol traité à la chaux contenant de l'eau de mer SW2%d98 est moins érodable que celui n'en contenant pas TW2%d98 (Figure III.39). Après 28 jours de cure, la masse érodée est 50% inférieure pour le sol salé que pour le sol non salé. Pour des temps de cure plus long, en revanche, l'évolution de la masse érodée en fonction du temps de cure est identique. Ce résultat est un argument supplémentaire pour montrer que l'eau de mer est un accélérateur de prise à court terme. A long terme, l'amélioration de la résistance à l'érosion par l'eau de mer est plus modérée, et les modifications de la résistance à l'érosion consécutives aux cycles hydriques ne dépendent pas de la salinité initiale du sol (III.3.1.4). Ces résultats durant la cure sont en accord avec la caractérisation de l'érosion par l'essai HET qui conclut également à l'amélioration de la résistance à l'érosion lorsque le matériau contient de l'eau de mer avant le traitement à la chaux. En revanche, lors de l'application des cycles hydriques, contrairement à l'érosion interne, la salinité initiale du matériau a peu d'impact sur la résistance à l'érosion et donc sur la durabilité du limon traité à la chaux.

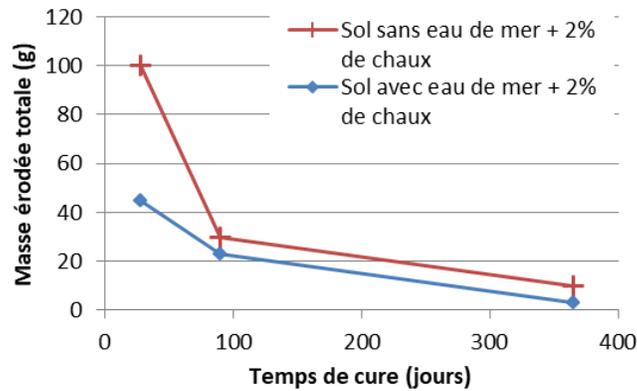


Figure III.39 : Masse érodée totale à l'issue de l'essai MoJET, en fonction du temps de cure et de la présence d'eau de mer dans le sol.

III.3.3. Conclusion sur la durabilité vis-à-vis de la résistance à l'érosion externe du limon traité à la chaux

L'étude porte sur l'effet du temps de cure, de la présence d'eau de mer au moment du traitement à la chaux, et de l'effet des cycles hydriques à l'eau de mer sur la résistance à l'érosion externe.

Le critère de résistance à l'érosion est défini comme la masse érodée à l'issue d'un essai.

La salinité du sol apporte une amélioration relative de résistance de +120% à 28 jours, + 15% à 90 jours et à 1an par rapport au sol non salé. En revanche suite aux cycles hydriques la différence de résistance entre les deux matériaux s'efface.

Les cycles de séchage-humidification à l'eau de mer ont un faible impact, voir un impact positif sur la résistance à l'érosion du matériau, peu importe sa salinité initiale. La teneur en eau des échantillons et la présence ou non d'une croûte superficielle contrôle la masse de sol érodé lors des essais, de manière prépondérante par rapport au nombre de cycles hydriques réalisés. Plus la teneur en eau du matériau est faible, plus l'érosion est importante. La présence de la croûte superficielle limite fortement l'érosion externe.

Le limon traité à la chaux présente donc une très bonne durabilité en environnement marin vis-à-vis de la résistance à l'érosion externe.

Des observations et des essais MoJET *in situ* sur l'ouvrage Digue2020 dès sa construction puis après des périodes de haut niveau d'eau contre la digue, devront être menées pour déterminer si une croûte superficielle de sels précipités se forme également à la surface du talus après une submersion. Et si oui, quantifier son épaisseur et sa continuité sur le talus pour déterminer si, comme au laboratoire, cette couche permet de limiter l'érosion externe du sol de l'ouvrage.

III.4. Caractérisation de la porosité et de son évolution

Dans cette partie, nous nous intéressons dans un premier temps à l'influence du traitement à la chaux sur la porosité du limon et son organisation. Pour cela nous proposons d'une part, une comparaison entre porosité du limon traité à la chaux et porosité du limon non traité, et d'autre part, les conséquences sur la porosité des réactions pouzzolaniques qui ont lieu durant la cure.

Dans un second temps sont présentés la conséquence des cycles hydriques sur la porosité et son organisation du limon traité à la chaux et dont la cure est de 90 jours.

III.4.1. Effet de la cure sur la porosité et son organisation

III.4.1.1. Répartition de taille des pores

La Figure III.40 présente, pour les différents matériaux, la répartition des diamètres des pores à différents temps de cure. Pour l'ensemble des matériaux traités la structure de la porosité est organisée en deux familles, contrairement à ce qui était attendu par comparaison avec les travaux de Cuisinier et al. (2011) sur le limon de St Quentin traité à la chaux, qui montre l'existence de trois familles de pores.

La famille des plus grands pores (macropores) est centrée sur $12 \pm 1 \mu\text{m}$. La taille des macropores n'évolue pas ou très peu avec le temps de cure du matériau. C'est une famille qui pourrait être réduite par un compactage par pétrissage (dans notre cas c'est un compactage dynamique) pour des teneurs en eau supérieures d'environ 3 % à la teneur en eau de l'optimal Proctor normal (Cuisinier et al., 2011). Notre matériau n'est donc pas optimal vis-à-vis de la réduction de la porosité, mais, l'absence de variation au sein de cette famille au cours du temps indique qu'elle n'est pas affectée par les réactions pouzzolaniques et donc par les propriétés spécifiquement apportées par le traitement à la chaux.

La famille des plus petits pores (micropores) est centrée, après 28 jours de cure, sur $0,95 \pm 0,05 \mu\text{m}$ pour tous les matériaux traités (sauf TW2%_{d95} pour lequel il n'y a pas de données à 28 jours). Le diamètre des micropores diminue avec le temps de cure, exception faite du matériau de plus faible densité TW2%_{d95} qui se comporte différemment. La porosité du sol non traité se répartit entre une famille centrée sur $14,5 \pm 0,5 \mu\text{m}$, et une famille centrée sur $0,75 \pm 0,05 \mu\text{m}$ et ne change pas au cours de la cure.

La répartition du diamètre des pores est identique que le sol soit initialement salé (SW2%_{d98}) ou pas (TW2%_{d98}), quel que soit le temps de cure. Ce résultat est contre intuitif nous nous attendions à une fermeture porale d'une partie des pores par la cristallisation du sel. Pour les deux matériaux, la diminution de la taille des micropores est plus importante entre 28 et 90 jours de cure, avec une

diminution d'environ 30% du diamètre initial (diamètre 90 jours $0,65 \pm 0,05 \mu\text{m}$), qu'entre 90 et 365 jours de cure, avec une diminution d'environ 10% du diamètre initial (diamètre 1 an $0,55 \pm 0,05 \mu\text{m}$).

Dans le cas du sol traité à 1% de chaux (TW1%_{d98}), la taille des micropores n'évolue pas entre 28 et 90 jours (diamètre $0,95 \pm 0,05 \mu\text{m}$), puis diminue de 40 % du diamètre initial entre 90 jours et 1 an de cure. Le diamètre des micropores après 1 an de cure est de $0,55 \pm 0,05 \mu\text{m}$, comme pour les autres matériaux de même densité (SW2%_{d98} et TW2%_{d95}).

Le sol de densité plus faible (TW2%_{d95}) présente une variation de taille des micropores dans le sens inverse des autres matériaux, avec un diamètre des pores centré sur $0,5 \mu\text{m}$ à 90 jours et sur $0,75 \mu\text{m}$ à 1 an, soit la même répartition de taille de pore que dans le cas du sol non traité. Cependant, dans le cas de ce matériau, les mesures n'ont pu être réalisées que sur un seul échantillon à chaque fois, ce qui limite la confiance dans ces données qui ne prennent pas en compte la variabilité qui existe entre les échantillons d'un même lot.

L'ensemble de ces observations témoignent du comblement progressif des micropores au cours du temps. L'hypothèse d'un comblement de la porosité par les composés cimentaires (C-A-H et C-S-H) néoformés est émise. L'évolution entre 28 et 90 jours de cure concorde avec une synthèse plus importante de composés cimentaires dans le cas d'un traitement à 2% de chaux par rapport à un traitement à 1%, qui se répercute sur les valeurs de résistance mécanique (Figure III.3). La vitesse de changement du diamètre des micropores décroît avec le temps, ce qui peut correspondre avec le ralentissement des réactions pouzzolaniques au cours du temps (Le Runigo, 2008; Maubec, 2010).

III.4.1.2. Valeur de porosité

L'incertitude sur la mesure est de $\pm 1\%$ de porosité (voir II.4.4.4).

La porosité totale accessible au mercure est de $37 \pm 1\%$ pour le sol non traité quel que soit le temps de cure. La porosité des matériaux traités est donnée Tableau III.6. Pour une compacité correspondant à 98% de l'Optimum Proctor Normal (_{d98}), la porosité des sols traités à 28 jours est environ la même que celle du sol non traité, les variations observées étant dans l'intervalle de l'incertitude instrumentale.

Dans le cas du matériau de référence TW2%_{d98}, la porosité totale chute d'environ 1,5 % entre 28 jours et 1 an de cure. Pour les matériaux traités à la chaux, la porosité semble décroître avec le temps. Cependant, l'incertitude sur la mesure de la porosité ($\pm 1\%$) est plus grande que les variations observées ce qui empêche de conclure fermement sur l'effet du traitement à la chaux et de la cure sur la porosité.

Tableau III.6 : Porosité totale des différents matériaux en fonction du temps de cure. Attention l'erreur instrumentale est de 1%.

TW2%d98	Porosité totale		SW2%d98	Porosité totale	
	Moyenne	Ecart type		Cure	Moyenne
28 jours	36.72	0.44	28jours	37.8	1 seule mesure
90jours	36.36	1.36	90jours	36.99	1 seule mesure
1an	35.16	0.45	1an	37.1	0.73
TW1%d98	Porosité totale		TW2%d95	Porosité totale	
	Moyenne	Ecart type		Cure	Moyenne
28 jours	37.11	0.42	28 jours	/	/
90 jours	35.8	1 seule mesure	90 jours	39.6071	1 seule mesure
1an	37.445	0.57	1 an	38.8617	1 seule mesure

III.4.1.3. Conclusion sur l'effet de la cure

Dans le cas des matériaux fortement compactés (98% de l'OPN), le diamètre des micropores diminue avec l'augmentation du temps de cure. La variation du traitement entre 1 % et 2 % de chaux n'aboutit pas à une variation du diamètre des micropores à 1 an. La diminution de la taille des pores pourrait être liée aux composés cimentaires issus des réactions pouzzolaniques occupant une partie du volume de chaque micropore. Cependant, le comportement macroscopique du sol (R_c , érosion) est fortement affecté par les variations de teneur en traitement et donc de la quantité de composé cimentaire formé. L'hypothèse d'un comblement de la porosité par les seuls composés cimentaire n'est pas validé. Les composés cimentaires participent peut être au comblement d'une partie des pores mais pas de manière majoritaire, d'autres phénomènes doivent également être impliqués. La carbonatation d'une partie de la chaux pourrait être une des explications à la diminution de la taille des pores, et serait un phénomène à quantifier.

La salinité du sol n'a pas d'impact sur la répartition de la taille des micropores. Les ions contenus dans l'eau de mer ne formeraient donc pas de précipité dans les micropores. Le devenir et la localisation au niveau microstructural des ions provenant de l'eau de mer serait à étudier.

Le réarrangement de la répartition des micropores avec le temps de cure ne modifie pas de manière significative la porosité totale. Les macropores, dont le diamètre reste invariant au cours de la cure contrôlent donc la porosité du matériau.

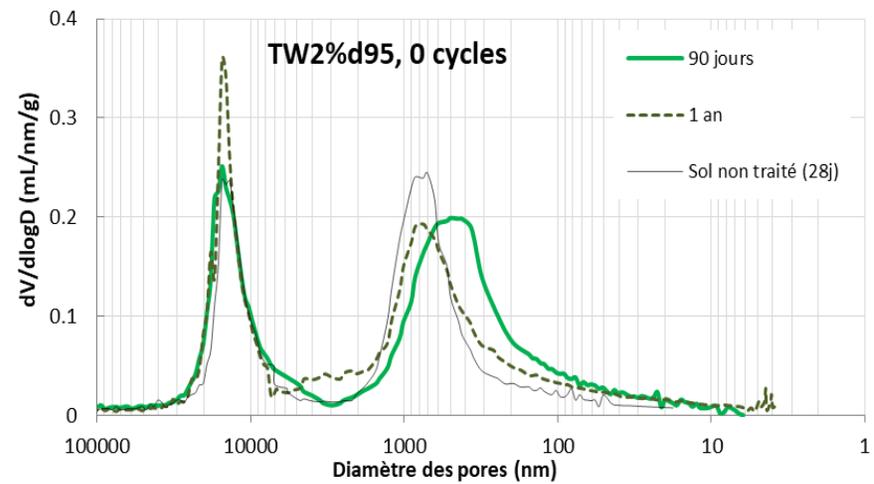
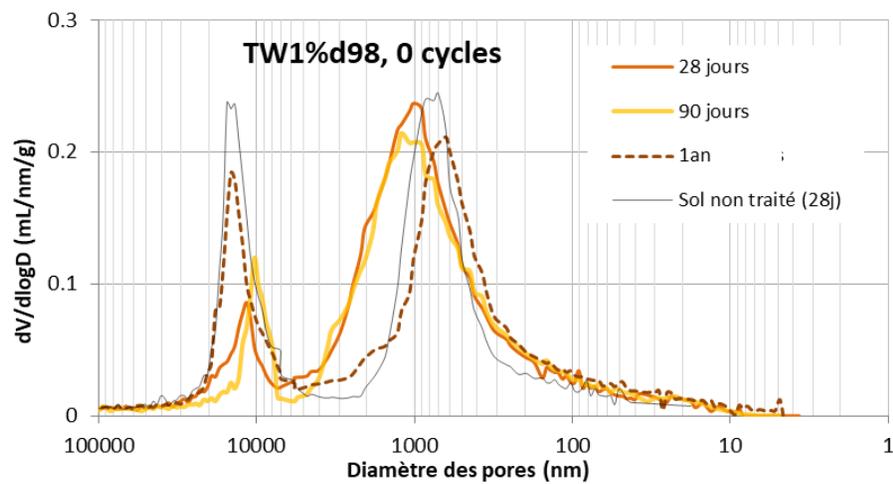
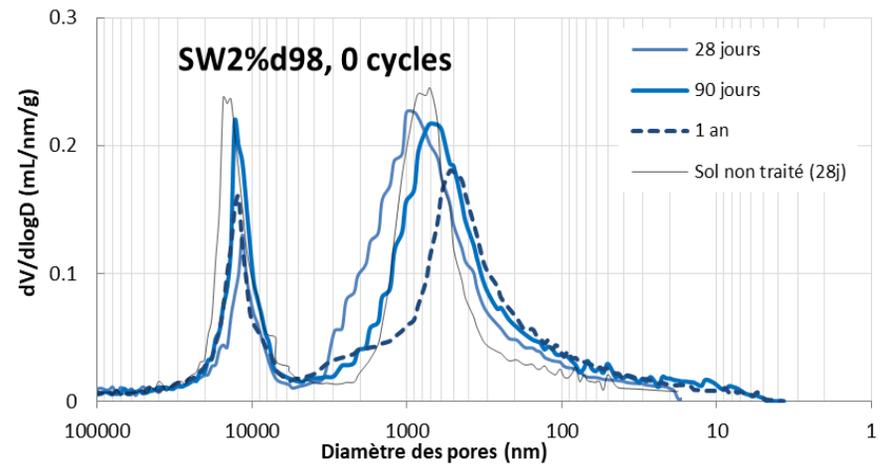
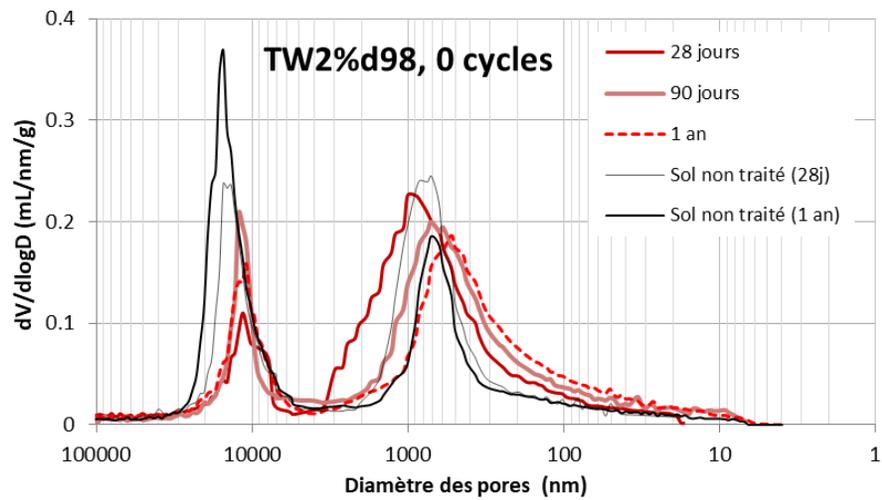


Figure III.40 : Répartition de la taille des pores pour les 4 matériaux en fonction du temps de cure.

III.4.2. Effet des cycles hydriques sur la porosité et son organisation

III.4.2.1. Répartition de taille de pores

III.4.2.1.1. Etudes à 90 jours

Observations générales

La répartition de la taille des pores est et reste bimodale quel que soit le matériau et le nombre de cycles appliqués (Figure III.41).

Après 90 jours de cure l'application de deux cycles engendre l'augmentation du diamètre des micropores et un étalement plus important de ces diamètres autour de la taille de pore la plus représentée. L'application de cycles supplémentaires ne modifie pas la répartition de la taille des pores. La famille des macropores n'est pas modifiée par les cycles.

Détail par matériau

Cas du matériau de référence : avant les cycles, le diamètre des micropores est de $0,65 \pm 0,05 \mu\text{m}$, après 2 cycles il est de $1 \pm 0,1 \mu\text{m}$, soit une augmentation d'environ 50%. L'étalement de la famille des micropores augmente entre 0 et 2 cycles : les diamètres des micropores sont compris entre $0,2 \pm 0,1 \mu\text{m}$ et $1,5 \pm 0,5 \mu\text{m}$ à 0 cycle, et entre $0,2 \pm 0,1 \mu\text{m}$ et $3 \pm 1 \mu\text{m}$ après 2 cycles. Le diamètre représentatif des micropores reste inchangé après deux cycles mais l'étalement des tailles de pore augmente avec un diamètre maximal de $5 \pm 1 \mu\text{m}$ à 12 cycles.

Cas du matériau initialement salé : La famille des micropores à 2 cycles est centrée sur $0,9 \pm 0,1 \mu\text{m}$, ce qui représente une augmentation du diamètre de 40 % par rapport au diamètre à 0 cycle. A deux cycles, l'étalement est plus important qu'à 0 cycle, les diamètres sont compris, comme dans le cas de TW2%_{d98} après des cycles), entre $0,2 \pm 0,1 \mu\text{m}$ et $3 \pm 1 \mu\text{m}$. Les cycles suivants ne modifient pas le diamètre représentatif des micropores qui reste à $0,9 \pm 0,1 \mu\text{m}$.

Cas du matériau traité à 1% de chaux : après 2 cycles la famille des micropores est centrée sur $1 \pm 0,1 \mu\text{m}$, comme à l'état initial, avec cependant un étalement plus important. Après 6 cycles, le diamètre le plus représenté est $1,5 \pm 0,5 \mu\text{m}$, soit une augmentation de 50 % par rapport au diamètre à 2 cycles. La répartition des pores reste inchangée entre 6 et 12 cycles. De même que lors de la cure, les variations de la microporosité arrivent à retardement par rapport aux matériaux traités avec 2 % de chaux.

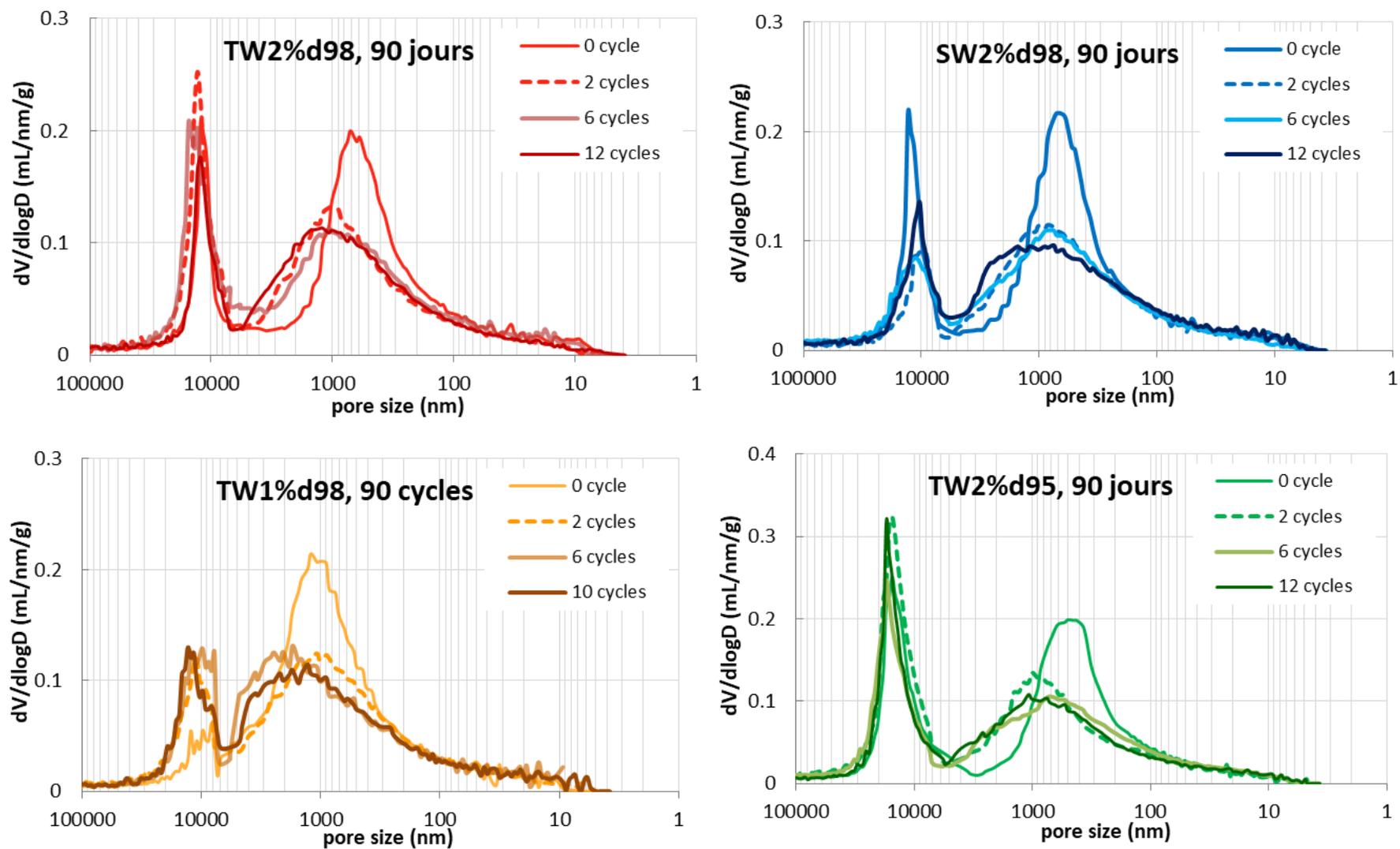


Figure III.41: Répartition de la taille des pores des différents matériaux en fonction du nombre de cycles appliqués après 90 jours de cure.

Cas du matériau avec un taux de compactage plus faible : entre 0 et 2 cycles, le diamètre représentatif de la famille de micropores croit de 50 % (la famille à 2 cycles est centrée sur $1 \pm 0,1 \mu\text{m}$). L'étalement des diamètres de cette famille de pores augmente aussi avec des diamètres jusqu'à $3 \mu\text{m}$. Au-delà de 2 cycles, la répartition de la microporosité reste inchangée.

Interprétation

La modification de la répartition de taille des pores est sensiblement la même quel que soit le matériau. L'organisation de la microporosité est perturbée dès les premières sollicitations puis se retrouve dans un état stable, non modifié par la multiplication des cycles à l'eau de mer, du moins au-delà de 2 cycles.

III.4.2.1.2. Etude à 1 an

Les mêmes observations sont faites sur le matériau de référence après 1 an de cure (Figure III.42). A l'issue des deux premiers cycles, le diamètre des micropores a augmenté d'environ $0,3 \mu\text{m}$. En valeur absolue, les deux premiers cycles ont donc le même effet sur la taille des pores que la cure soit de 90 jours ou 1 an. La répartition de la porosité, ne varie pas au-delà de 2 cycles.

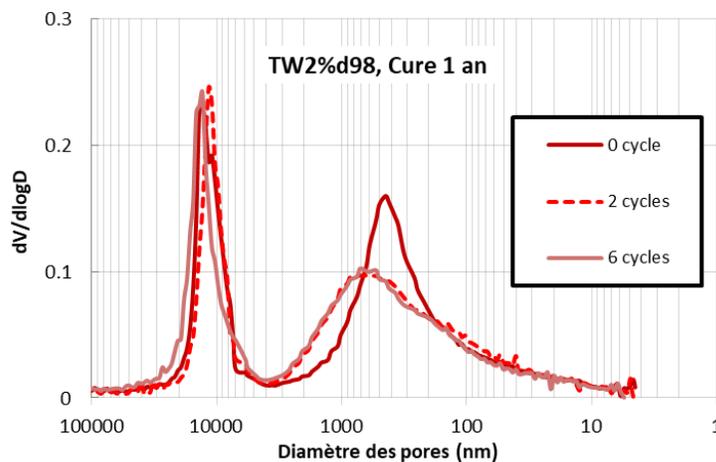


Figure III.42 : Répartition de la taille des pores du matériau de référence en fonction du nombre de cycles appliqués après 1 an de cure.

Le temps de cure n'as pas d'influence sur la réorganisation de la microporosité lors des premiers cycles, ni sur sa stabilité au-delà.

III.4.2.1. Effet du séchage sur l'organisation de la porosité

Sur le matériau de référence, après 90 jours de cure, des mesures de porosimétrie sur le même matériau avant le premier cycle (0), à l'état sec (0,5) et à l'issue de la première phase d'humidification (1) sont réalisées. L'évolution de la répartition du diamètre des pores au cours de ce premier cycle est présentée Figure III.43. Le séchage provoque l'augmentation du diamètre des micropores, et l'étalement de leur répartition. L'humidification ne modifie pas la répartition du diamètre des pores. La réorganisation de la porosité se produit donc lors de la phase de séchage. Au vu des résultats présentés Figure III.40, il peut

être conclu que la réorganisation des pores ne se produit qu’au cours de la première phase de séchage, les variations hydriques suivantes ne semblent pas modifier l’organisation de la porosité des matériaux traités à la chaux.

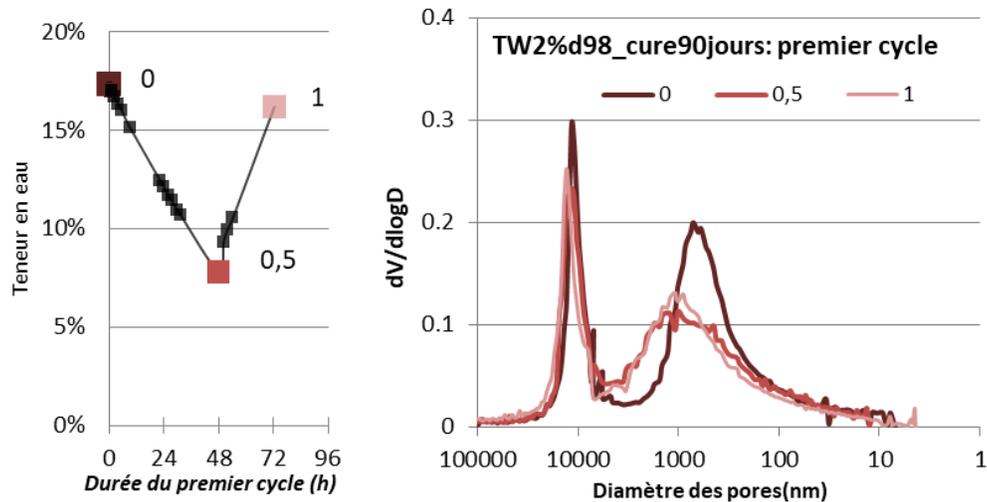


Figure III.43 : Evolution de la répartition de la taille des pores sous l’effet du séchage puis de la ré-humidification au cours des premiers cycles de sollicitations

III.4.2.1. Valeur de porosité

Le Tableau III.7 donne les mesures des porosités données par le porosimètre. L’incertitude sur les valeurs de porosité est de ± 1 % de porosité.

Tableau III.7 : Porosité des 4 matériaux en fonction du nombre de cycles à l’eau de mer. Attention, un défaut de l’instrumentation nous oblige à considérer une incertitude de ± 1 points autour des valeurs présentées dans ce tableau

Nombre de cycles	Porosité totale (%)			
	TW2%d98, 90 j	SW2%d98, 90 j	TW2%d95, 90 j	TW1%d98, 90 j
0	36,4	37,0	39,6	35,8
2	33,4	32,5	40,6	35,4
4	37,5	34,7	/	/
6	/	35,7	37,4	35,3
8	34,4	35,7	37,3	30,2
12	34,1	34,8	36,8	33,8 (10cycles)

Une tendance se reproduit pour tous les matériaux, la décroissance d'1 à 2 % de la porosité des matériaux ayant subi les cycles hydriques par rapport aux matériaux non cyclés. Trois hypothèses sont avancées pour expliquer cela :

- la précipitation des sels de mer dans l'espace poreux ;
- la réactivation des réactions pouzzolaniques par l'apport de chlorures et de calcium ;
- les réarrangements des agrégats isolant une partie de la porosité (transition d'une porosité connectée vers une porosité fermée).

La première et la dernière hypothèse sont les plus probables car la cinétique des réactions pouzzolaniques est lente, alors que chaque cycle ne dure que 3 ou 4 jours. De plus, il a été montré dans la sous partie précédente que les produits des réactions pouzzolaniques ne sont pas en mesure de modifier significativement la porosité. Il faudrait cependant pouvoir vérifier les autres hypothèses pour pouvoir conclure quant au(x) phénomène(s) responsable(s) de cette évolution de la porosité.

III.4.2.2. Conclusion sur l'influence des cycles hydriques sur la porosité

Le premier (ou les deux premiers) cycle(s) de séchage-humidification à l'eau de mer modifie(nt) la répartition du diamètre des micropores, sans modifier ceux des macropores. Au-delà de 2 cycles, la distribution des pores est inchangée et la porosité totale semble décroître d'1 à 2 %. La variation quasi nulle de ces deux propriétés alors que les propriétés macroscopiques sont fortement affectées par les cycles hydriques à l'eau de mer. La porosité n'est donc pas un bon indicateur de durabilité du limon traité à la chaux.

III.4.3. Conclusion sur l'étude de la porosité et de son organisation

L'étude de la porosité par porosimétrie au mercure a montré que le traitement à la chaux ne modifie pas le diamètre des macropores. Ces macropores ne sont pas non plus affectés au cours des cycles hydriques à l'eau de mer. Les micropores sont affectés par le traitement à la chaux. A 28 jours le diamètre des micropores dans le cas des matériaux traités à la chaux est en moyenne de 20 % supérieur au diamètre du limon non traité. En revanche dans le cas des matériaux traités de diamètre des micropores diminue avec le temps de cure. A 1 an, le diamètre est environ 40 % inférieur à celui du limon non traité. La salinité initiale du sol n'as pas d'influence sur la taille des micropores. La diminution de la taille des micropores pourrait être liée au volume occupé par les produits des réactions pouzzolaniques (i.e. les composés cimentaires). La carbonatation d'une partie de la chaux pourrait être une des explications à la diminution de la taille des pores, mais le phénomène n'a pas été quantifié chimiquement. Malgré la diminution des micropores la porosité totale ne varie pas avec le temps de cure. Du moins l'amplitude de variation est inférieure à l'incertitude instrumentale, qui est avec l'appareil utilisé d'environ 1 point sur la

valeur de porosité en pourcent. Les macropores, dont le diamètre reste invariant au cours de la cure contrôleraient donc la porosité du matériau. Les produits formés au cours de la cure ne feraient donc que diviser les micropores sans en réduire significativement le volume (en dessous du seuil de détection). Au cours du premier séchage du matériau, quelle que soit la composition, la densité ou le temps de cure, le diamètre des micropores augmente de 0,3 à 0,4 μm , soit une augmentation d'environ 40 %, et la dispersion des diamètres des micropores autour du diamètre le plus représenté augmente également. Les phases suivantes d'humidification et de séchage ne provoquent pas de changement dans la répartition du diamètre des pores. Les phénomènes qui provoquent la diminution des performances mécaniques et la diminution de la résistance à l'érosion lors des cycles hydriques ne sont donc pas détectables par l'étude de la porosité. La réorganisation de la microporosité lors du premier cycle pourrait cependant expliquer la diminution majeure de la résistance mécanique et de la résistance à l'érosion lors des premiers cycles puis la diminution des vitesses de dégradation. La répartition de la taille des pores n'est donc pas un bon indicateur de la durabilité des autres propriétés du sol traité. En revanche le réseau poreux n'étant pas modifié lors des cycles hydriques à l'eau de mer le matériau est qualifié de durable vis-à-vis de sa porosité. Le plus la porosité totale a tendance à diminuer avec l'augmentation du nombre de cycles subis (environ -2 points de porosité en pourcent au cours des 12 cycles). L'hypothèse la plus probable est la précipitation du sel provenant de l'eau de mer dans les macropores. Des observations au microscope électronique à balayage seront nécessaires pour valider ou non cette hypothèse. L'invariance de l'organisation des pores et la sensible diminution de la porosité totale lors des cycles hydriques sont des arguments en faveur de l'invariance de la perméabilité du matériau. Cependant les relations entre porosité et perméabilité sont complexes et constituent un sujet de recherche à part entière qui n'a pu être abordé dans cette thèse.

III.5. Conclusion du chapitre III

Le Tableau III.8 synthétise les principales conclusions de ce chapitre relatif à chacune des propriétés évaluées. Les comparaisons relatives entre les matériaux, et la comparaison relative des vitesses de dégradation des différentes propriétés font l'objet de la synthèse présentée dans la première partie du chapitre 5. Les différents essais de caractérisation ont apporté une connaissance de l'évolution des propriétés essentielles du matériau. Il est primordial de conserver ces propriétés à des niveaux de performances élevés pour que la digue assure sa fonction de protection. En revanche, l'origine de la variation de ces propriétés n'a pas formellement été déterminée et devra faire l'objet de recherches approfondies.

Tableau III.8 : Synthèse sur les variations des propriétés caractérisées suite à l'application du protocole de reproduction des sollicitations environnemental d'une digue maritime.

Propriétés caractérisées	Durabilité :	
	Conséquences des cycles	Conséquences de la cure
Résistance en compression simple	<p>Sol-chaux + cycles >> Sol + cycles</p> <p>Jusqu'à 4 cycles : décroissance rapide $\approx -50\%$ R_c(initiale)</p> <p>Au-delà : décroissance modérée, voir stabilisation</p> <p>Exception : chaux 1% \rightarrow décroissance linéaire</p>	<p>En valeur absolue : augmentation de R_c</p> <p>Cinétique de dégradation : pas d'influence</p>
Résistance à l'érosion interne (érosion de conduit)	<p>Sol-chaux + cycles >>> Sol + cycles</p> <p>Diminution du seuil pour lequel se déclenche l'érosion (τ_c)</p> <p>Cas TW2%d98 et SW2%d98 :</p> <p>-Peu de variation du coefficient d'érosion ker, et par extension, des vitesses d'érosion. - $ker(SW) \ll ker(SW)$</p> <p>Cas TW1%d98 et TW2%d95 :</p> <p>Augmentation importante du coefficient d'érosion et donc des vitesses d'érosion $ker(\text{final}) \approx +50\%ker(\text{initial})$</p> <p>Bilan : résistance à l'érosion interne décroît avec les cycles</p>	<p>En valeur absolue :</p> <p>-augmentation de τ_c +30% environ sauf SW2%d98</p> <p>-coefficient ker quasi invariant</p> <p>Cinétique de dégradation : pas d'influence</p>
Résistance à l'érosion externe	<p>Sol-chaux >>> Sol</p> <p>Pas ou peu d'influence</p> <p>Modification de la surface du sol lors des cycles avec action de protection contre l'érosion</p>	<p>En valeur absolue :</p> <p>diminue la masse érodée et donc augmentation de la résistance à l'érosion</p> <p>Cinétique de dégradation : pas d'influence</p>
Porosité et répartition des pores	<p>Sol-chaux \approx Sol</p> <p>Macropores : pas l'influence</p> <p>Micropores : augmentation au cours de la première phase de séchage, de 40 à 50% du diamètre initial et dispersion plus importante des diamètres des pores de cette famille</p> <p>Porosité totale : décroissance mais peu marquée (<2%)</p>	<p>Macropores : pas l'influence</p> <p>Micropores : diminution de 30 à 40% du diamètre entre 28 jours et 1 an</p> <p>Porosité totale : Pas d'influence</p>

IV. Chapitre IV : Caractérisation géophysique du limon traité à la chaux et de l'impact des cycles à l'eau de mer

Les propriétés du sol traité à la chaux dont dépend l'intégrité d'une digue lors d'une inondation (marine ou fluviale) sont la résistance à l'érosion pour éviter les brèches, la résistance mécanique pour assurer la stabilité de l'ouvrage lors des variations de charge hydraulique et la faible perméabilité pour limiter que l'eau ne traverse l'ouvrage. Nous avons vu dans le chapitre 3 que les propriétés de résistance à l'érosion et de résistance mécanique en compression simple, augmentent avec le temps de cure, et chutent lorsque le matériau est soumis à des cycles de séchage et d'humidification à l'eau de mer. Les valeurs de ces propriétés et les vitesses de décroissance dépendent de la formulation et de la densité du matériau. On cherche à caractériser la réponse géophysique du matériau dans ces différents états dans le but de relier grandeurs géophysiques et état de dégradation des propriétés mécaniques et d'érosion. Dans ce chapitre nous nous intéressons à la caractérisation de la résistivité du sol traité à la chaux et la vitesse de propagation des ondes sismiques dans ce matériau en fonction de sa composition et sa densité initiale, du temps de cure et du nombre de cycles hydriques subis. La corrélation entre les propriétés mécaniques, d'érosion et les propriétés géophysiques font l'objet du chapitre 5.

IV.1. Evaluation de la résistivité électrique du limon traités à la chaux

La résistivité électrique dépend de la conduction électrolytique par les ions libres présents dans le matériau et de la conduction de surface qui a lieu à la surface des particules argileuses. L'apport de chaux augmente la concentration en ions dans le milieu. Les réactions pouzzolaniques mobilisent ces derniers ainsi que ceux provenant de l'hydrolyse de la surface des argiles et aboutissent à la formation de composés cimentaires. L'ajout de chaux dans un sol et les réactions qui en résultent, modifient donc la résistivité du sol. C'est ce que nous cherchons à caractériser dans un premier temps avec des mesures au cours de la cure des matériaux. Dans un second temps, nous chercherons à caractériser l'effet des cycles hydriques à l'eau de mer sur la résistivité. L'objectif est de quantifier les variations de résistivité à la pénétration d'eau de mer dans le matériau d'une part et dans la mesure du possible les modifications liées à la dégradation des composés cimentaires, comme l'évolution décroissante de la résistance mécanique des sols traités le suggère. La teneur en eau influence également les valeurs de résistivité

mais ce n'est pas la propriété que nous cherchons à caractériser dans cette étude. Cependant la teneur en eau des différents échantillons peut varier de 1 à 2 % lors de leur préparation ou du fait d'un séchage (non souhaité, non maîtrisé) au cours de la cure. Pour pouvoir s'affranchir de l'effet de la teneur en eau sur l'interprétation des mesures, l'effet de la variation de teneur en eau des états proches de la saturation est caractérisé pour les différents matériaux.

IV.1.1. Influence de la teneur en eau proche de l'état de saturation sur la résistivité des matériaux

Les matériaux traités à la chaux sont préparés avec un objectif de teneur en eau massique de 18% qui correspond à une saturation d'environ 80 à 85 % (voir Chapitre II, Figure II.6), et à un fort état de compactage (98 % ou 95 % de l'OPN). Cependant au cours de la cure, la teneur en eau chute de 1 à 2 % (paragraphe II.4.5.5), et nous cherchons à vérifier que l'amplitude des variations de résistivité mesurées au cours de la cure est liée aux modifications du matériau apportées par la chaux et non pas à cette variation de teneur en eau. D'après Richard et al. (2005), la résistivité d'un limon compacté à des densités de 1,6 à 1,7 g.cm⁻³ est peu sensible à la teneur en eau lorsque cette dernière est supérieure à 15 %. Nous cherchons à vérifier cela sur les matériaux traités.

La Figure IV.1 présente, pour chacun des matériaux, la relation entre résistivité et teneur en eau, pour des teneurs en eau massique comprises entre 15 et 19%, toutes choses égales par ailleurs. Pour s'affranchir de l'effet de l'âge sur les valeurs de résistivité, pour chacun des matériaux les mesures sont réalisées sur des échantillons du même âge, 90 jours. La justification des différences de teneur en eau relevées est donnée dans le paragraphe précédent.

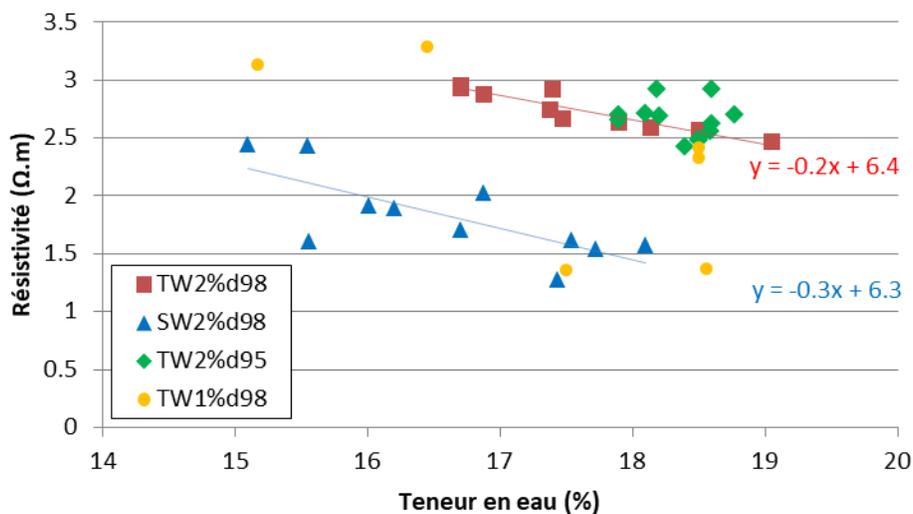


Figure IV.1 : Résistivité fonction de la teneur en eau sur l'intervalle de teneur en eau 15 - 19 %. Les valeurs présentées sont issues des mesures sur plusieurs éprouvettes de chacun des différents matériaux traités à la chaux, dont le temps de cure est de 90 jours.

Dans le cas du matériau de référence TW2% $\text{d}98$, les valeurs de résistivité sont peu dispersées autour d'une droite de pente -0,2. Une diminution de 1 % de la teneur en eau entraîne l'augmentation de la résistivité mesurée de +0,2 $\Omega\cdot\text{m}$. Dans le cas du matériau contenant de l'eau de mer (SW2% $\text{d}98$), une diminution de 1 % de teneur en eau augmente la résistivité mesurée d'environ 0,3 $\Omega\cdot\text{m}$. Dans le cas de TW2% $\text{d}95$, et de TW1% $\text{d}98$ les points sont respectivement trop rapprochés ou trop dispersés pour proposer une corrélation. Une hypothèse pour expliquer cette dispersion plus importante serait que pour une faible teneur en chaux (ici 1 %), la variabilité naturelle du sol ne soit pas masquée par le traitement et qu'elle le soit pour des teneurs en chaux plus importante (ici 2 %).

Ces résultats nous permettent de corriger les valeurs de résistivité mesurées pendant la cure lorsqu'un séchage du matériau entre deux points de mesure est constaté. Dans le cas des matériaux TW2% $\text{d}95$ et TW1% $\text{d}98$ on utilise la relation correspondant au matériau TW2% $\text{d}98$. Pour les mesures au cours des cycles hydriques, les corrections ne sont pas faites car avec l'apport des ions dans l'eau de mer, les relations entre teneur en eau et résistivité sont susceptibles d'évoluer significativement. A l'issue des différents cycles, quand les matériaux sont dans leur état « humide », si entre deux mesures la différence de résistivité est plus grande que celle qui serait liée à une différence de teneur en eau, alors cette différence de résistivité est significative de l'évolution du matériau et non de la différence de teneur en eau.

IV.1.2. Evolution de la résistivité en fonction du temps de cure

IV.1.2.1. Description des résultats

La résistivité des matériaux est mesurée au cours de la cure avec l'objectif de caractériser d'une part le développement des composés cimentaires dans le matériau, et d'autre part la résistivité des matériaux traités à la chaux en fonction de leurs formulations et de leurs densités. Les échantillons perdent 1 à 2 % de teneur en eau au cours de la cure. La correction présentée dans le paragraphe précédent est appliquée pour comparer les résistivités à teneur en eau constante. L'évolution de la résistivité peut ainsi être directement reliée aux effets de la chaux. La Figure IV.2 présente les résultats de l'ensemble des mesures. L'écart-type pour les mesures de résistivité entre les différents échantillons d'un même matériau est représentée par les barres d'erreur.

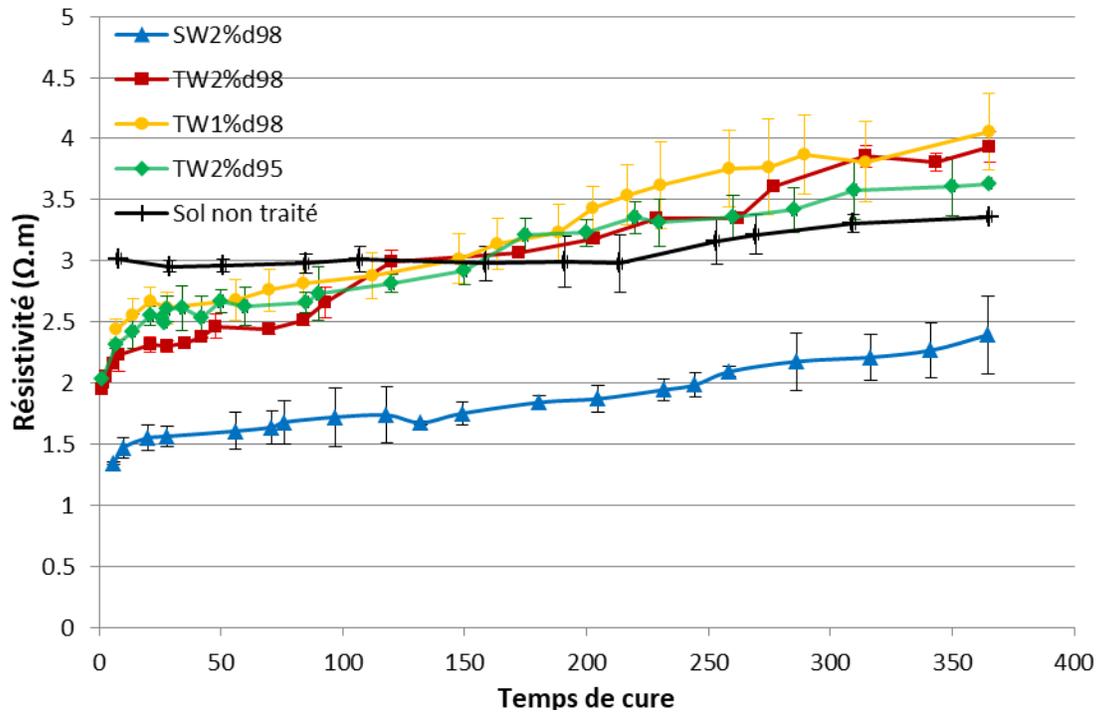


Figure IV.2 : Résistivité électrique des différents matériaux en fonction du temps de cure. La teneur en eau des échantillons traités à la chaux est d'environ 18 %, celle du sol naturel d'environ 16 %.

Pour le matériau de référence TW2%d98, la résistivité 1h après le compactage (i.e. 2h après le traitement) est de 1,95 Ω.m et augmente jusqu'à 2,25 Ω.m après 7 jours, soit une augmentation moyenne de 0,043 Ω.m par jour. Au-delà de 7 jours, la résistivité croît de façon linéaire à un rythme d'environ 0,005 Ω.m/jour, et atteint une résistivité de $4 \pm 0,1$ Ω.m à 1 an.

Les valeurs de résistivité à 1h et à 7 jours sont les mêmes pour les matériaux traités à 2% mais dont les densités diffèrent (TW2%d98 et TW2%d95). La teneur en eau est de 18%, à cette teneur en eau la résistivité n'est quasiment plus sensible à la densité (Richard et al., 2005), ce résultat est donc en accord avec la littérature. Au-delà de 7 jours, la résistivité du matériau TW2%d95 évolue de manière quasi linéaire de 0.0043 Ω.m par jour. Les valeurs initiales identiques et la vitesse d'évolution très proche des matériaux TW2%d98 et TW2%d95 font qu'il n'est pas possible de distinguer la densité des matériaux en se basant sur la valeur de la résistivité mesurée.

La résistivité du matériau traité avec 1% de chaux à 7 jours est de 2,5 Ω.m, et croît de manière linéaire avec le temps d'environ 0,004 Ω.m par jour. A 1 an, la résistivité de ce matériau est de $4 \pm 0,3$ unités. Pour le traitement à 1 % de chaux, la variabilité de la résistivité entre les échantillons est plus importante que pour les matériaux traités à 2 % de chaux. Du fait de ces incertitudes, la mesure de résistivité à un temps de cure donné ne permet pas de déterminer la teneur en chaux du matériau.

La salinité initiale du matériau (i.e. salinité de l'eau de la formulation) est clairement identifiable par la mesure de résistivité du matériau. La résistivité du matériau SW2%^{d98} varie de 1,34 Ω.m à 6 jours et jusqu'à 2,4 Ω.m après 1 an de cure (pour une teneur en eau constante à 18 %), soit une augmentation moyenne de 0,003 Ω.m par jour.

Le sol non traité a une résistivité constante à 3 Ω.m jusqu'à 200 jours. Au-delà, la résistivité augmente jusqu'à 3,36 Ω.m à 1 an. Par comparaison avec le sol non traité, nous pouvons déduire que les variations observées dans le cas des matériaux traités à la chaux sont significatives des effets du traitement sur les matériaux.

IV.1.2.2. Interprétation

Juste après le traitement, la réaction d'hydratation et l'ionisation de la chaux au contact de l'eau du sol libèrent des ions calcium (Ca^{2+}) et des ions hydroxydes (HO^-) et donc augmentent la conduction électrolytique. La résistivité du sol diminue donc avec l'ajout de chaux. Les mesures à 7 jours du matériau traité à 2 % et de chaux (TW2%^{d98}) et celui traité avec 1 % de chaux (TW1%^{d98}) confirment que plus la quantité de chaux apportée est importante plus la résistivité initiale du matériau diminue.

Les ions libérés par l'ionisation de la chaux sont ensuite mobilisés pour former les composés pouzzolaniques (ou composés cimentaires) et ne sont alors plus mobiles dans le matériau. L'augmentation de la résistivité traduit donc la synthèse des composés cimentaires. D'après les valeurs de résistivité, la consommation de la chaux est rapide les premiers jours puis ralentit et évolue à une vitesse régulière. Les composés cimentaires néoformés réduisent le diamètre des micropores (voir partie III.4.1) et isolent les volumes de fluide dans le sol. Cela a également pour conséquence d'augmenter la résistivité effective des matériaux. Les composés cimentaires se forment et se développent principalement à la surface des argiles modifiant les propriétés de surface des argiles (Maubec, 2010). Les ions à la surface des argiles deviendraient alors moins mobiles. La conduction de surface diminuerait donc également avec la synthèse des composés cimentaires.

Au moment du traitement à la chaux, et jusqu'à un certain seuil de développement des composés cimentaires, les ions apportés par la chaux entraînent la diminution de la résistivité du sol, qui est inférieure à celle du sol naturel. Puis, à long terme, la conduction électrolytique et la conduction de surface diminuent, la résistivité du sol traité à la chaux devient supérieure à celle du même sol non traité.

Dans le cas du sol traité à la chaux contenant de l'eau de mer, les ions provenant de l'eau de mer sont responsables de la résistivité du matériau environ deux fois plus faible que pour le même matériau sans

eau de mer. La mesure de la résistivité permet de suivre la formation des composés pouzzolaniques. Les valeurs de résistance en compression simple témoignent d'une synthèse tout aussi importante des composés cimentaires que pour le matériau sans eau de mer, pourtant la vitesse de croissance de la résistivité est plus faible car la conductivité apportée par les ions de l'eau de mer masque en partie la consommation, au cours de la cure, des ions provenant de la chaux.

IV.1.2.3. Conclusion sur l'effet de la cure sur la résistivité des matériaux

La résistivité électrique permet de suivre l'état de cimentation du matériau. Celle-ci a lieu tout au long de la cure. On cherchera par la suite (*Chapitre 5*) à établir des corrélations entre la résistivité électrique et la résistance en compression simple qui sont deux grandeurs sensibles au taux de cimentation. La résistivité est en revanche peu sensible à la variation de densité entre le matériau compacté à 98 % de l'OPN et celui compacté à 95 % de l'OPN. La résistivité n'est pas non plus sensible à une variation de 1% de teneur en chaux, alors que l'on a vu dans le chapitre 3 que les variations de densité et de teneur en chaux ont des conséquences importantes sur la résistance mécanique et sur la résistance à l'érosion.

IV.1.3. Evolution de la résistivité en fonction du nombre de cycles

Les essais mécaniques et d'érosion ont montré que les propriétés des sols traités sont modifiées par les cycles d'humidification-séchage à l'eau de mer. On cherche ici à caractériser l'effet des cycles hydriques sur la résistivité des sols traités à la chaux.

IV.1.3.1. Résultats et interprétation

Les résultats sont décrits matériau par matériau en comparaison avec le matériau de référence TW2% ρ 98. Le temps de cure des matériaux avant le début des cycles est de 90 jours.

IV.1.3.1.1. TW2% ρ 98 (matériau de référence)

Le graphique en haut à gauche de la Figure IV.3 présente la résistivité et la teneur en eau du matériau au cours des cycles à l'eau de mer pour le matériau de référence. A l'état initial la teneur en eau est de 20% et la résistivité de 2.5 Ω .m. La première phase de séchage réduit la teneur en eau à 8 % et la résistivité est alors de 13 Ω .m.

Au cours des 3 premiers cycles, la résistivité correspondant à l'état sec du matériau décroît de 75% par rapport à la résistivité à l'état sec du premier cycle (cycle 1 : 13,26 Ω .m ; cycles 3 : 2.53 Ω .m). Au cours des cycles suivants la valeur de résistivité aux « états secs » décroît de manière irrégulière car elle est très sensible aux variations de teneur en eau. A l'état sec du douzième cycle, la résistivité est de 1,67 Ω .m. En moyenne, la décroissance de la résistivité est donc de 0.0956 Ω .m/cycle. La résistivité à l'état sec au-delà du troisième cycle est beaucoup plus sensible à la teneur en eau qu'au nombre de cycles

appliqués, ce qui permet difficilement d'interpréter les variations de résistivité comme le résultat de la dégradation des composés cimentaires ou la variation de la salinité du matériau liée aux cycles.

Aux « états humides » la résistivité décroît également rapidement avec le nombre de cycles jusqu'à 3 cycles (environ $-0.44 \Omega.m$ par cycle), puis décroît extrêmement lentement jusqu'à 12 cycles. La baisse de résistivité entre 3 et 12 cycles est de $0.04 \Omega.m$ par cycle. Contrairement aux états secs, la résistivité est peu sensible à la teneur en eau, comme on pouvait s'y attendre. La décroissance rapide au cours des trois premiers cycles pourrait correspondre à une phase de pénétration du sel dans l'échantillon jusqu'à saturation autour de $1.15 \Omega.m$, puis la décroissance lente correspondrait à la déstabilisation des composés cimentaires (C-S-H, C-A-H) avec une libération progressive des ions calcium, hydroxyle, aluminium et silicium dans le milieu interstitiel.

IV.1.3.1.2. Cas des autres matériaux étudiés

Les graphiques de la Figure IV.3 présentent la résistivité et la teneur en eau des différents matériaux au cours des cycles à l'eau de mer en comparaison avec le matériau de référence.

SW2% $\text{d}98$

Le matériau SW2% $\text{d}98$ contient initialement de l'eau de mer dans sa composition. Sa résistivité initiale est logiquement plus faible que le matériau n'en contenant pas. Au premier « état sec », la différence de résistivité liée à la différence de concentration en ions dans le matériau est encore plus marquée avec une résistivité de $8 \Omega.m$ pour le sol salé contre $13 \Omega.m$ pour le sol non salé. En revanche, les différences entre ces matériaux s'effacent dès la fin du premier cycle. La résistivité en absolu et son évolution sont alors très semblables pour les matériaux SW2% $\text{d}98$ et TW2% $\text{d}98$.

TW1% $\text{d}98$

Dans le cas du matériau TW1% $\text{d}98$ les mesures n'ont pu être réalisées à toutes les étapes des cycles, mais le nombre de données est suffisant pour conclure que la teneur en chaux influe peu sur les valeurs de résistivité par rapport à l'effet de la pénétration de l'eau de mer dans le matériau au cours des cycles. Excepté au cours du premier cycle (i.e. avant que l'eau de mer ne pénètre dans le matériau), l'évolution de la résistivité est très semblable entre les matériaux TW1% $\text{d}98$ et TW2% $\text{d}98$.

Au premier « état sec » la résistivité du sol traité à 1 % de chaux est inférieure de $5 \Omega.m$ à celle de du sol traité à 2 %. Lorsque la teneur en eau d'un sol est faible et que la salinité de l'eau porale est faible devant celle de l'eau de mer comme c'est le cas au premier « état sec », nous pouvons considérer que le courant électrique est principalement conduit à la surface des particules argileuses (conduction de surface). Or la conduction de surface est d'autant plus grande que la cimentation du matériau est faible (les composés

cimentaires se formant à la surface des argiles et modifiant leurs propriétés de surface (Maubec, 2010). Nos résultats expérimentaux (chapitre 3) et ceux de la littérature (Le Roux and Rivière, 1969; Maubec, 2010; Nguyen, 2015) montrent que la quantité de composés cimentaires formés augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux. En l'absence d'eau de mer et pour des faibles teneurs en eau, la valeur de la résistivité pourrait donc discriminer la teneur en chaux d'un matériau ou du moins la quantité relative de composés cimentaires présents dans deux sols traités. En revanche, dès que le matériau contient de l'eau de mer (à partir de la fin du premier cycle), le courant électrique est dominé par la conduction électrolytique. La quantité de chaux dans le matériau n'est plus distinguée par la valeur de résistivité du sol traité.

Nous relevons que la valeur anormalement élevée de la résistivité au deuxième état sec est due à une teneur en eau de 5 %, contre 8 % à 10 % pour les cycles suivants. Cela confirme que la résistivité est sensible à la teneur en eau lorsque celle-ci est éloignée de la valeur à saturation.

TW2% ρ 5

Dans le cas du matériau TW2% ρ 5, les mesures n'ont pu être réalisées à toutes les étapes des cycles, mais le nombre de données est suffisant pour conclure qu'à partir du moment où le matériau contient de l'eau de mer, une variation de densité de 74 kg.m^{-3} n'induit pas des différences significatives dans les valeurs de résistivité électrique du sol traité à la chaux. De même que pour le matériau de référence, aux « états humides » des cycles, la résistivité du matériau est peu sensible aux variations de teneur en eau. La décroissance lente au-delà de 2 cycles pourrait, tout comme pour les autres matériaux, être liée à la dégradation des composés cimentaires.

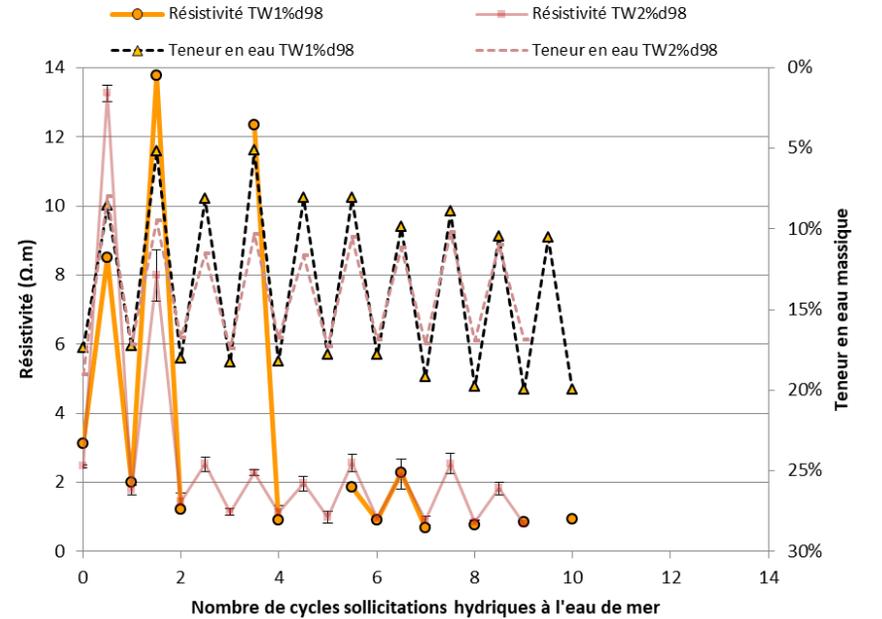
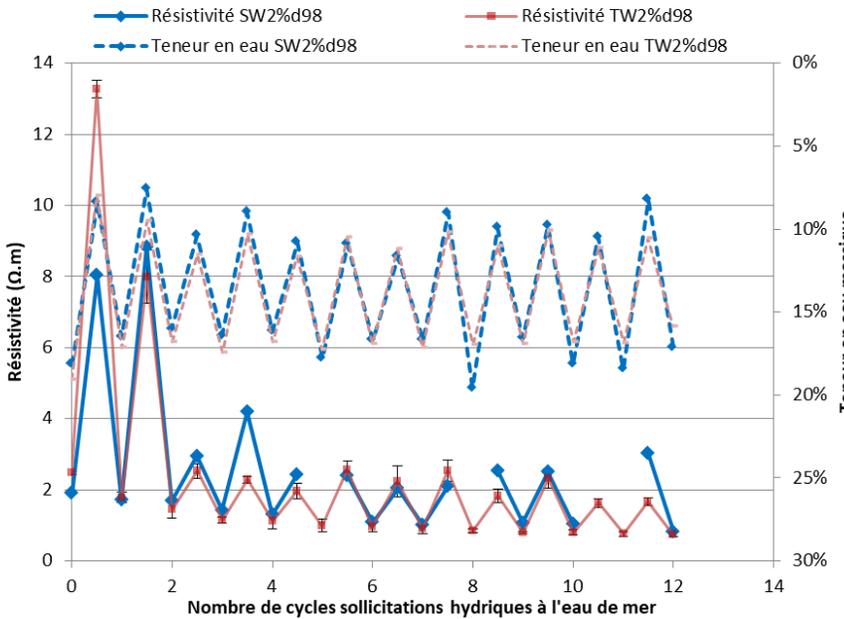
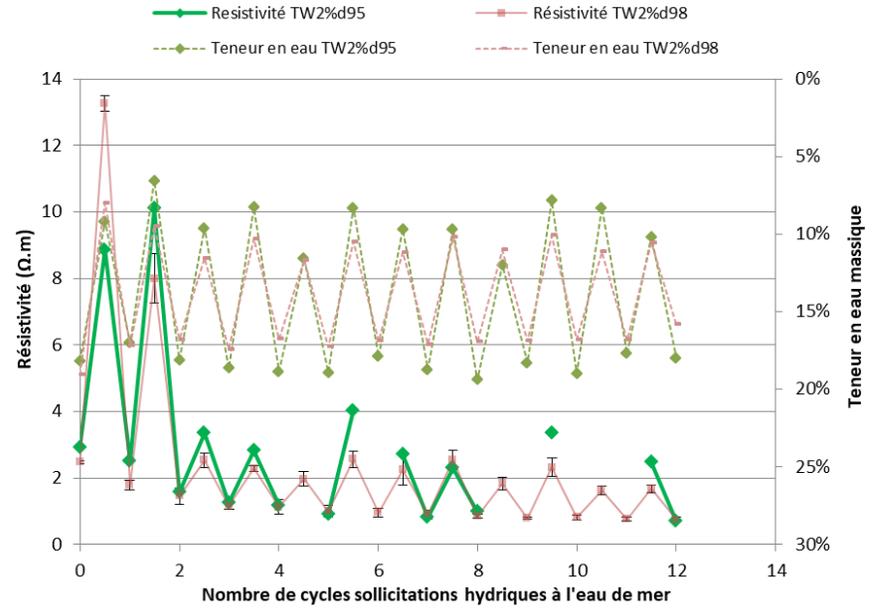
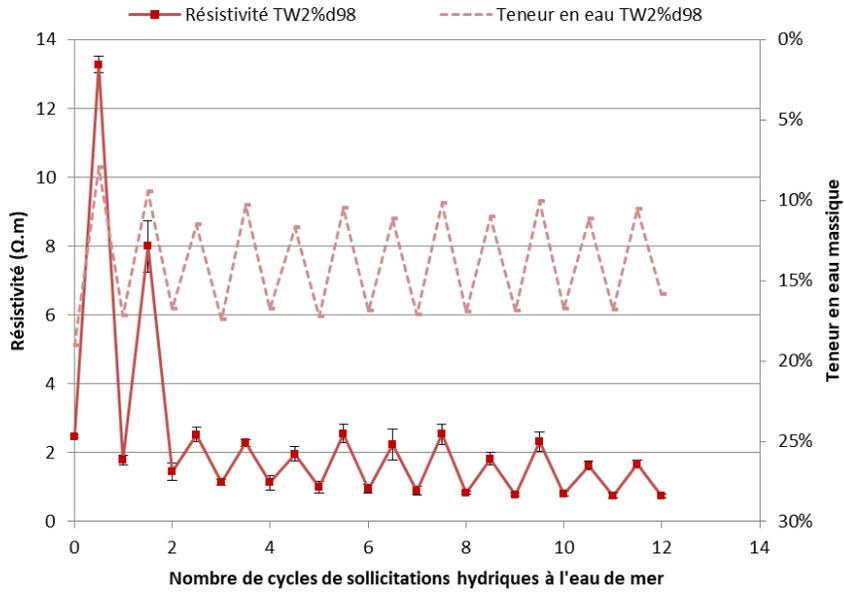


Figure IV.3 : Résistivité électrique des 4 matériaux traités à la chaux en fonction du nombre de cycles hydriques à l'eau de mer réalisés. Comparaison avec le matériau de référence TW2%d98.

IV.1.3.1. Conclusion sur l'effet de cycles de sollicitations hydriques à l'eau de mer sur la résistivité des matériaux

La décroissance rapide puis la stagnation des valeurs de résistivité traduisent la saturation en sels de mer rapide de l'eau porale à partir de 2 ou 3 cycles. Les variations lentes observées après 3 cycles pourraient être liées à la dissolution des composés cimentaires au fur et à mesure des cycles. Des mesures complémentaires de la chimie du matériau auraient été nécessaires pour confirmer cela. Cependant les corrélations entre résistivité et résistance mécanique ou résistance à l'érosion pourraient permettre de conclure plus clairement.

IV.1.4. Effet du temps de cure sur les variations de résistivité au cours des cycles d'humidification séchage

IV.1.4.1. Résultats et interprétations

La Figure IV.4 présente en parallèle les valeurs de résistivité et de teneur en eau au cours des cycles hydriques des matériaux ayant eu un temps de cure de 90 jours ou de 1 an.

Cas du matériau TW2% $\text{d}98$

La résistivité à l'état initial et au cours de cycles de séchage-humidification est plus élevée lorsque la cure est plus longue. L'écart tend à se réduire avec l'augmentation du nombre de cycles. Aux « états humides », la vitesse moyenne de décroissance de la résistivité sur 6 cycles est de 0,41 $\Omega\cdot\text{m}$ par cycle soit deux fois plus grande qu'à 90 jours. En revanche à l'état sec et pour les trois premiers cycles, la baisse de la résistivité est moins importante à 1 an (8,4 $\Omega\cdot\text{m}$), qu'à 90 jours (10,7 $\Omega\cdot\text{m}$). La baisse de la résistivité à l'état sec du matériau à 1 an se prolonge jusqu'à 6 cycles à une vitesse de -0,69 $\Omega\cdot\text{m}$ par cycle, alors qu'elle est nulle pour le matériau à 90 jours.

De ces observations nous pouvons conclure que la résistivité du matériau est sensible au temps de cure même après 6 cycles. La pénétration d'eau de mer dans le matériau impacte moins la résistivité du matériau à 1 an que celle du matériau à 90 jours. L'explication que l'on donne à cela est que la cimentation plus importante du matériau à 1 an limite la baisse de la résistivité liée à l'augmentation de la salinité de l'eau du milieu interstitiel après les cycles hydriques.

Cas du matériau SW2% $\text{d}98$

Les différences de teneur en eau enregistrées lors des cycles sur le matériau à 90 jours et à 1 an rendent la comparaison des résistivités difficile. Au cours du premier cycle, pour une même amplitude de variation de teneur en eau, l'amplitude de variation de la résistivité est plus grande pour le matériau à 1 an, ce qui traduit une cimentation plus importante du matériau à 1 an. Les différences de résistivité du

matériau à 90 jours et 1 an s'effacent avec l'augmentation du nombre de cycles. Aux cycles 4 et 6, pour des teneurs en eau identiques, la résistivité à 90 jours et 1 an sont identiques.

La résistivité est sensible au temps de cure pendant moins de cycles d'humidification-séchage à l'eau de mer lorsque le matériau traité est initialement salé (SW2% ρ 98) que quand il ne l'est pas (TW2% ρ 98).

Cas du matériau TW1% ρ 98

Peu de points de comparaison sont exploitables entre le matériau à 90 jours et à 1 an. On relève qu'à 1 an comme à 90 jours, la résistivité diminue avec le nombre de cycles. La résistivité du matériau traité à 1% de chaux est plus sensible à la teneur en eau qu'au temps de cure.

Aux « états humides », on constate que la résistivité du matériau à 1 an est plus grande que celle du matériau à 90 jours d'environ 0,5 Ω .m avant les cycles puis cet écart diminue avec le nombre croissant de cycles.

Cas du matériau TW2% ρ 95

La résistivité décroît avec l'augmentation du nombre de cycles à l'eau de mer. Jusqu'à 3 cycles, l'amplitude de variation de la résistivité en fonction de la teneur en eau est plus grande dans le cas du matériau à 1 an. Au-delà, il n'y a plus de différences de résistivité liées au temps de cure.

La comparaison des valeurs de résistivité du matériau TW2% ρ 98 et TW2% ρ 95 après 1 an de cure montre que la résistivité est sensible à la densité, ce qui n'était pas le cas après 90 jours de cure. La résistivité est plus faible pour un matériau dont la densité est plus faible. Ceci est remarquable en particulier pour des faibles teneurs en eau (\approx 10%).

IV.1.4.1. Conclusion sur l'effet combiné de la cure et des cycles hydriques sur la résistivité des matériaux

La résistivité électrique d'un sol traité à la chaux est une grandeur physique sensible au temps de cure du matériau, mais principalement lorsque la teneur en eau dans le matériau est faible. La répétition de cycles hydriques à l'eau de mer tend à faire disparaître les différences de résistivité des matériaux de temps de cure différents. La conductivité importante de l'eau de mer mais aussi la modification de la composition des matériaux (destruction des composés cimentaires) seraient responsables de la baisse de résistivité du matériau dans des proportions respectives difficiles à quantifier. Nous chercherons par la suite à corrélérer les variations de résistivité du matériau avec les variations des propriétés mécaniques et d'érosion liées à la dégradation du matériau par les cycles hydriques.

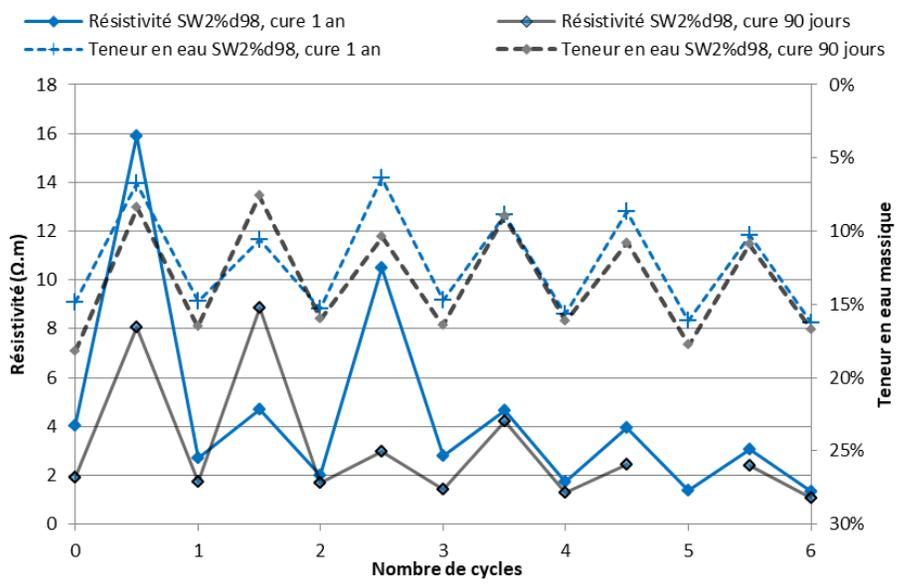
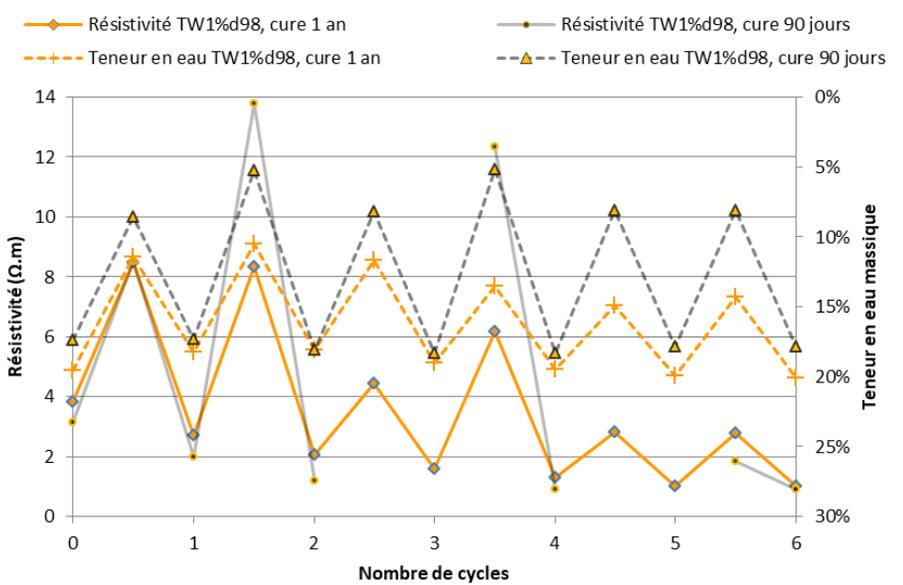
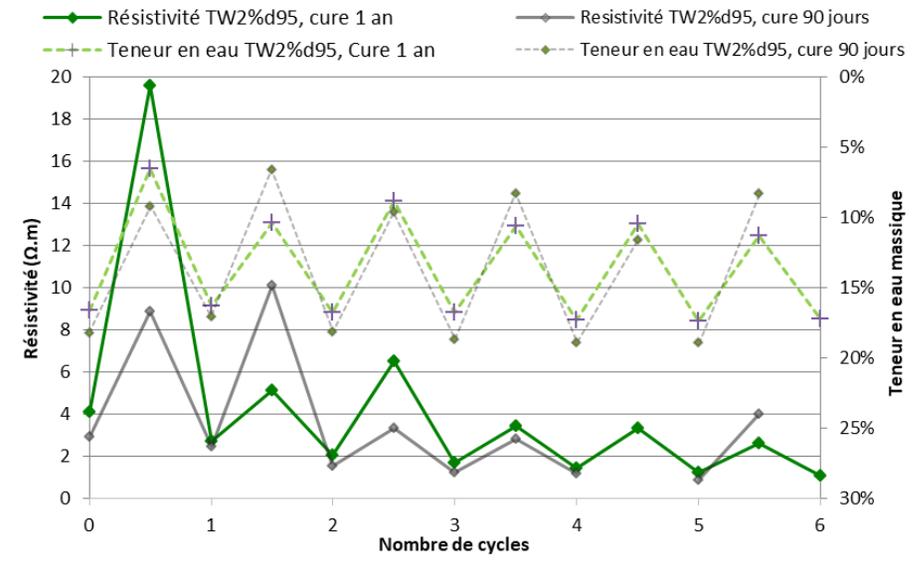
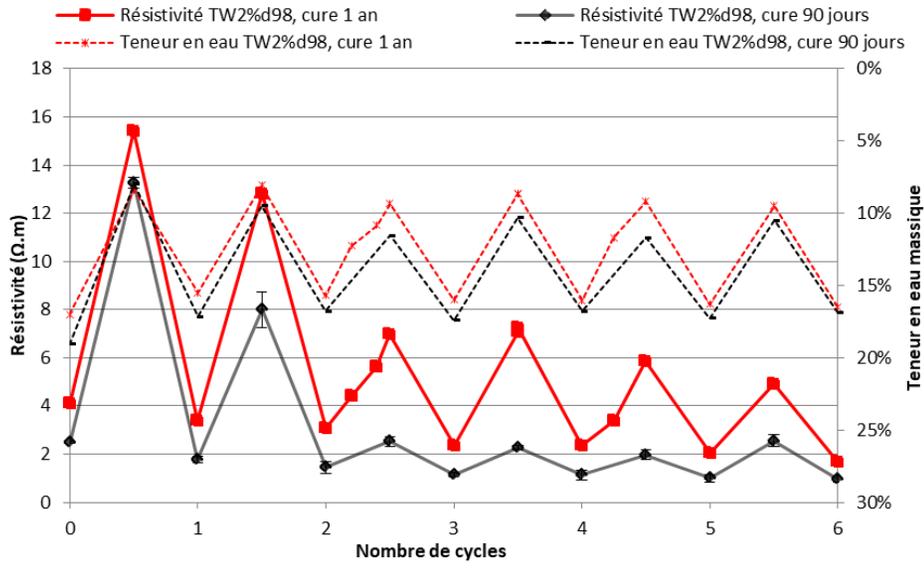


Figure IV.4 : Résistivité électrique des 4 matériaux traités à la chaux en fonction du temps de cure et du nombre de cycles hydriques à l'eau de mer réalisés.

IV.1.5. Conclusion sur les mesures de résistivité électrique

La résistivité électrique du limon Salin de Giraud traité à la chaux varie entre 2 et 4 $\Omega.m$ au cours de la cure s'il ne contient pas d'eau de mer, entre 1,25 et 2,25 $\Omega.m$ s'il contient de l'eau de mer à une concentration de 24,4 $g.L^{-1}$. Pour des teneurs en eau proches de l'état de saturation (comme c'est le cas durant la cure et aux « états humides » des cycles), les mesures de résistivité ne permettent pas de discriminer une variation de densité entre 98 et 95 % de l'OPN, ni un sol traité avec 2 % de chaux d'un sol traité avec 1 % de chaux. Lorsque la teneur en eau est faible et qu'il n'y a pas d'eau de mer dans les pores du matériau, la densité et la teneur en chaux peuvent être discriminées par les valeurs de résistivité des matériaux. Pour le limon traité dont la teneur en eau est de 9 %, la diminution de la teneur en chaux de 2 % à 1 % se traduit par une baisse de 4 $\Omega.m$, la diminution de la densité de 74 $kg.m^{-3}$ se traduit aussi par une baisse de 4 $\Omega.m$. L'effet des variations de teneur en eau pour des teneurs éloignées de celle de l'état de saturation n'a pas été rigoureusement quantifié mais l'ensemble des observations nous permettent de conclure que ces variations sont responsables de variations de résistivité supérieures à celles dues aux variations de teneur en chaux ou de densité. A partir du moment où l'eau de mer pénètre dans le matériau, toutes les différences liées au dosage en chaux et à la densité sont masquées par la conductivité élevée de l'eau de mer, et ce, même pour des faibles teneurs en eau (à teneur en eau identique). La résistivité de tous les matériaux étudiés est inférieure à 2 $\Omega.m$ après deux cycles à l'eau de mer. Au-delà de 2 cycles, les variations de résistivité seraient liées à la dissolution des composés cimentaires sous l'effet des cycles hydriques. La comparaison avec les mesures directes (résistance mécanique, érosion...) sont présentées par la suite pour éprouver cette hypothèse. Dans le cadre de ces corrélations, seules les mesures de résistivité aux « états humides » seront utilisées car les mesures directes sont toutes réalisées sur les échantillons à cet état hydrique.

IV.2. Evaluation de la vitesse de propagation des ondes sismiques dans le limon traité à la chaux

La vitesse de propagation des ondes sismiques dans un matériau dépend de la densité, de l'état de saturation, de la nature et de la rigidité du matériau. Les produits des réactions pouzzolaniques apportent de la cohésion au matériau et limitent la déformation du matériau au passage des ondes sismiques. Nous émettons donc l'hypothèse que la vitesse des ondes augmente avec la synthèse des composés cimentaires issues des réactions pouzzolaniques. La vitesse des ondes P et S est mesurée au cours de la cure pour les différents matériaux. La teneur en eau entre la première et la dernière mesure

est inférieure à 1 %. Les variations de teneur en eau peuvent donc être négligées dans l'interprétation de l'évolution des vitesses avec le temps de cure. Les mesures sont ensuite réalisées au cours des cycles de séchage-humidification après une cure de 1 an. Une relation entre vitesse et nombre de cycles effectués est recherchée.

IV.2.1. Vitesse des ondes P et S fonction du temps de cure

Les mesures n'ont pu commencer qu'à partir de 150 à 240 jours, si bien que l'évolution des vitesses immédiatement après le traitement n'est pas disponible. La Figure IV.5 présente les vitesses des ondes P en fonction du temps de cure pour les 5 matériaux de l'étude. Les travaux de Toohey & Mooney, (2012) laissent supposer que les plus grandes variations de vitesses auraient pu s'observer pour notre matériau au jeunes âge (< 28 jours), lorsque les réactions pouzzolaniques se développent le plus vite (Pomakhina et al., 2012).

La vitesse des ondes P est plus grande dans le cas du sol traité à la chaux que dans le cas du sol non traité.

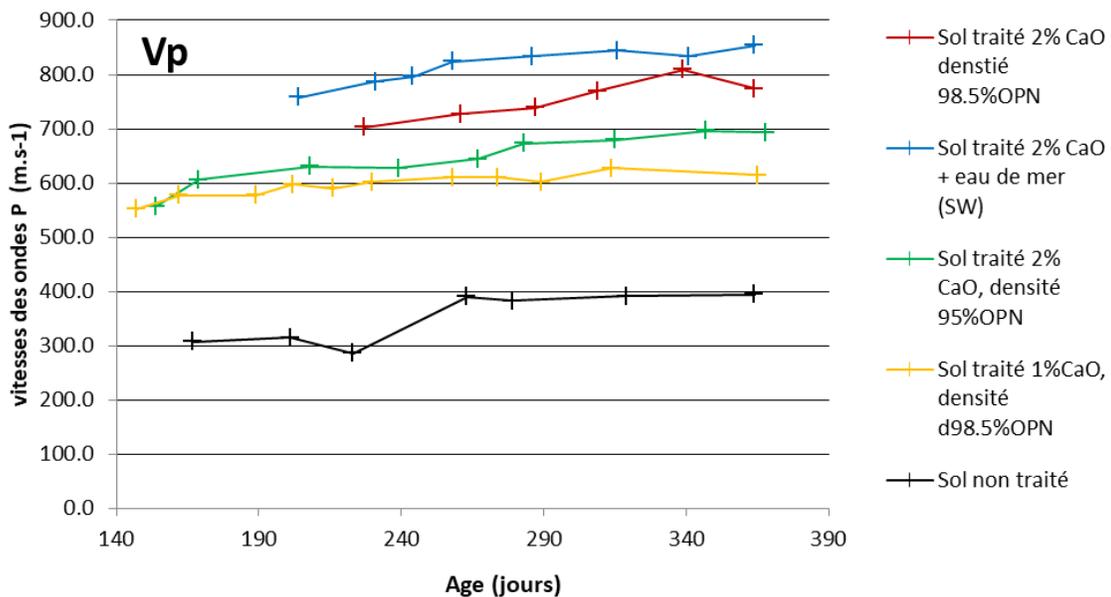


Figure IV.5 : Suivi de la vitesse des ondes P pour les différents matériaux entre 150 et 365 jours.

La vitesse des ondes P pour les matériaux non salés, traités à 2 % de chaux, augmentent de 100m/s en 165 jours (cas TW2%d98) ou 215 jours (Cas TW2%d95). Cela témoigne de la synthèse des composés cimentaires par les réactions pouzzolaniques qui continuent à se développer dans le matériau au moins jusqu'à 1 an à une vitesse que l'on peut considérer comme constante. Après 1 an de cure, $V_p \approx 800$ m/s dans le cas de TW2%d98, et $V_p \approx 700$ m/s dans le cas de TW2%d95. La différence de densité se traduit donc au bout d'un an par une différence de vitesse des ondes P d'environ 100 m/s.

Le matériau traité à 1 % de chaux, la vitesse augmente de 50 m/s entre 150 et 200 jours puis reste quasi constante durant le reste de la cure. Cela témoigne d'un arrêt de la synthèse de composés cimentaires. Les 1% de chaux du traitement seraient donc entièrement consommés au-delà de 200 jours. Après 1 an de cure $V_p \approx 800$ m/s dans le cas de TW2%d98, et $V_p \approx 600$ m/s dans le cas de TW1%d98. Une différence de 1 % de teneur en chaux se traduit au bout d'un an par une différence de vitesse des ondes P d'environ 200m/s.

Dans le cas du sol salé traité à 2% de chaux (SW2%d98), la vitesse des ondes P est la plus élevée, elle atteint 820m/s à 140 jours, puis reste ensuite quasi constante jusqu'à 1 an. Cette observation confirme le caractère accélérateur de prise du sel. Toute la chaux est consommée plus rapidement, ce qui se traduit par une augmentation de la V_p plus importante dans un premier temps mais dont l'augmentation s'arrête plus tôt. La V_p pour le matériau avec le même traitement mais non salé TW2%d98 rejoint progressivement la V_p du matériau salé SW2%d98 mais sans jamais l'égaliser. A 1an la différence est d'environ 50 m/s. La présence de sel dans le matériau aurait donc une influence sur la vitesse de propagation des ondes P, indépendamment du traitement à la chaux.

Pour le matériau non traité, la vitesse de propagation des ondes P est constante tant que la teneur en eau de varie pas. L'augmentation de 100 m/s entre 220 et 270 jours est due à une perte de teneur en eau de 0,8% ($\omega = 14,5\%$ à 220 jours, et $\omega = 13,7\%$ à 270 jours).

Les vitesses des ondes S sont également mesurées dans les matériaux, aux mêmes âges que pour les ondes P. Nous cherchons à savoir quelles informations supplémentaires sur le matériau nous pouvons obtenir par rapport à la mesure des ondes P. La Figure IV.6 présente ces résultats.

De même que pour les ondes P, la vitesse des ondes S est plus grande dans le cas du sol traité à la chaux que dans le cas du sol naturel (respectivement entre 300 et 550 m/s contre 220 à 280 m/s).

La vitesse d'évolution de V_s avec le temps de cure est le même pour tous les matériaux traités à 2% de chaux quelle que soit la densité et la salinité, soit environ 60m/s pour 100 jours. Contrairement aux vitesses V_p , l'évolution des vitesses V_s dans le cas du sol salé n'atteint pas une asymptote après 250 et continue d'évoluer comme le sol traité non salé. Les vitesses pour le sol salé sont toujours de 20m/s supérieures au sol non salé. L'hypothèse d'une influence notable de la salinité du sol sur la vitesse de propagation des ondes sismiques peut, d'après ces observations, être émise de nouveau. Cette vitesse supérieure dans le matériau salé peut s'expliquer par un développement plus important des composés cimentaires. Les composés cimentaires augmentent la résistance au cisaillement du sol et augmente la vitesse de propagation des ondes S.

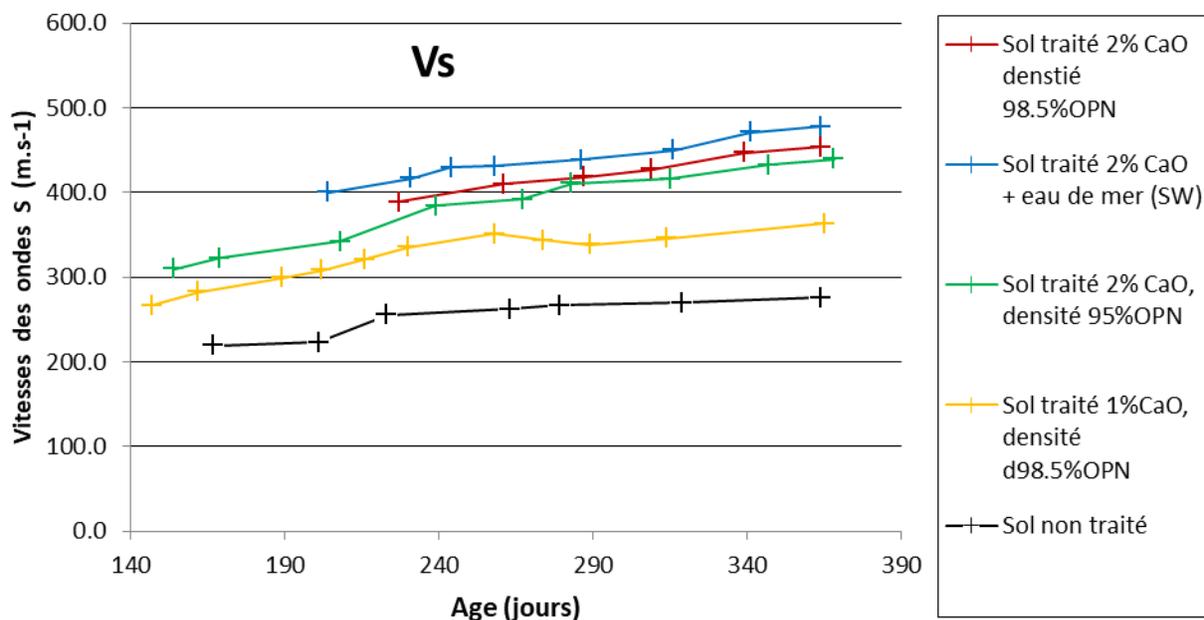


Figure IV.6 : Suivi de la vitesse des ondes S pour les différents matériaux entre 150 et 365 jours.

La différence de densité entre TW2%d98 et Tw2%d95 ne se traduit que par une faible différence de vitesse des ondes S, environ 20 m/s. Dans le cas des ondes P, cette différence est d'environ 80 m/s. Les ondes S sont donc moins sensibles aux différences de densité que les ondes P.

L'augmentation de la vitesse des ondes S dans le cas du sol traité avec 1 % de chaux est d'environ 0.8 m/s par jour entre 150 et 258 jours. Entre 258 jours et 1 an de cure, la vitesse Vs n'augmente plus. C'est le cas également pour les ondes P. Ces observations sont donc des indices pour conclure à la consommation totale de la chaux avant 1 an dans les cas de TW1%d98. La quantité de chaux initialement introduite dans le sol (1 %) ne permettrait pas la synthèse de composé cimentaire jusqu'à au moins 1 an comme dans le cas où le traitement est de 2 %. La vitesse des ondes S est sensible à la teneur en chaux des matériaux.

IV.2.2. Vitesse des ondes P et S au cours des cycles hydriques

Les matériaux étant fortement atténuants la mesure des vitesses au cours des cycles après 90 jours de cure n'est pas réalisable avec notre dispositif de manière systématique pour tous les matériaux. En revanche, après 1an de cure, le matériau est plus rigide et permet la propagation des ondes dans tous les matériaux. L'ensemble de vitesses mesurées au cours des cycles après 1 an de cure est présenté dans la Figure IV.7.

Les vitesses des ondes dépendent également de la teneur en eau. Pour s'affranchir de prendre en considération ce paramètre, on cherche, autant que possible, à réaliser les mesures lorsque les

éprouvettes retrouvent la même teneur en eau qu'au cycle précédent. Dans l'interprétation, on sépare les mesures à faible ($\omega \approx 9\%$) et à forte teneur en eau ($\omega \approx 16\%$). Les teneurs en eau pour chaque mesure sont affichées sur le graphique.

Dans le cas du matériau de référence TW2%^d98, à teneur en eau égale, les vitesses V_p et V_s sont égales quel que soit le nombre de cycles appliquées. Or les autres mesures pratiquées sur ce matériau (R_c , érosion, résistivité électrique...) montrent une différence de comportement au fur et à mesure des cycles. La mesure des ondes P et S ne serait donc pas une mesure permettant de caractériser l'effet de diminution de la résistance à l'érosion et de la résistance mécanique du matériau provoquée par les cycles hydriques salins. La recherche de corrélation entre résistance mécanique et vitesse des ondes P et S viendra infirmer ou confirmer cela (voir chapitre 5).

Dans le cas du matériau de plus faible densité TW2%^d95, la vitesse des ondes P et S chute d'environ 50 m/s à l'issue du premier cycle et au cours du second cycle. Ensuite, la chute des vitesses est très modérée dans le cas des ondes P (moins de 20 m/s) voir quasi nulle dans le cas des ondes S. Il n'est pas clairement établi si les vitesses chutent d'un cycle à l'autre du fait de l'augmentation de la teneur en eau ou de la dégradation des composés cimentaires par l'apport d'eau de mer.

Entre 0 et 4 cycles les vitesses V_p et V_s chutent de manière significative dans le cas de SW2%^d98, et TW1%^d98 : environ -150 m/s pour l'onde P, -100 m/s pour les ondes S. Cependant les variations de teneur en eau entre les différentes mesures sont importantes (variation jusqu'à 2% de teneur en eau), et pourraient donc expliquer les variations de vitesses observés. Au vu de ces résultats les vitesses des ondes semblent être plus sensibles à la teneur en eau qu'à la dégradation supposée des composés pouzzolaniques.

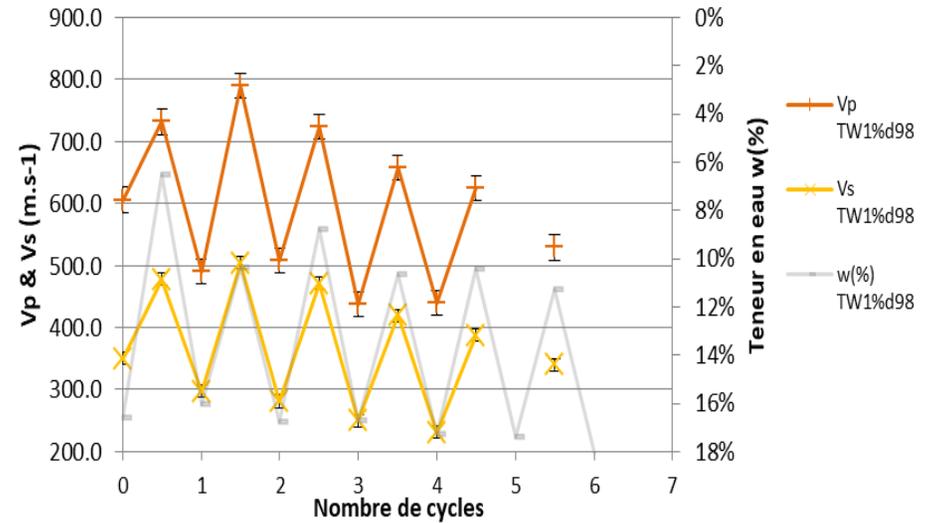
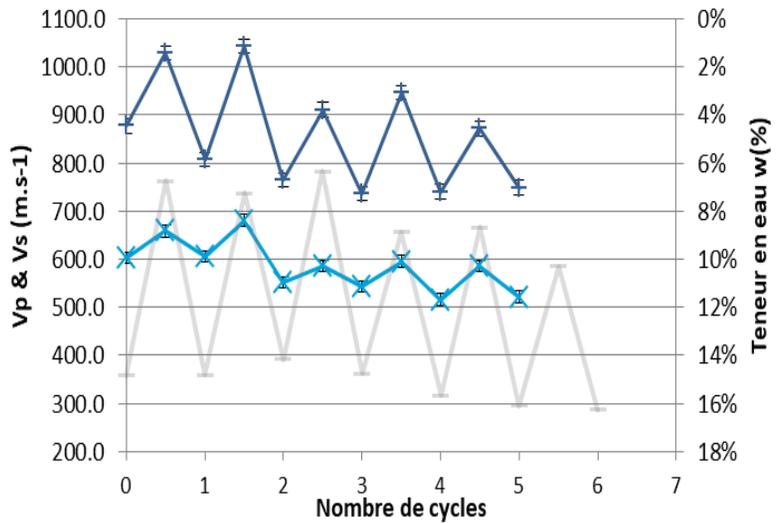
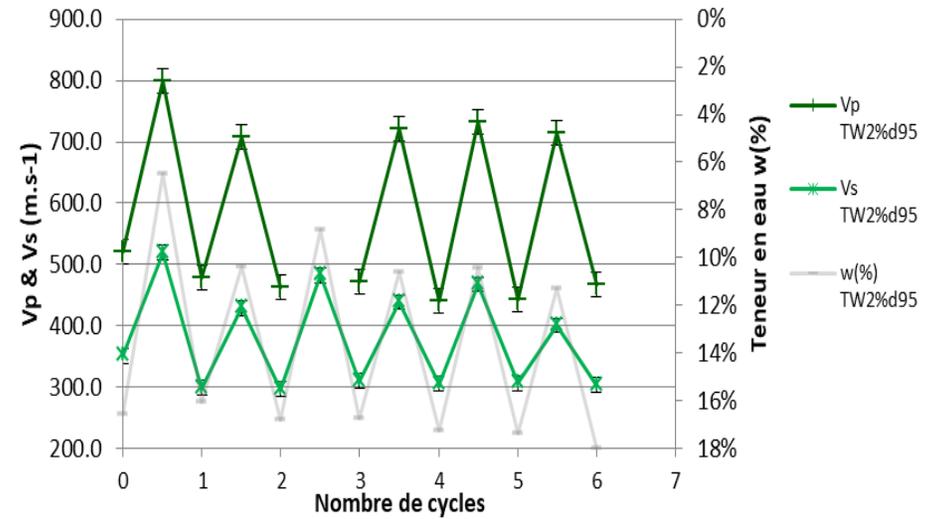
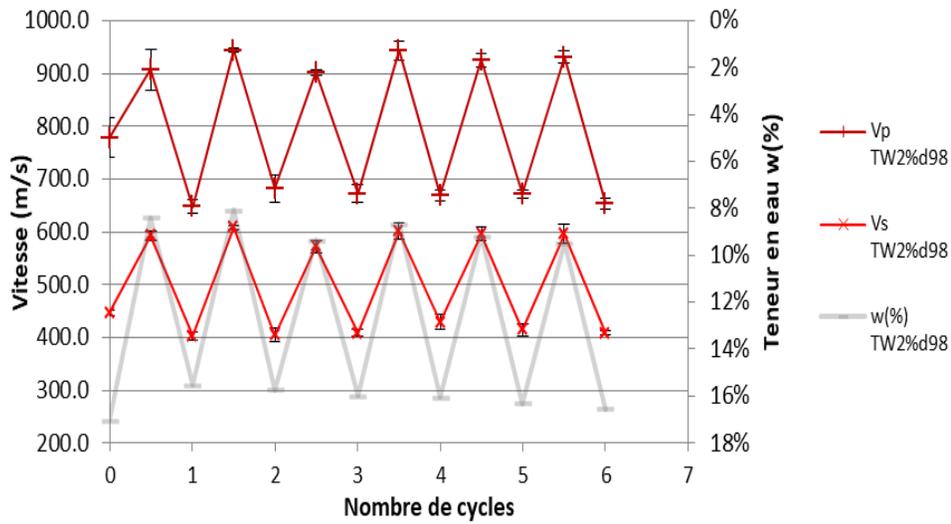


Figure IV.7 : Vitesse de propagation des ondes P et S dans les différents matériaux au cours des 6 cycles hydriques à l'eau de mer après 365 jours.

IV.2.3. Conclusion sur les mesures de vitesse des ondes P et S

La mesure de vitesse des ondes P et S permet de discriminer la teneur en chaux et la densité des matériaux. Les ondes P sont cependant plus discriminantes que les ondes S par rapport à ces paramètres. L'accroissement des vitesses au cours de la cure est un marqueur de l'activité pouzzolanique qui aboutit à la formation de composés cimentaires augmentant la cohésion interarticulaire et donc la vitesse des ondes sismiques. L'arrêt de l'accroissement des vitesses des ondes est un des indicateurs de l'arrêt des réactions pouzzolaniques. L'évolution des résistances en compression simple en est également un bon indicateur. Des corrélations entre résistance mécanique et vitesses sismiques dans le cas des sols traités à la chaux sont proposées dans le chapitre 5. La forte sensibilité des vitesses des ondes à la teneur en eau ne nous a pas permis de caractériser l'état des composés cimentaires au cours des cycles hydriques.

IV.3. Synthèse sur la caractérisation géophysique du limon traité à la chaux

Les mesures de caractérisation géophysique du limon traité à la chaux ont permis de montrer que :

- La résistivité du limon traité à la chaux augmente avec le temps de cure ;
- La résistivité du limon traité à 1 ou 2% de chaux et compacté entre 95 et 98 % de l'Optimum Proctor Normal (OPN) est comprise entre 2 et 4 $\Omega.m$ en fonction de son âge ;
- Le limon non traité à une résistivité d'environ 3 $\Omega.m$ et qui varie peu avec le temps ;
- Si le limon contient de l'eau de mer avant le traitement à la chaux alors sa résistivité est comprise entre 1 et 2,5 $\Omega.m$ en fonction de son âge ;
- Les deux premiers cycles de sollicitations hydriques à l'eau de mer provoquent la chute de la résistivité d'environ 50 % par rapport à la valeur de la résistivité avant les cycles, quel que soit le matériau ;
- Au cours des cycles suivants (>2), la résistivité diminue d'en moyenne 5% par rapport à la valeur du cycle précédent à chaque cycle supplémentaire ;
- Pour un matériau donné, les variations de résistivité liées à son âge (ou temps de cure) diminuent jusqu'à s'annuler avec les cycles de sollicitations hydriques à l'eau de mer ;
- La salinité semble avoir une influence prépondérante sur les valeurs de résistivité mais la modification de la composition du matériau, en particulier la dégradation supposée des

composés cimentaires au cours des cycles, aurait également un impact sur la résistivité des matériaux ;

- Les vitesses des ondes P et S dans le limon traité à la chaux augmentent avec le temps de cure ;
- La vitesse des ondes P (V_p) est comprise entre 500 et 900 m/s dans le cas des matériaux traités à la chaux (âge >140 jours), alors que dans le limon non traité V_p est comprise entre 300 et 400 m/s ;
- La vitesse des ondes S (V_s) est comprise entre 250 et 500 m/s dans le cas des matériaux traités à la chaux (âge >140 jours) alors que dans le limon non traité V_s est comprise entre 200 et 300 m/s
- V_s est sensible à la teneur en chaux et à la densité des matériaux et V_p l'est encore plus ;
- Les valeurs de V_p et V_s sont plus sensibles à la teneur en eau qu'au nombre de cycles de sollicitation hydrique subis. Nous avons eu des difficultés à relier V_p et V_s aux états de dégradation du matériau.

Au vu de l'ensemble des résultats, la résistivité électrique et les vitesses des ondes P et S ne permettent pas de caractériser les mêmes propriétés du limon traité à la chaux. Ce constat n'est pas une surprise, il est en cohérence avec les principes intrinsèques à ces deux types d'observables géophysiques très distincts et considérés comme complémentaires en géophysique de subsurface. Le Tableau IV.1 Tableau IV.1 : Synthèse sur la sensibilité des mesures électriques et sismiques aux variations des matériaux (âge, composition, histoire...) synthétise la sensibilité de chacune des méthodes géophysiques aux variations des propriétés des matériaux traités à la chaux. Cette synthèse confirme clairement que ces deux méthodes d'étude sont complémentaires pour la caractérisation physique du limon traité à la chaux.

Tableau IV.1 : Synthèse sur la sensibilité des mesures électriques et sismiques aux variations des matériaux (âge, composition, histoire...).

	Résistivité électrique	Vp & Vs
Discrimine l'âge du matériau pendant la cure	++ Jusqu'à 100% d'augmentation sur 1 an	+ Jusqu'à 40% d'augmentation sur 200 jours
Discrimine la densité et la teneur en chaux	- - (en présence d'eau de mer; ou pour des teneur en eau proche de la saturation) + (si faible teneur en eau et absence d'eau de mer)	++ (Ondes P) + (Ondes S)
Discrimine la salinité du matériau pendant la cure	+++	+
Discrimine le nombre de cycles subis	+ (jusqu'à 4 cycles) - (au-delà de 4 cycles)	+ (jusqu'à 1 cycle) - (au-delà de 1 cycle)
Sensible à la teneur en eau	- (proche de la saturation) ++ (pour des faibles teneurs en eau)	+++

Les valeurs des différentes propriétés des matériaux caractérisées au chapitre 3 et 4 sont liées aux conséquences du traitement à la chaux et aux cycles de sollicitations hydriques à l'eau de mer. La plupart des propriétés varient dans le même sens. La comparaison des cinétiques de dégradation des différents phénomènes pourrait aider à la compréhension des phénomènes physiques et/ou physico-chimiques responsables de ces dégradations. Les corrélations entre les propriétés obtenues par des mesures destructives (Rc, érosion...) et les propriétés géophysiques permettraient, si elles sont confirmées, d'optimiser le nombre de mesures à réaliser pour caractériser entièrement le sol traité à la chaux. Ces deux problématiques sont l'objet du chapitre 5.

V.Chapitre 5 : Analyse comparée des phénomènes en vue d'une optimisation de l'auscultation des digues.

Ce chapitre propose d'une part une synthèse sur la durabilité du limon de salin de Giraud traité à la chaux et d'autre part des corrélations entre les propriétés caractérisées dans la perspective d'optimiser les programmes d'auscultation des digues in-situ.

- La durabilité est caractérisée par la valeur des propriétés d'un matériau, et les changements des valeurs de ces propriétés provoquées par l'environnement. Les valeurs de l'ensemble de propriétés caractérisées dans le cadre de cette thèse sont données dans les chapitres 3 et 4. Dans cette partie, on s'intéresse aux variations relatives des différentes propriétés, entre elles et par rapport au matériau de référence.
- Les digues sont des ouvrages linéaires de plusieurs kilomètres. Le contrôle de l'état des digues, c'est-à-dire les propriétés de leurs matériaux constitutifs et l'homogénéité de répartition spatiale de ces propriétés, est délicat et coûteux. Le choix des techniques de surveillance et d'auscultation doit être optimisé pour trouver le compromis qui permet d'avoir le maximum de données sur l'ouvrage avec le minimum de mesures. Dans cette perspective, nous cherchons, à partir de l'ensemble des mesures présentées dans les chapitres 3 et 4, des corrélations pouvant amener à déduire totalement ou partiellement certaines propriétés du sol traité à la chaux, les une à partir des autres. Dans un premier temps, on cherche à établir des corrélations entre les propriétés mécaniques et d'érosion. Dans un second, on cherche à relier les propriétés mécaniques et d'érosion avec les observables géophysiques (résistivité électrique puis vitesses de propagation des ondes P et S).

V.1. Durabilités relatives

V.1.1. Comparaison des vitesses de dégradation des différentes propriétés

Dans cette sous-partie, on s'intéresse à la variation des différentes grandeurs mesurées les unes par rapport aux autres. Pour cela il est choisi de normaliser chaque grandeur (ou propriété) par sa valeur après 90 jours de cure et avant les cycles hydriques (donc à 0 cycle). L'objectif est de faire ressortir les

propriétés les plus sensibles aux cycles hydriques, c'est-à-dire celles qui se dégradent le plus vite. On s'intéresse également aux phénomènes de co-variations entre les différentes propriétés du matériau.

Pour chacun des matériaux, sont comparées en fonction du nombre de cycles, les propriétés suivantes, normalisées par leur valeur à 0 cycle (en parenthèse, la légende des figures qui suivent) :

- la résistivité électrique du matériau (Résistivité) ;
- la résistance en compression simple (R_c) ;
- les paramètres de la loi d'érosion pour l'érosion de conduit :
 - la contrainte de cisaillement critique lors de l'érosion (τ_c) ;
 - l'inverse du coefficient d'érosion ($1/ker$). La diminution du coefficient d'érosion traduit une diminution de l'érodabilité du sol. La diminution de l'inverse de ce coefficient traduit donc une augmentation de l'érodabilité ;
- la microstructure avec :
 - l'inverse du diamètre moyen des micropores ($1/d(\text{micropores})$). La diminution de ce paramètre traduit une augmentation du diamètre moyen des micropores. Ce cas est défavorable en terme de performance du matériau car cela pourrait augmenter la perméabilité du matériau ;
 - la porosité totale.

Les barres d'erreurs représentées sont les écarts-types normalisées par la valeur de la propriété initiale. Pour plus de lisibilité si les incertitudes normalisées sont inférieures à $5 \cdot 10^{-2}$, elles ne sont pas représentées sur les figures.

V.1.1.1. Cas du matériau de référence TW2% $\text{d}98$ (Figure V.1)

La résistance à l'érosion, représentée par les paramètres de la loi d'érosion (τ_c et ker), et la résistance en compression simple, sont les propriétés les plus fortement détériorées par les cycles. Les variations de la résistivité électrique et de la résistance en compression simple sont très similaires. L'impact des cycles hydriques sur ces deux propriétés est de moins en moins important au fil des cycles. Le chemin de variation de la contrainte d'érosion τ_c est différent de ceux de la R_c et de la résistivité mais les valeurs atteintes à partir de 8 cycles sont très proches. Après 12 cycles, ces trois propriétés valent environ 30% de leurs valeurs initiales. Les variations de l'inverse du paramètre d'érosion ker est disjoint de celle de τ_c . $1/ker$ diminue de 40 % par rapport à sa valeur initiale au cours des 2 premiers cycles, puis décroît de seulement 10 % au cours des 10 cycles suivants. Cette variation en deux phases se retrouve pour la porosité. En effet, le diamètre des micropores augmente de 30% ($1/d$ diminue de 30%) entre 0 et 2

cycles puis reste constant. La porosité totale varie elle aussi uniquement entre 0 et 2 cycles mais contrairement aux autres propriétés dans un sens favorable vis-à-vis d'une réduction possible de la perméabilité du matériau. Cette variation est très limitée, moins de 10 % de la porosité initiale.

Bilan provisoire : R_c et τ_c sont les paramètres les plus détériorés par les cycles hydriques. C'est donc de ces propriétés que dépend la résistance à long terme des digues. Ces propriétés peuvent donc être définies comme des critères de durabilité pour les digues.

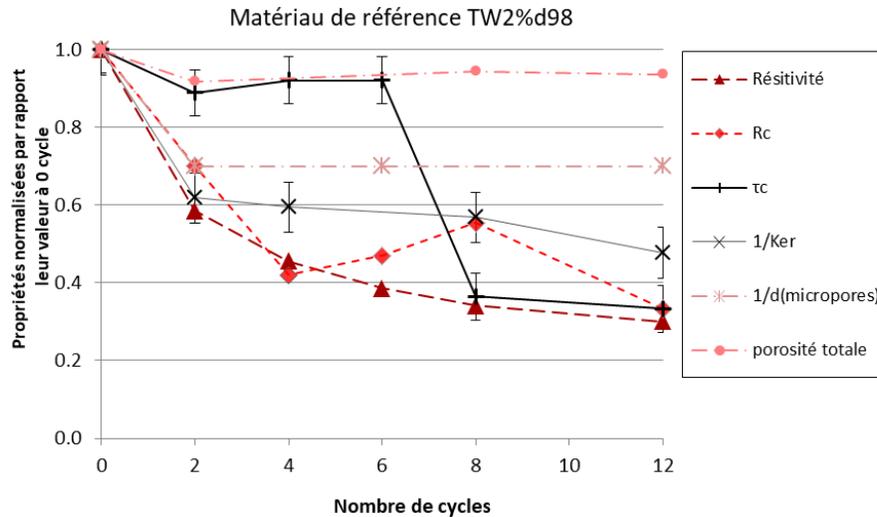


Figure V.1 : Evolution des propriétés normalisées par leurs valeurs à 0 cycle en fonction du nombre de cycles dans le cas du matériau de référence (cure 90 jours). La signification des légendes est donnée dans le texte.

V.1.1.2. Cas du matériau contenant initialement de l'eau de mer SW2% d98 (Figure V.2)

La résistance à l'érosion représentée par τ_c et ker est la propriété la plus fortement détériorée par les cycles. Les paramètres des lois d'érosion τ_c et $1/ker$ évoluent de manière semblable au cours des premiers cycles mais avec une amplitude différente. Entre 0 et 4 cycles les paramètres chutent, de 30% pour $1/ker$, de 70% pour τ_c , puis chute de seulement $10 \pm 5\%$ au cours des 8 cycles suivants dans le cas de τ_c . Le paramètre ker semblerait avoir atteint une valeur limite et n'est plus affecté par les cycles. Une coévolution notable apparaît entre la résistivité et la résistance en compression simple, comme pour le matériau de référence. Il semble exister une corrélation entre ces deux paramètres. Concernant la porosité, les observations sont les mêmes que pour le matériau de référence.

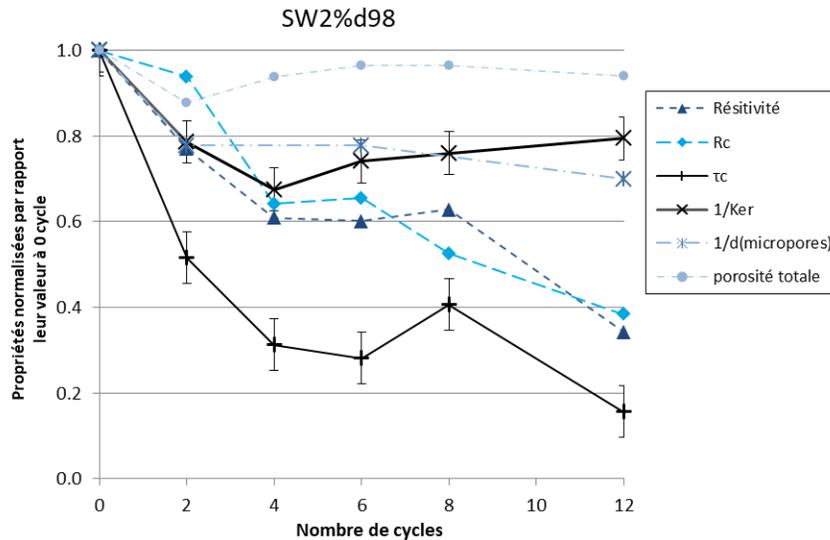


Figure V.2 : Evolution des propriétés normalisées par leurs valeurs à 0 cycle en fonction du nombre de cycles dans le cas du matériau préparé à l'eau de mer SW2% d98 (cure 90 jours). La signification des légendes est donnée dans le texte.

V.1.1.3. Cas du matériau TW2% d95 (Figure V.3)

Le matériau de plus faible densité présente une évolution plus chaotique, avec de plus grandes incertitudes, que pour les matériaux présentés précédemment. Nous expliquons ceci par une hétérogénéité plus grande entre les échantillons. Il est tout de même possible de conclure à une chute de propriété d'érosion respectivement d'environ -50% et -70% de la valeur initiale de τ_c et $1/ker$ après 2 cycles puis un ralentissement des dégradations de τ_c et une stabilisation de ker . Comme pour les autres matériaux, les valeurs normalisées des différentes propriétés font apparaître que la résistance à l'érosion est la propriété la plus dégradée par les cycles.

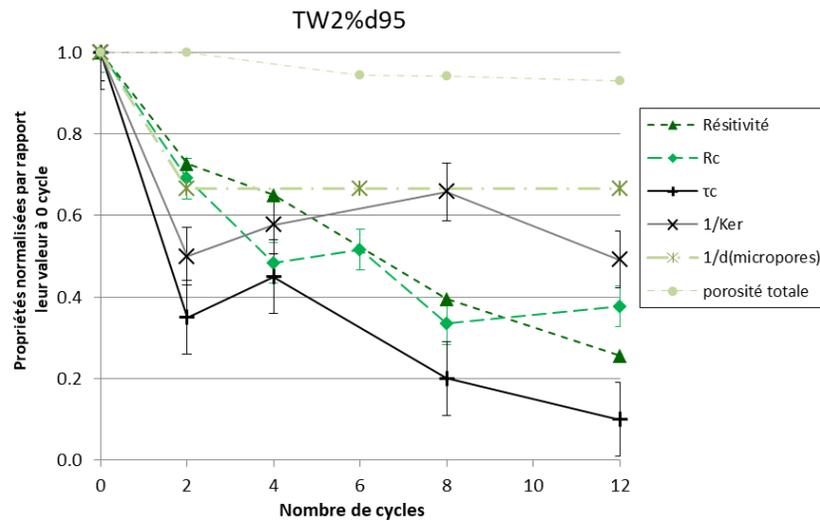


Figure V.3 : Evolution des propriétés normalisées par leurs valeurs à 0 cycle en fonction du nombre de cycles dans le cas du matériau le moins dense TW2% d95 (cure 90 jours). La signification des légendes est donnée dans le texte.

Les variations rapides des propriétés du matériau concordent avec les modifications de la microstructure entre 0 et 2 cycles. Au cours des 2 premiers cycles, la réorganisation de la microstructure provoquée par les variations hydriques (paragraphe III.4.2.1), pourrait être responsable de la diminution des propriétés mécaniques et d'érosions du matériau. Au-delà de deux cycles, la microstructure ne varie plus avec les cycles, l'agencement granulaire serait stabilisé et n'influerait donc plus sur les autres paramètres. La chute plus lente des propriétés du matériau serait alors liée à la dégradation des composés cimentaires par l'eau de mer.

V.1.1.4. Cas du matériau traité TW1%d98 (Figure V.4)

Dans le cas du matériau traité à 1 % de chaux, les variations des propriétés du matériau sont plus linéaires que pour les autres matériaux. La résistance à l'érosion reste la propriété la plus sensible aux cycles, suivie par la résistance mécanique en compression. La porosité totale est invariante. L'augmentation du diamètre moyen des pores est progressive. La résistivité varie beaucoup plus rapidement au cours des premiers cycles que pour les autres matériaux, peut être en lien avec une influence plus grande de la salinité de l'eau porale sur la résistivité lorsque la teneur en chaux est faible.

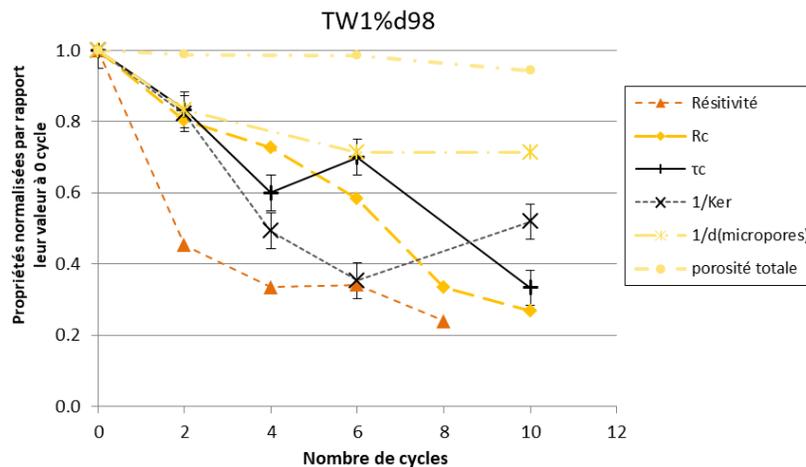


Figure V.4 : Evolution des propriétés normalisées par leurs valeurs à 0 cycle en fonction du nombre de cycles dans le cas du matériau ayant la plus faible teneur en chaux TW1%d98 (cure 90 jours). La signification des légendes est donnée dans le texte.

V.1.1.5. Conclusions

La résistance à l'érosion de conduit est la propriété la plus affectée par les cycles, avec une perte de 60 à 80% de sa valeur initiale en fonction des matériaux. La diminution de la R_c est généralement plus lente mais les écarts aux valeurs initiales, après 12 cycles, sont également de 60 à 80 % en fonction du matériau considéré. Une corrélation entre τ_c et R_c sera recherchée dans la suite de ce chapitre. La sensibilité de ces propriétés aux actions de l'environnement (cycles) en fait de bons indicateurs de la durabilité d'une digue.

Dans le cas du sol traité à 2% de chaux, toutes densités confondues, on remarque une évolution en deux phases concomitantes avec les variations de la microstructure. Lors de la première phase (0 à 2 cycles), l'agencement des grains se réorganiserait sous l'effet notamment du séchage comme vu dans le chapitre 3, mais possiblement aussi lors la ré-humidification à l'eau de mer. Cette réorganisation serait responsable du changement rapide des propriétés. Dans un second temps, les dégradations plus lentes pourraient être associées à la dégradation des composés cimentaires. Si le volume occupé par les composés cimentaires est plus faible que ce qu'il est possible de détecter par la porosimétrie au mercure alors cela expliquerait que leurs dégradations ne soient pas détectées lors des analyses. Des analyses en imagerie au microscope électronique à balayage, ou en micro-tomographie seraient nécessaires pour vérifier ces hypothèses.

Les variations normalisées de résistivité électrique du matériau suivent les mêmes tendances que R_c et les paramètres de la loi d'érosion, ce qui peut laisser supposer l'existence de corrélation directe entre ces propriétés. Cependant, plusieurs des propriétés du sol aux quelles est différemment sensible la résistivité, changent en même temps : la salinité (avérée) ; l'organisation des grains (supposé) ; la quantité de composés cimentaires formés ; la quantité de chaux dissoute dans l'eau porale. C'est pourquoi la résistivité n'est sans doute pas facilement corrélable avec un paramètre en particulier. Les recherches de corrélation entre résistivité électrique et propriété mécanique et d'érosion, font l'objet de la partie V.3.

V.1.2. Durabilité relative des matériaux : effet de la composition et de la densité

V.1.2.1. Résultats

Il a été vu dans la sous-partie V.1.1 que les propriétés des matériaux les plus dégradées par les cycles de séchage-humidification à l'eau de mer sont la résistance à l'érosion et la résistance en compression simple. Ces propriétés sont donc définies comme les critères de durabilité. Par rapport au matériau de référence TW2% ρ 98, on jugera de l'influence de variation de la salinité du sol initial, de la teneur en chaux et de la densité sur la durabilité du matériau à partir de l'évolution de ces deux critères. L'étude est menée à partir des mesures effectuées sur les matériaux après 90 jours de cure.

Chaque grandeur est normalisée par la valeur de cette grandeur dans le cas du matériau une référence à « 0 cycle » (=valeur de référence). La Figure V.5 présente les variations des paramètres normalisés de la loi d'érosion.

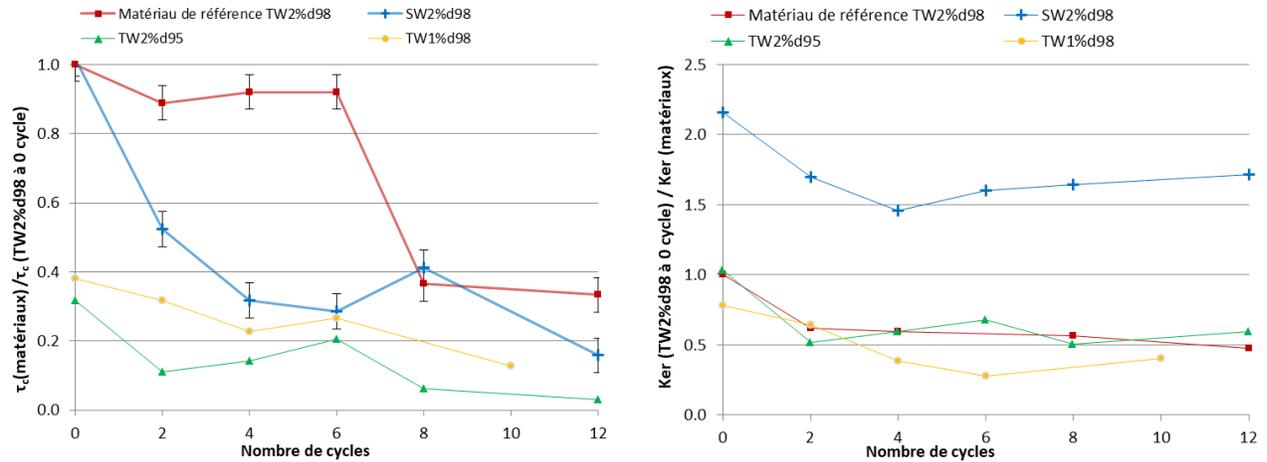


Figure V.5 : Variation de τ_c normalisée (à gauche) et de $1/\text{ker}$ normalisé (à droite) en fonction du nombre de cycles hydriques imposés et des matériaux.

Avant les cycles hydriques, la baisse de la teneur en chaux et la baisse de la densité par rapport au matériau de référence engendre respectivement une baisse de 60 et 70% de la contrainte τ_c par rapport à la valeur de cette contrainte dans le cas du matériau de référence. Au cours des cycles, la différence sur la contrainte τ_c , liée aux différents dosages et chaux et à la densité, s'amenuise (environ 30 % de différence après 12 cycles), mais le matériau de référence conserve une contrainte τ_c plus élevée. Le limon initialement salé présente la même contrainte τ_c que le matériau de référence à l'état initial et au-delà de 8 cycles, bien que le chemin de variations de τ_c entre ces deux états soit différent. La salinité initiale du sol n'a donc pas d'impact sur la valeur de la contrainte τ_c à long terme. Le coefficient d'érosion ker qui relie la contrainte de cisaillement et le taux d'érosion, est inversement proportionnel à la résistance à l'érosion (i.e. plus la valeur de ker est grande, plus l'érosion est importante pour une contrainte de cisaillement donnée). Pour tous les matériaux traités à la chaux, à l'exception du sol salé (SW2%d98), ker augmente au cours des 4 premiers cycles d'environ 40 % de sa valeur initiale, puis reste quasi constant jusqu'à 12 cycles. La valeur du coefficient d'érosion n'est pas impactée par la variation de densité entre 98 et 95% de l'OPN. En revanche, dans le cas d'un traitement à 1% de chaux, ker est en moyenne 20% plus élevé que d'un traitement à 2 % de chaux. Dans le cas du limon contenant initialement de l'eau de mer, ker est environ deux fois plus faible que pour le matériau de référence et n'est que peu impacté par les cycles hydriques (augmentation de moins de 20 % de sa valeur initiale en 12 cycles). Ce matériau reste donc dans la catégorie d'érosion « modérément lent » de la classification de Wan & Fell malgré les cycles hydriques contrairement aux matériaux « non salés ». L'ensemble des résultats des essais d'érosion interne permettent de conclure que les cycles hydriques à l'eau de mer provoquent la diminution de la résistance à l'érosion de conduit au regard des conditions d'initiation de

l'érosion mais n'ont en revanche que peu d'impact à long terme sur le coefficient d'érosion. Le matériau le plus durable vis-à-vis de ce phénomène d'érosion est celui contenant du sel (SW2%d98), suivi du matériau de référence (TW2%d98). La baisse de la densité du matériau et plus encore la baisse de la teneur en chaux diminue la résistance à l'érosion donc la durabilité du matériau.

La résistance en compression simple (Figure V.6), dans le cas du matériau de référence, perd environ 50% de sa valeur initiale au cours des premiers cycles, puis se stabilise (variation de moins de 10 %). La diminution de densité entre 98 % de l'OPN et 95 % de l'ONP engendre une perte d'environ 50 % de la résistance en compression simple. Idem pour une diminution de la teneur en chaux. La salinité initiale limite la décroissance de Rc au cours des premiers cycles, mais à long terme, au bout de 8 et 12 cycles, les valeurs de Rc sont identiques à 10 % près que le sol contienne ou non du sel (même teneur en chaux et même densité par ailleurs). La densité et la teneur en chaux sont deux paramètres qui contrôlent de manière prépondérante la durabilité du matériau vis-à-vis de sa résistance en compression simple.

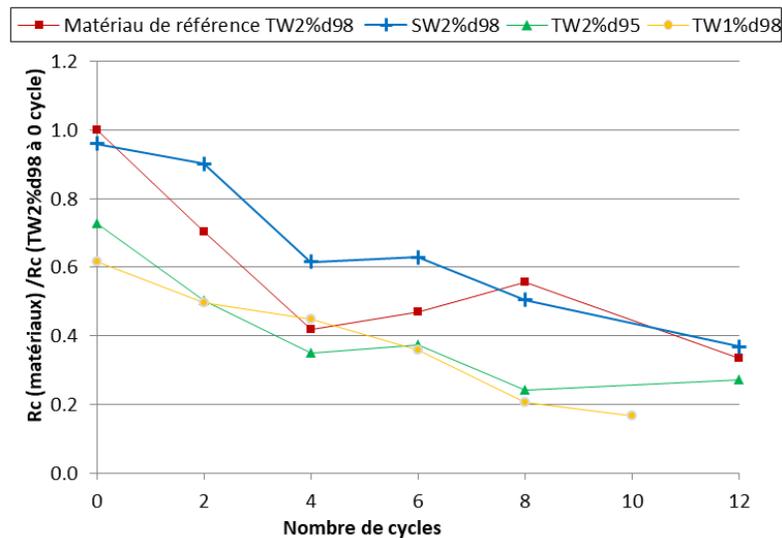


Figure V.6 : Variation de Rc normalisée par la valeur à 0 cycles du matériau de référence, en fonction du nombre de cycles hydriques imposés et des matériaux.

V.1.2.2. Conclusion

Quelles que soient les propriétés considérées, la durabilité est principalement contrôlée par la densité et la teneur en chaux des matériaux. Une baisse de la teneur en chaux ou de la densité entraîne une baisse significative (-40 % à -60 % par rapport au matériau de référence), de la résistance à l'érosion et de la résistance en compression simple, à l'état initial et suite aux cycles hydriques à l'eau de mer. La salinité initiale du sol améliore la résistance à l'érosion à long terme, mais n'a pas d'influence majeure sur la résistance en compression simple.

V.2. Relations entre résistance mécanique et érosion

Suite au traitement à la chaux, la résistance mécanique du sol dépend de la quantité de composés cimentaires formés lors des réactions pouzzolaniques. Les composés cimentaires apportent de la cohésion inter-particulaire et augmentent la résistance à l'érosion. L'érosion et la résistance mécanique étant dépendant du même phénomène, des corrélations sont recherchées entre ces deux propriétés, à partir des essais menés pendant les cycles hydriques, après 90 jours de cure.

V.2.1. Résultats

La Figure V.7 présente pour tous les matériaux, les valeurs des contraintes de cisaillement critique (τ_c) en fonction des valeurs de résistance en compression simple (R_c). La teneur en eau de tous les matériaux testés est de 18 ± 1 %. Les valeurs de ces propriétés chutent sous l'effet des cycles hydriques. Une tendance linéaire apparaît entre le τ_c et R_c , mais avec un facteur 1000 entre l'ordre de grandeur de R_c et de τ_c . La droite noire correspond à la régression linéaire calculée à partir de tous les points (sauf les points encerclés). R^2 est le coefficient de détermination représentatif de la dispersion des données autour de la droite de régression linéaire. Les droites grises représentent l'enveloppe dans laquelle se répartissent les points ($R_c ; \tau_c$).

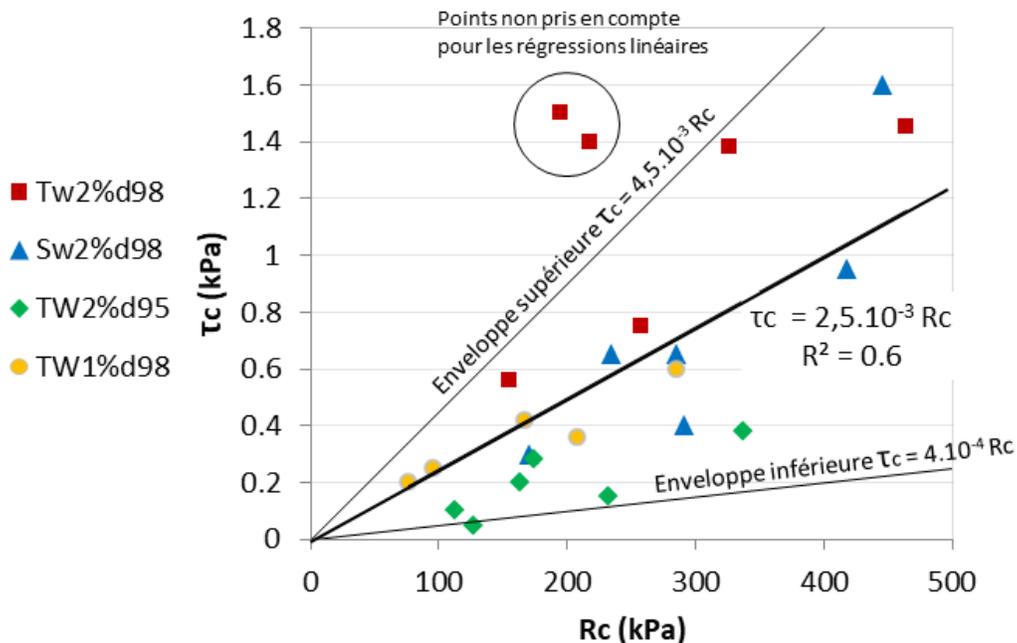


Figure V.7 : Contrainte de cisaillement critique en fonction de la résistance en compression simple. Les valeurs présentées sont issues des mesures réalisées après 0 à 12 cycles hydriques à l'eau de mer, après 90 jours de cure pour chacun des 4 matériaux traités.

Lorsque $\tau_c < 1,2$ kPa, la décroissance de la résistance en compression simple est corrélée quasi linéairement avec la décroissance de la contrainte de cisaillement critique. La dispersion des points à l'intérieur de l'enveloppe est importante. Une analyse plus fine, matériau par matériau, fait apparaître des corrélations linéaires différentes en fonction de la composition et de la densité des matériaux (Figure V.2).

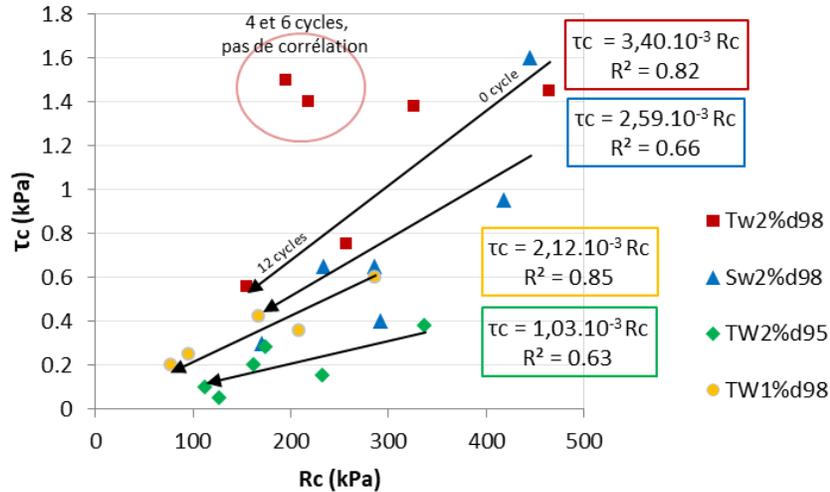


Figure V.8 : Corrélations linéaires entre R_c et τ_c pour chacun des matériaux. Le sens des flèches indique l'augmentation du nombre de cycles subi par le matériau.

Les coefficients directeurs des droites de régression linéaire augmentent avec la teneur en chaux (environ $+1 \cdot 10^{-3}$, pour +1% de teneur en chaux) et avec la densité (environ $+1 \cdot 10^{-3}$, pour une augmentation de la densité sèche de 74 kg.m^{-3}). La dispersion des valeurs dépend également des formulations. Le matériau traité à 1% présente la plus faible dispersion autour de la droite de régression linéaire. Les matériaux traités à 2% de chaux et compactés à 98% de l'OPN (TW2%d98 et SW2%d98), présentent une dispersion importante autour de la droite de régression linéaire, notamment au cours des premiers cycles hydriques (jusqu'à 6 cycles pour TW2%d98, jusqu'à 2 cycles pour SW2%d98) lorsque les contraintes tangentielles critiques (τ_c) sont supérieures à 1,2 kPa.

V.2.2. Discussion

V.2.2.1. Variabilité et critère de sécurité

Les relations entre les contraintes de cisaillement critique (τ_c) en fonction des valeurs de résistance en compression simple (R_c) dépendent de la teneur en chaux, de la salinité initiale du matériau et de la densité. Cela ne permet pas d'établir une équation généralisée de la forme $\tau_c = \alpha R_c$ avec une valeur de α unique pour tous les matériaux. De plus, empiriquement, il est constaté qu'au-delà de $\tau_c = 1,2 \text{ kPa}$, τ_c ne dépend plus de R_c . La valeur du coefficient α doit être déterminée par des essais au laboratoire pour

chaque matériau (nature du sol, teneur en chaux, densité) en fonction du nombre de sollicitations (cycles) subies. Cette équation pourrait alors être utilisée pour limiter les prélèvements in situ et le nombre d'essais à réaliser pour approximer les valeurs de R_c à partir des essais d'érosion tant que $\tau_c < 1$ kPa (ou inversement, à condition de s'être assuré que la condition sur τ_c est vérifiée). Pour vérifier cela, des essais sur des échantillons non remaniés de sol prélevé dans l'ouvrage Digue2020 devront être menés.

Pour éviter de refaire une étude pour chaque nouveau matériau traité à la chaux, il serait possible d'utiliser les enveloppes supérieures et inférieures de la figure V.1 comme critère de sécurité. Pour une mesure de R_c , l'enveloppe inférieure donne la correspondance avec une valeur minimale de τ_c possible quel que soit le matériau. Inversement, si l'on dispose de la valeur de τ_c , la valeur la plus pessimiste de R_c est donnée par l'équation de droite de l'enveloppe supérieure.

Exemple :

- si la résistance en compression simple mesurée est de 300 kPa, la contrainte de cisaillement critique pour laquelle se déclenche l'érosion est au minimum égale à 0,15 kPa ;
- si la contrainte de cisaillement critique mesurée est de 1 kPa, la résistance en compression simple est au minimum de 222 kPa.

Pour fiabiliser les limites de cette enveloppe, il faudrait obtenir les lois d'érosion et les résistances en compression simple pour différents sols traités à la chaux.

V.2.2.2. Cas du matériau de référence entre 0 et 6 cycles

Dans le cas du matériau de référence (TW2% $\text{d}98$), la décroissance de la contrainte tangentielle critique commence après le 6^{ème} cycle (Figures III.2 et V.1) alors que la résistance en compression simple décroît dès le premier cycle (Figures III.32 et V.1). Ce décalage d'initiation de dégradation ne s'observe pas pour les autres matériaux, même lorsque la teneur en chaux et la densité sont les mêmes que le matériau de référence et que seule la salinité initiale du matériau change (SW2% $\text{d}98$).

L'hypothèse suivante est émise :

- dans le cas du matériau de référence, malgré la floculation des argiles liée au traitement à la chaux (Little, 1995), les minéraux sont globalement orientés perpendiculairement au sens de compactage qui est également le sens du courant. Cette orientation préférentielle perpendiculaire à la direction du cisaillement rend la contrainte cisailante moins efficace à l'arrachement des particules, même si, comme le laisse supposer la diminution des valeurs de R_c , les composés cimentaires se dégradent avec les cycles. Du fait de l'orientation des minéraux et

agrégats la contrainte de cisaillement critique serait peu sensible à la dégradation des composés cimentaires, jusqu'à un certain point (au-delà de 6 cycles). La R_c serait donc plus sensible que la contrainte de cisaillement critique τ_c , à la dégradation des composés cimentaires par les cycles. Les cycles salins pourraient également provoquer une désorientation progressive des minéraux et agrégats et amener le matériau vers une configuration similaire à celle du matériau initialement salé ;

- dans le cas du sol initialement salé avec la même teneur en chaux et densité que le matériau de référence (SW2% \geq 98), la diminution de la contrainte de cisaillement critique, tout comme la résistance en compression simple, chutent dès les premiers cycles. La floculation des argiles liées à l'eau de mer (Vaughan and Soares, 1982) en plus de la floculation liée à la chaux formerait des agrégats plus importants et la compaction aurait peu d'influence sur l'orientation des particules dans le matériau. La microrugosité à l'interface sol-eau faciliterait l'arrachement des particules dès que la cohésion apportée par les composés cimentaires diminue (ce qui est le cas dès les premiers cycles hydriques). En revanche, les forces électrostatiques entre les particules apportées par l'eau de mer limite la taille des particules arrachées (Haghighi, 2012) et donc le taux d'érosion. Ce scénario hypothétique concilie donc bien les résultats expérimentaux présentés au chapitre 3 et les évolutions relatives de la résistance mécanique et de la résistance à l'érosion en fonction de la formulation des matériaux. Les observations microstructurales sont manquantes pour confirmer ou infirmer les hypothèses ;
- dans le cas d'une teneur en chaux ou d'une densité plus faible que le matériau de référence, la cohésion apportée par les composés cimentaires à 0 cycle est équivalente à celle du matériau de référence à 8 cycles. A partir de ce stade-là quel que soit le matériau, τ_c et R_c diminuent avec l'augmentation du nombre de cycles.

Ce scénario concilie l'ensemble des observations mais l'imagerie à l'échelle microstructurale serait nécessaire pour le confirmer ou l'infirmer.

V.2.2.3. Conclusion sur la relation entre résistances mécanique et érosion du limon traité à la chaux

La résistance mécanique en compression simple et la contrainte tangentielle critique τ_c définissant les conditions d'initiation de l'érosion diminuent lorsque le matériau subit des cycles de séchage-humidification à l'eau de mer. Les diminutions de ces deux facteurs sont corrélées, mais la valeur de la corrélation dépend des matériaux. Il est possible de définir des équations limites valables pour tous les matériaux de l'étude qui permettent d'obtenir une valeur de τ_c minimale pour une valeur de R_c donné

(«enveloppe inférieure »), ou inversement (« enveloppe supérieure »). L'absence de corrélation dans le cas du matériau de référence entre 0 et 6 cycles, montre que les valeurs de τ_c ne sont pas uniquement contrôlées par la cohésion apportée par les composés cimentaires.

La résistance en compression simple est un essai plus simple à réaliser qu'un essai d'érosion HET. C'est pourquoi nous avons cherché exprimer $\tau_c = f(R_c)$.

Au vu de la variabilité de la relation $\tau_c = f(R_c)$ avec la composition et la densité des matériaux, l'utilisation de cette relation lors de mesures in situ ne permet pas une estimation précise d'une des propriétés à partir de l'autre mais seulement d'estimer la valeur minimale possible d'une des propriétés.

V.3. Relations entre résistivité, érosion et résistance en compression simple

Dans le chapitre III, il est montré que les résistances en compression simple et à l'érosion diminuent avec l'augmentation du nombre de cycles à l'eau de mer (paragraphe III.1.1 et III.3.1). Dans le chapitre 4, il est montré que la résistivité électrique du matériau diminue rapidement au cours des deux premiers cycles, ce qui correspond au changement de salinité de l'eau porale en raison de la pénétration de l'eau de mer dans le matériau, puis la vitesse de variation chute mais reste non nulle. Au-delà de deux cycles, deux hypothèses sont émises pour justifier la variation de la résistivité :

- soit l'eau porale est saturée en sel et c'est la dégradation d'une partie des composés cimentaires qui libère en solution des ions calcium, silicium et aluminium, ce qui entraînerait la diminution de la résistivité. Si c'est le cas, la résistivité permettra de remonter à l'évolution des propriétés mécaniques et d'érosion qui dépendent de l'état de cimentation ;
- soit le sel s'accumule plus lentement qu'au cours des deux premiers cycles, par un phénomène de cristallisation au cours des phases de séchage et re-dissolution partielle du sel qui augmente la concentration ionique de l'eau porale et entraîne la diminution de la résistivité. Dans ce cas-là, la résistivité pourra être reliée à la salinité du sol, elle-même dépendante du nombre de cycles de sollicitations hydriques à l'eau de mer. L'évolution de la résistivité ne nous renseignerait donc pas directement sur dégradation des propriétés du matériau apportées par le traitement à la chaux.

Il est également possible que les deux phénomènes se produisent simultanément. Pour chercher des arguments en faveur de l'une ou l'autre hypothèse, une recherche de corrélations entre les valeurs de résistivité et de résistance en compression simple, et entre les valeurs de résistivité et de résistance à l'érosion est effectuée.

V.3.1. Résistivité et résistance en compression simple

V.3.1.1. Résultats et interprétations

La Figure V.9 présente les valeurs de résistivité et de résistance en compression simple pour le matériau de référence après différents nombres de cycles. A zéro cycle et après 2 cycles la résistivité semble être corrélée avec la résistance en compression simple : plus la résistivité est élevée plus la résistance en compression simple est élevée. Cependant les variations de résistivité ne sont que de 0,2 $\Omega.m$, soit la variation correspondant à une différence de 1% de teneur en eau (paragraphe IV.1.1), ce qui est le cas entre les échantillons testés. La chute de résistivité d'environ 1,2 $\Omega.m$ entre 0 et 2 cycles correspond à une chute de la résistance en compression simple d'environ 100kPa, mais cette corrélation n'est pas valable au-delà de 2 cycles, ce qui montre que c'est la salinité de l'eau porale qui influence le plus la valeur de la résistivité. Entre 4 et 12 cycles, la résistivité est d'environ 1 $\Omega.m$ quel que soit le nombre de cycles alors de la résistance en compression simple varie entre 150 et 275 kPa. Les cycles hydriques dégradent la résistance mécanique du sol traité à la chaux mais il est difficile de corréler directement la mesure de la résistivité qui dépend de manière prépondérante de la salinité de l'eau dans les pores. Cependant le ralentissement de la dégradation des résistances en compression simple au-delà de 4 cycles concorde avec le ralentissement de la baisse de résistivité, ce qui montre que les deux propriétés sont tout de même liées. Les deux hypothèses émises en introduction de cette partie semblent vérifiées avec une prépondérance de l'effet de l'augmentation de la concentration en sel sur les valeurs de résistivité. Les valeurs de résistivité en présence d'eau de mer ne peuvent permettre de déterminer avec précision les valeurs de résistance en compression simple.

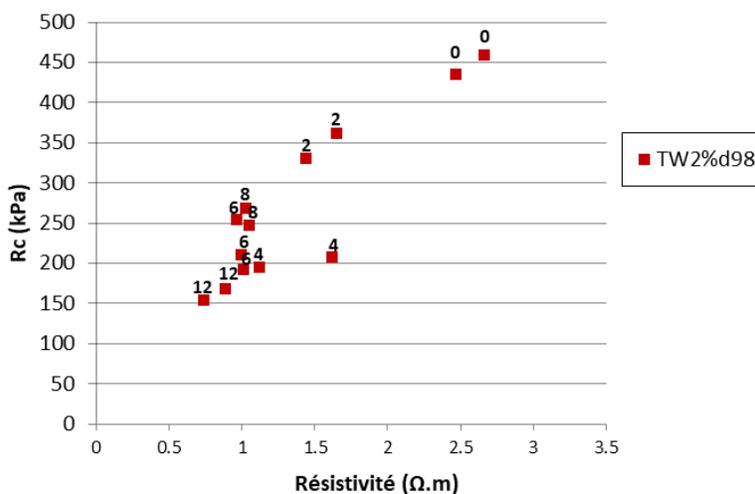


Figure V.9 : Résistance en compression simple (R_c) en fonction de la résistivité électrique du matériau de référence au cours des cycles hydriques après 90 jours de cure. Les chiffres sur le graphique indiquent les nombres de cycles après lesquels les mesures sont réalisées.

On recherche tout de même à obtenir pour une valeur de résistivité donnée, un intervalle dans lequel se trouve la résistance mécanique correspondante. Pour ce faire, l'analyse est élargie à l'ensemble des matériaux de notre étude. La Figure V.10 présente l'ensemble des couples de valeurs (résistivité ; résistance en compression simple) obtenus après les cycles hydriques pour l'ensemble des matériaux étudiés.

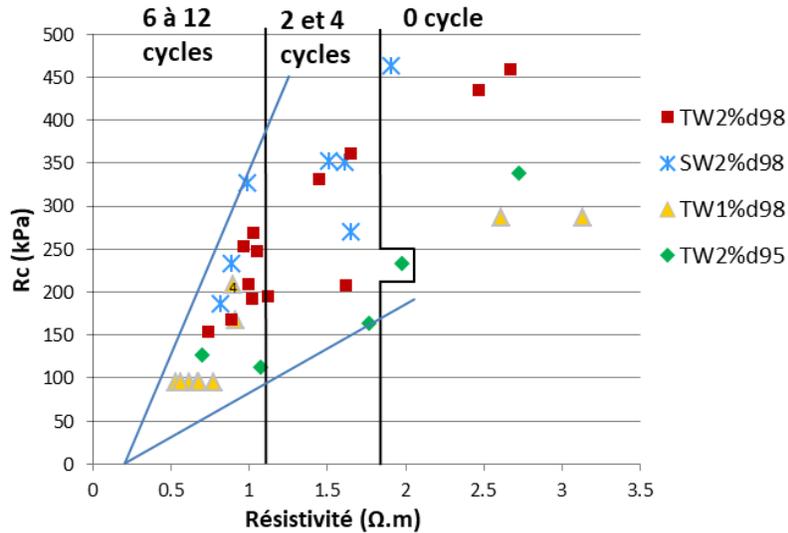


Figure V.10 : Tracé des couples (résistivité ; résistance en compression simple (Rc) en fonction de leur composition et mise en relation avec le nombre de cycles subis. Les droites bleues définissent une enveloppe empirique dans laquelle se trouvent tous les valeurs de résistance en compression simple correspondant à une valeur de résistivité.

En l'absence de cycle, la résistance en compression simple est sensible à la teneur en chaux et à la densité mais peu à la présence de sels dans le matériau. Au contraire la résistivité est sensible à la salinité initiale et peu à la teneur en eau. Avant les cycles hydriques, la résistance en compression simple et la résistivité ne sont pas corrélées. Suite à l'application des cycles à l'eau de mer, l'évolution de la Rc et de la résistivité est similaire à celle du matériau de référence décrite précédemment.

V.3.1.2. Conclusion

Du fait de la salinité, la résistivité n'est pas directement corrélée à la résistance mécanique en compression simple, mais il est possible de définir empiriquement un intervalle contenant la valeur de résistance en compression simple d'un matériau à partir de la valeur de sa résistivité après 2 à 12 cycles. Par exemple pour une résistivité de 1 Ω.m, la résistance en compression simple est comprise entre 80 et 350 kPa. Plus la teneur en chaux est élevée et plus la densité est élevée, plus la valeur de la résistance en compression simple est proche de la valeur maximale de l'intervalle.

Des mesures in situ sur l'ouvrage Digue2020 devront être réalisées et comparées, pour des mêmes états hydriques et de salinité, avec les résultats présentés ici pour valider empiriquement la corrélation entre résistivité et résistance mécanique.

V.3.2. Résistivité et érosion

V.3.2.1. Résultats et interprétations

On cherche à relier résistivité et condition d'initiation de l'érosion de conduit, c'est-à-dire la valeur de la contrainte de cisaillement critique τ_c . La Figure V.11 présente les valeurs des contraintes de cisaillement critique τ_c et des résistivités pour les quatre matériaux traités après les différents nombre de cycles hydriques à l'eau de mer réalisés. Chaque point correspond à la valeur moyenne de deux mesures de τ_c et à la valeur moyenne sur 3 points de la résistivité pour un nombre de cycles indiqués à côté du point. Le temps de cure avant les cycles est de 90 jours.

Les relations entre τ_c et résistivité dépendent fortement de la composition et de la densité des matériaux. Dans les chapitres 3 et 4, il est montré que la contrainte de cisaillement critique τ_c et la résistivité diminuent avec le nombre de cycles hydriques, à l'exception du matériau TW2% $\text{d}98$ pour lequel la valeur de la contrainte de cisaillement critique τ_c est quasi constante jusqu'à 6 cycles. La vitesse de décroissance de la résistivité est du même ordre de grandeur pour les matériaux initialement non salés (environ $0.0956 \text{ } \Omega \cdot \text{m}/\text{cycle}$), mais les vitesses de décroissance de la contrainte de cisaillement critique τ_c diffèrent fortement d'un matériau à l'autre.

La résistivité est principalement contrôlée par la salinité de l'eau, la mesure est peu sensible aux variations liées à la dégradation des composés cimentaires issus du traitement à la chaux, alors que les conditions de l'initiation de l'érosion (τ_c) dépendent de la quantité et de l'état des composés cimentaires ainsi que, semblerait-il, de la géométrie de l'arrangement des grains du sol. La salinité de l'eau porale et l'état des composés cimentaires dépendent du même paramètre : le nombre de cycles hydriques à l'eau de mer subis par le sol traité. Cette variable commune explique les corrélations entre observés les valeurs des contraintes de cisaillement critique τ_c et la résistivité. Les conséquences des cycles hydriques sur les lois d'érosion étant très différentes en fonction des matériaux (paragraphe V.1.3) cela explique que l'on observe une forte variation des corrélations en fonction de la teneur en chaux et de la densité (Figure V.12).

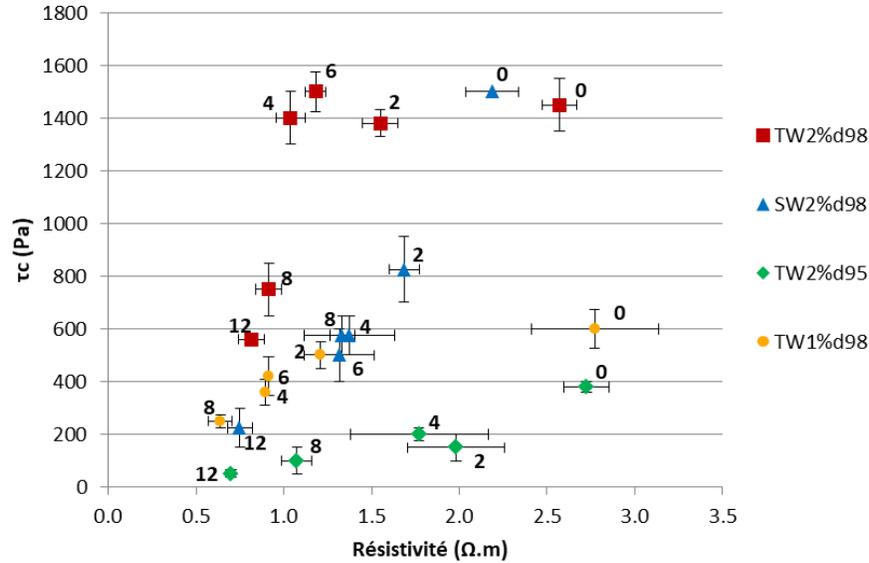


Figure V.11 : Contraintes de cisaillement critique τ_c , déterminées par les essais HET, et la résistivité du matériau correspondante. Les numéros indiquent le nombre de cycles réalisés avant la mesure. Le temps de cure avant les cycles est de 90 jours.

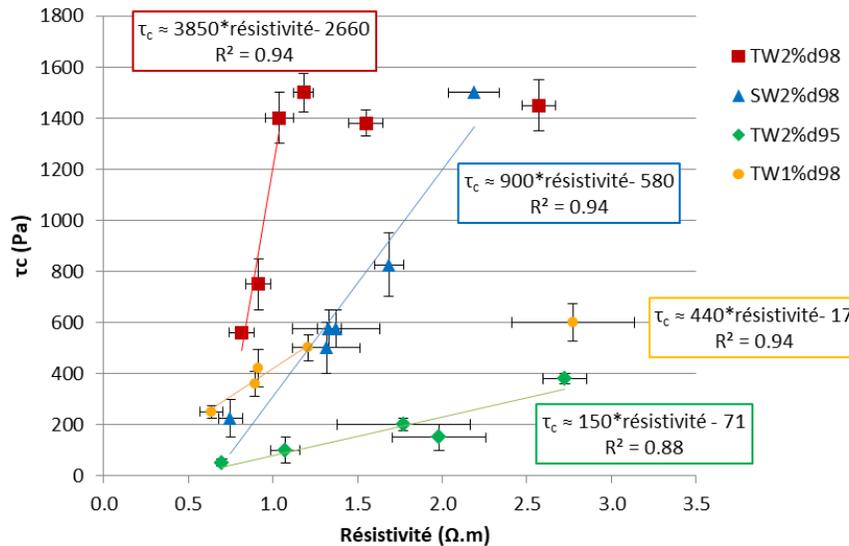


Figure V.12 : Equation des régressions linéaires pour chacun des matériaux. Le point correspondant à l'état initial à 90 jours de TW1%d98, et ceux correspondants à l'état initial et après 2 et 4 cycles de TW2%d98 ne sont pas pris en compte pour les régressions.

Pour une augmentation de densité de 74 kg.m^{-3} (comparaison TW2%d98 et d95) le coefficient directeur des droites de corrélation augmente d'un facteur 25. Dans le cas de la présence de sels lors de la préparation (SW2%d98), celui-ci diffère d'un facteur 5. En revanche, il apparaît que pour un traitement à 2 % de chaux, pour une cohésion nulle ($\tau_c=0$) qui arriverait après un certain nombre de cycles à l'eau de mer, la résistivité du matériau serait d'environ $0,6 \text{ } \Omega.m$ quelle que soit la densité.

La modification de la relation entre contrainte de cisaillement critique et résistivité indique un changement de densité ou de teneur en chaux du matériau.

Comme après 90 jours de cure, les valeurs après 1 an des contraintes de cisaillement critique τ_c et des résistivités sont mises en relation (Figure V.13). Les relations entre résistivité et contraintes de cisaillement critique τ_c sont encore différentes de celles établies après 90 jours de cure. Cela confirme que la résistivité et la contrainte de cisaillement critique ne sont pas directement corrélées mais dépendent d'un troisième paramètre qui est le nombre de cycles de séchage-humidification subis. Les cycles provoquent l'augmentation de la salinité (conséquences sur la résistivité) et modifieraient l'état des composés cimentaires et l'organisation microstructurale du matériau (conséquence sur la résistance à l'érosion). Cependant, l'effet spécifique de la salinité de l'eau sur la résistance à l'érosion par rapport à l'effet des cycles de sollicitations hydriques n'a pas été déterminé.

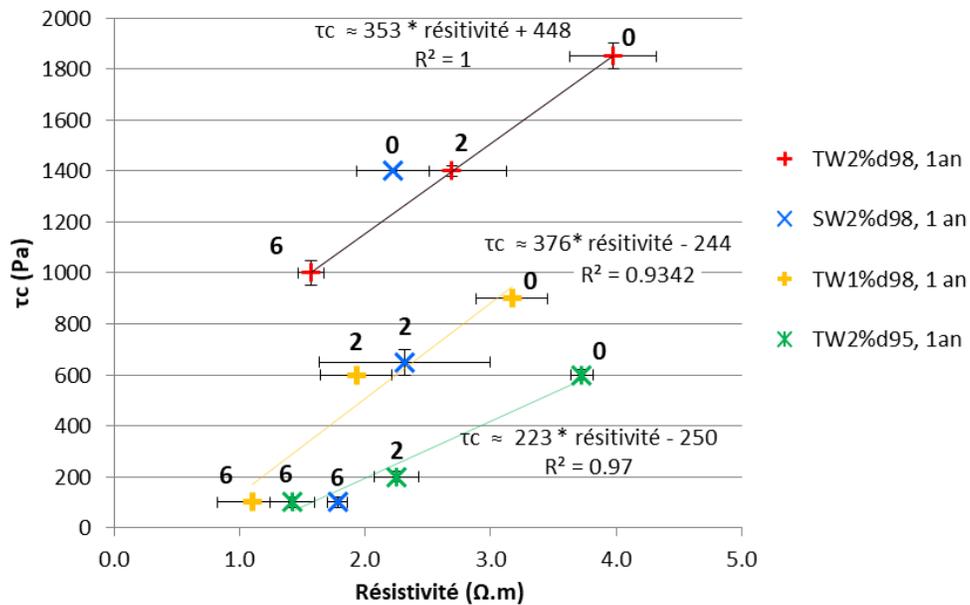


Figure V.13 : Contraintes de cisaillement critique τ_c et résistivité des matériaux après 1 an de cure correspondante. Les numéros indiquent le nombre de cycles réalisés avant les mesures.

V.3.2.2. Conclusion sur les corrélations entre résistivité et contrainte de cisaillement critique

La variabilité de la relation entre la contrainte de cisaillement critique et la résistivité en fonction de la densité, de la composition du matériau et du temps de cure des matériaux, montre que ces deux grandeurs ne sont pas directement corrélées. C'est le nombre de cycles d'humidification-séchage qui relie ces deux grandeurs. In situ, la connaissance de la résistivité ne permettra donc pas d'estimer directement la valeur de la contrainte de cisaillement critique τ_c .

V.3.3. Conclusion : influence prépondérante du sel sur la résistivité

La salinité de l'eau a une influence prépondérante sur la résistivité des sols traités à la chaux par rapport à l'influence des ions apportés par la chaux (consommation des ions pour la formation des composés cimentaires puis relargage en cas d'hydrolyse). Les conditions d'initiation de l'érosion de conduit, décrits par le paramètre τ_c dont l'amplitude de variation maximale est d'environ 2 kPa, semblent au premier abord reliées à la résistivité du matériau. Mais il s'agit d'une fausse corrélation, la variable reliant ces grandeurs étant le nombre de cycles de séchage-humidification subis par le matériau.

La propriété de résistance en compression simple R_c ne semble pas non plus directement corrélée avec la résistivité du matériau. Cependant, la faible influence de la composition et de la densité du matériau traité sur le rapport [résistance en compression simple /résistivité], permet de définir empiriquement une enveloppe donnant les valeurs minimales et maximales possibles de la résistance en compression simple pour une valeur donnée de résistivité. Cette enveloppe n'est valable que lorsque le matériau contient du sel, soit dans sa formulation initiale, soit à la suite des cycles hydriques à l'eau de mer.

La résistivité du limon de salin de Giraud dépend peu de l'effet du traitement à la chaux en comparaison à l'effet de la salinité du sol à la suite des cycles de séchage-humidification à l'eau de mer standardisée. La résistance mécanique et la résistance à l'érosion du sol traité à la chaux est en revanche très sensibles à la teneur en traitement, à la densité, mais aussi aux cycles de séchage-humidification (vieillessement accéléré). Seul un raisonnement en plusieurs étapes pourrait permettre, in situ, d'approximer les valeurs de la résistance en compression simple et de la résistance à l'érosion, à partir de la résistivité. La valeur de la résistivité est représentative de la salinité du sol, et donc de la quantité d'eau de mer qui a pénétré dans le sol. En rapprochant la résistivité mesurée in situ du nombre de cycles d'humidification séchage du matériau, puis en appliquant les relations définies par les essais au laboratoire entre les propriétés mécaniques et d'érosion et le nombre de cycles, il serait possible de remonter aux propriétés mécaniques et d'érosion à partir des valeurs de résistivité. La somme des incertitudes de chacune des étapes de ce raisonnement serait à évaluer avec précision, mais risquerait d'être du même ordre de grandeur que la variabilité des propriétés des matériaux liés à leur composition et à leur stade de vieillissement.

En environnement marin côtier, l'effet du sel sur les valeurs de résistivité ne permet donc pas de relier de façon simple la résistivité des matériaux à leurs paramètres d'état (densité) et de composition (teneur en chaux), ou à leurs états de dégradation par rapport à leurs états initiaux.

V.4. Relation vitesses soniques et résistance en compression

Une étude est menée pour déterminer la relation entre la vitesse de propagation des ondes sismiques dans le matériau traité à 2 % de chaux et les valeurs de résistance en compression simple. Contrairement à la résistivité, la vitesse de propagation des ondes sismiques est une propriété qui n'est pas ou peu liée à la chimie du matériau. La vitesse de propagation des ondes sismiques est sensible à la rigidité et à l'élasticité du matériau et donc à la cohésion des grains du sol. Cette dernière propriété est fortement liée à la conséquence du traitement à la chaux mais aussi aux modifications chimiques et microstructurales engendrées par les cycles de vieillissement accéléré (séchage et humidification à l'eau de mer).

L'étude se focalise sur les vitesses mesurées pour les matériaux TW2%^{d98} et SW2%^{d98}. Dans le cas des échantillons traités à 1% de chaux (TW1%^{d98}) ou ceux compactés à des densités inférieures à celle du matériau de référence (TW2%^{d95}), l'atténuation des ondes par le matériau est trop grande par rapport à la puissance des sources récepteurs. Le nombre et la qualité des mesures qu'il a été possible de faire ne sont pas suffisants pour être exploités.

V.4.1. Corrélations $R_c(V_p, V_s)$

La Figure V.14 présente des corrélations entre les valeurs de résistance en compression simple mesurées par des essais d'écrasement (II.4.4), et les vitesses des ondes P et S mesurées par des capteurs piézo-électriques (type *Blender elements*). Les mesures présentées correspondent aux essais après une cure des matériaux d'une durée de 1 an, ayant été soumis à 0, 2 ou 6 cycles de séchage-humidification à l'eau de mer.

Comme attendu, V_p , V_s et R_c diminuent avec le nombre de cycles, mais la relation entre R_c et V_s et entre R_c et V_p reste constante quel que soit le nombre de cycles, ce qui se traduit par une corrélation linéaire entre ces grandeurs. La corrélation linéaire entre les ondes S et la résistance en compression simple ne dépend pas de la salinité initiale du sol. Les ondes P sont plus sensibles à la salinité initiale du matériau. Bien que la pente de la droite de corrélation entre R_c et V_p soit la même que le matériau soit salé ou non, pour une même R_c la vitesse des ondes P est plus élevée d'environ 50 m.s⁻¹.

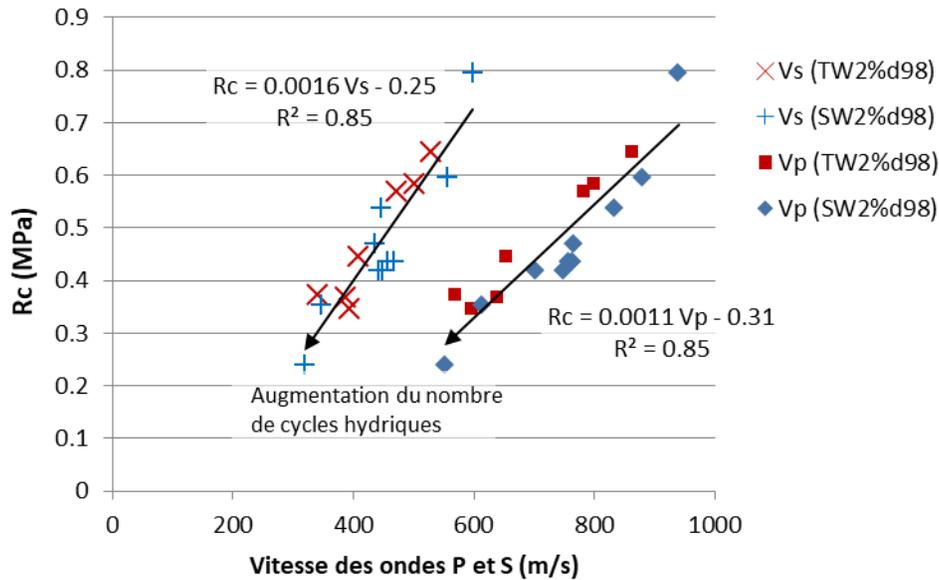


Figure V.14 : relation entre résistance en compression simple et vitesse des ondes P et S pour le limon de Salin de Giraud traité à 2% de chaux, compacté à une densité d'environ 1694 kg.m^{-3} , préparé avec ou sans eau de mer. Les mesures sont réalisées après 1 an de cure et 0 à 6 cycles hydriques à l'eau une mer.

Les droites de corrélation ne passent pas par zéro. Dans le cas où le limon serait dans un état lâche avec une résistance nulle, la vitesse des ondes S serait d'environ 155 m.s^{-1} et celle des ondes P d'environ 280 m.s^{-1} .

Pour le sol de salin de Giraud, les relations entre R_c et les vitesses des ondes P et S sont les suivantes :

$$R_c \text{ (MPa)} = 1,6 \cdot 10^{-3} * V_s \text{ (m.s}^{-1}\text{)} - 0,25 \quad \text{(Equation V.1)}$$

$$R_c \text{ (MPa)} = 1,1 \cdot 10^{-3} * V_p \text{ (m.s}^{-1}\text{)} - 0,31 \quad \text{(Equation V.2)}$$

V.4.2. Corrélations $R_c(E_0, G_{\max})$

A partir des vitesses des ondes P et S, et de la densité des éprouvettes sont calculés le module élastique E_0 et le module de cisaillement maximal G_{\max} (équations I.13 et I.14). Ici les modules sont calculés à partir de la mesure des vitesses des ondes mais cela peut également être calculé à partir de fréquences de résonance (Nazarian et al., 1999b). La Figure V.15 présente les corrélations existantes entre les modules E_0 et G_{\max} et la résistance en compression simple.

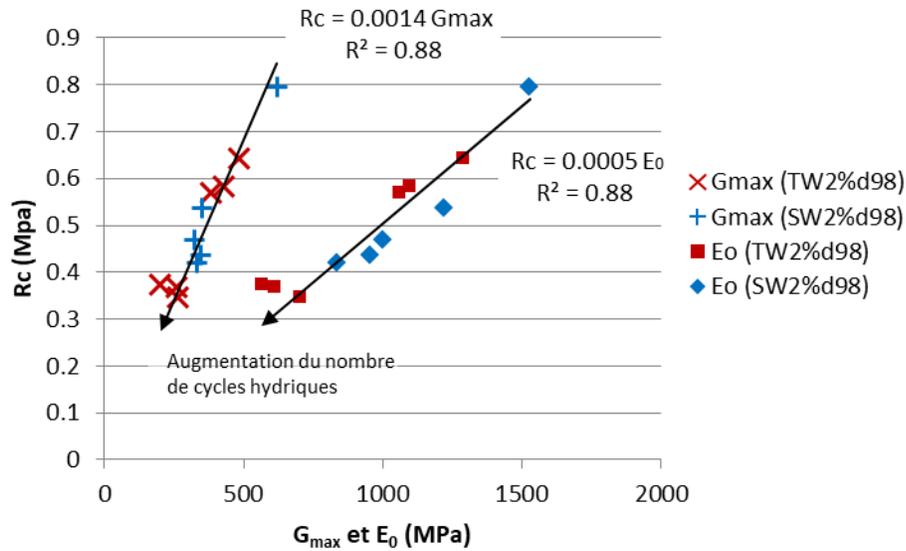


Figure V.15 : Relation entre la résistance en compression simple et les module mécanique G_{max} et E_0 .

Le calcul des modules à partir des vitesses suppose que le volume investigué soit un cylindre d'élanement 2 (au minimum), ce qui n'est pas réaliste pour des mesures in situ. En revanche le calcul de ces modules permet de comparer les relations entre R_c et les modules à celles obtenu par d'autres auteurs. Plusieurs études sur des sols traités au ciment ont montré une bonne corrélation entre la résistance en compression simple, R_c et le module de cisaillement maximal, G_{max} (Hird and Chan, 2005; Flores et al., 2010; Szymkiewicz, 2011). Dans le cas des sols traités à la chaux, une étude a été menée par Nguyen (2015) sur un limon A1 de Marche-les-Dames (Belgique) traité à 1, 2 et 4 % de chaux. Sur la Figure V.16 sont reportés les modules et à la résistance mécanique du limon A1 de Marche-les-Dames, tout traitement et tout temps de cure confondus. La dispersion des points est plus importante dans le cas des résultats de Nguyen que dans notre étude avec le limon de Salin de Giraud, mais les corrélations sont tout de même de bonne qualité avec un coefficient de détermination R^2 d'au moins 0,8. La provenance du limon et la teneur en chaux influence peu la corrélation entre R_c et G_{max} (7 % de différence entre les coefficients directeurs). La corrélation entre R_c et E_0 est en revanche plus impactée avec une différence 40 % de la valeur du coefficient directeur.

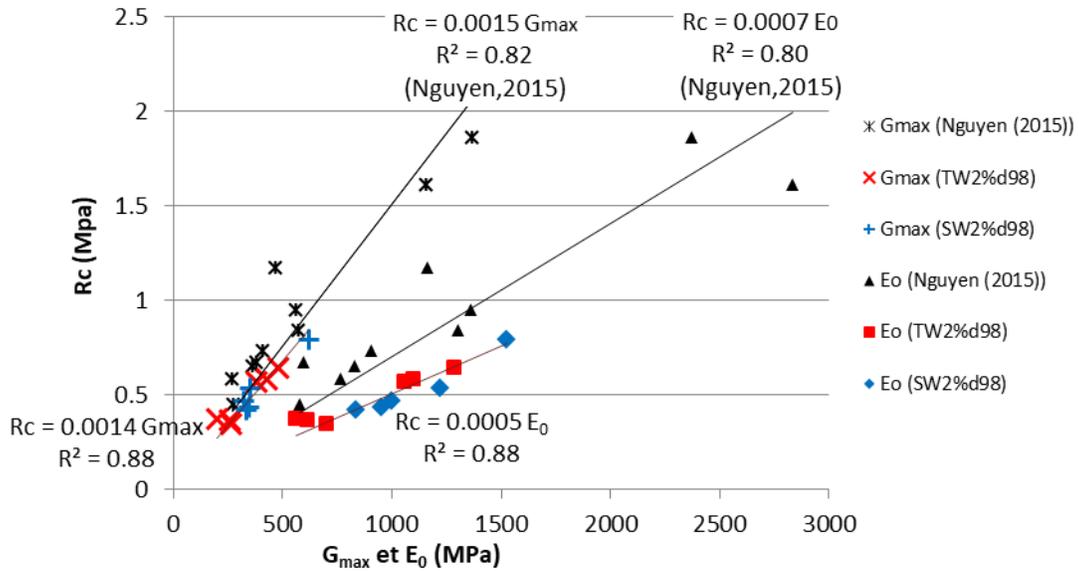


Figure V.16 : Relation entre la résistance en compression simple et les modules mécaniques G_{max} et E₀ d'après les travaux de Nguyen, (2015). Comparaison avec nos travaux.

V.4.3. Conclusion : relation entre vitesse des ondes et résistance en compression simple

Connaissant la densité des matériaux, la mesure de vitesse des ondes S permet de calculer module de cisaillement maximal G_{max} et d'approximer avec une faible incertitude la valeur la résistance en compression du matériau quel que soit la teneur en chaux ou l'origine du matériau. En fonction des données disponibles, le calcul inverse peut être effectué. Il sera intéressant de vérifier in situ, sur l'ouvrage Digue2020, l'invariance de la corrélation entre Vs et Rc.

Dans le cas des vitesses des ondes P ou du module E₀, des corrélations avec les valeurs de Rc existent mais peuvent varier en fonction de la composition du matériau (teneur en chaux, salinité, nature du limon).

Ces corrélations devront être vérifiées in situ par des mesures dans l'ouvrage Digue2020.

V.5. Conclusions du chapitre 5

Les différentes propriétés caractérisées ne sont pas toutes sensibles de la même façon aux actions de l'environnement ici modélisées par les cycles de séchage-humidification à l'eau de mer.

Nous avons constaté que :

- L'érosion interne (érosion de conduit) et la résistance mécanique sont les deux propriétés qui se dégradent le plus par rapport à leurs valeurs initiales au cours des cycles.
- La porosité totale du matériau est globalement invariante avec les cycles.
- Le diamètre des micropores augmente au cours du premier cycle, mais reste constant par la suite. L'arrêt de la variation de la taille des micropores coïncide avec le ralentissement de la dégradation des autres propriétés géomécaniques. Deux phénomènes différents seraient donc à l'origine de la première phase de dégradation rapide des propriétés géomécaniques, et de la deuxième phase de dégradation plus lente.

L'étude comparée des différents matériaux par rapport au matériau de référence a montré que quelles que soient les propriétés considérées, la durabilité est principalement contrôlée par la densité et la teneur en chaux des matériaux. La salinité initiale du sol améliore la résistance à l'érosion à long terme, mais n'a pas d'influence majeure sur la résistance en compression simple.

Les variations synchrones de la résistance mécanique, des paramètres des lois d'érosion et de la résistivité électrique du matériau amènent à rechercher des corrélations directes entre ces propriétés. L'idée est de pouvoir s'affranchir de réaliser un ou deux types d'essais sans perdre d'informations sur l'ensemble des propriétés du matériau.

Pour tous les matériaux de notre étude, traités à la chaux et soumis à des cycles hydriques à l'eau de mer on a :

$$4.10^{-4} R_c < \tau_c < 4,5.10^{-3} R_c$$

Avec τ_c en kPa, la contrainte de cisaillement critique déterminée par l'essai HET ; et R_c en kPa, la résistance en compression simple déterminée par les essais d'écrasement.

Dans le cas du matériau de référence et du matériau préparé avec de l'eau de mer, la valeur de τ_c est proche de la limite haute proposée. Pour une teneur en chaux ou une densité inférieure à celle du matériau de référence, τ_c est proche de la limite basse proposée.

Lorsque le matériau contient de l'eau de mer, la résistance en compression simple (R_c), et la contrainte de cisaillement critique τ_c (condition d'initiation de l'érosion) ne sont pas directement corrélées à la

résistivité électrique du matériau, bien que l'ensemble des valeurs (R_c , τ_c , résistivité) diminuent avec l'augmentation du nombre de cycles hydriques à l'eau de mer.

Pour des teneurs en eau proches de la valeur à l'état de saturation (environ 80%), la forte dépendance des valeurs de τ_c à la composition et à la densité du matériau contraste avec la faible sensibilité de la résistivité à ces paramètres. A partir de la seule connaissance de la résistivité du sol, il n'est pas possible d'en déduire la valeur du paramètre τ_c . Cependant, il est possible qualitativement de relier ces grandeurs. La valeur de la résistivité témoigne du nombre de fois où le matériau est humidifié par l'eau une mer après une phase de séchage (schématiquement : été = séchage ; hiver = tempête = pénétration de l'eau une mer). Il est montré expérimentalement que τ_c décroît avec l'augmentation du nombre de cycles hydriques. Toutes choses égales par ailleurs, une baisse de la résistivité témoigne qualitativement d'une baisse de la résistance à l'érosion.

Dans le cas de la résistance en compression simple R_c (kPa) et de la résistivité électrique ρ ($\Omega.m$), bien qu'il n'y ait pas de corrélation linéaire généralisable, il est possible, dans le cas du limon de Salin de Giraud traité à 1 ou 2% de chaux dont la teneur en eau est d'environ 18%, d'approximer la valeur de résistance en compression simple R_c d'après les conditions suivantes définies empiriquement :

Si $\rho > 2 \Omega.m$ alors :

$$90 \rho < R_c < 360 \rho$$

Les vitesses des ondes P et S ne sont pas sensibles à la salinité. Lorsque la teneur en eau est constante, une très bonne corrélation est établie entre vitesse des ondes P et S et la résistance en compression simple. De même il existe une très bonne corrélation entre R_c et les modules mécaniques de cisaillement maximal (G_{max}) et d'élasticité (E_0) à partir des vitesses respectivement des ondes S et P et de la densité des éprouvettes. Des relations presque identiques sont présentes dans la littérature, dans le cas d'un autre limon A1 traité entre 1 et 4% de chaux (Nguyen, 2015b). Il s'agit donc de relations robustes et peu dépendantes de la teneur en chaux. En revanche, il n'a pas été étudié l'influence de la densité sur la relation entre vitesse de propagation des ondes et la résistance en compression simple. Les relations décrites au V.3.1 pourront être utilisées in situ, à condition de vérifier l'homogénéité de la teneur en eau dans la zone traversée par les ondes.

Dans une digue maritime, au vu des résultats expérimentaux au laboratoire, l'imagerie géophysique par la méthode de résistivité électrique sera principalement contrastée par les différences de salinité du sol. Les hétérogénéités de densité et de teneur en chaux sont masquées par la salinité du matériau. De manière indirecte il serait tout de même possible de savoir si le matériau a été détérioré (chute des

propriétés mécaniques, érosion...) car la diminution de la résistivité traduit l'augmentation de la salinité de l'eau porale, cette dernière étant due à l'accumulation de phases de séchage et d'humidification à l'eau de mer. Les phases de séchage et d'humidification font chuter la résistance mécanique du sol traité ainsi que sa résistance à l'érosion. La diminution de la résistivité peut donc indiquer une chute des performances du matériau sol-chaux. L'imagerie par les méthodes sismiques est sensible aux propriétés mécaniques du matériau conférées par le traitement à la chaux. L'ouvrage Digue 2020 sera une digue homogène (plot par plot) en sol traité à la chaux, construite en une seule fois et sur une courte période de temps. Il sera donc possible de considérer que tous les matériaux d'un même plot ont le même âge ou presque. Une différence spatiale de vitesse peut alors s'interpréter comme une variation spatiale de l'état de cimentation du matériau par les réactions pouzzolaniques, ayant des conséquences sur les propriétés mécaniques du sol.

Conclusion générale

Dans le contexte de l'élévation du niveau des océans, conséquence du changement climatique planétaire, la superficie des zones submersibles va s'accroître, nécessitant la construction de nouvelles digues de protection contre les submersions marines et le renforcement des digues existantes. Le traitement à la chaux apparaît comme une solution économique et écologique car elle permet le réemploi des sols limoneux et argileux en place sans avoir recours à l'extraction et au transport de matériaux de carrière de plus haute qualité.

L'étude bibliographique a montré que le traitement à la chaux accroît les performances mécaniques du sol et sa résistance à l'érosion. Le risque de rupture par déstabilisation gravitaire, ou par l'ouverture de brèches consécutives aux phénomènes d'érosion, est donc réduit par le traitement du sol à la chaux. Cependant, des lacunes dans la littérature apparaissent concernant la **durabilité** du matériau sol-chaux dans un **environnement maritime**. C'était donc l'objectif de cette thèse.

L'analyse de durabilité consiste à évaluer la durée de l'aptitude de l'ouvrage et de son matériau constitutif à maintenir ses fonctions. Appréhender explicitement la durabilité des digues et des matériaux constitutifs est un élément nécessaire à la quantification du risque de submersion marine. C'est dans ce contexte que s'inscrit le projet Digue2020 dont un des objectifs est la construction d'une digue maritime en sol traité à la chaux pour en évaluer, en vraie grandeur, l'influence de l'environnement maritime sur la durabilité de l'ouvrage.

Une étude préalable à la construction de la plateforme in situ, de la durabilité du matériau sol-chaux est réalisée au laboratoire. L'objectif de notre travail était donc de caractériser la durabilité d'un limon traité à la chaux soumis à un environnement côtier. Dans cet environnement **la salinité et les alternances immersions-émersions** sont deux sollicitations majeures susceptibles de détériorer les propriétés physiques et chimiques initiales des matériaux. Ces sollicitations ont été reproduites au laboratoire.

Le matériau étudié est un limon A1 provenant d'un site à proximité du futur ouvrage Digue2020, sur la commune des Salins de Giraud. Quatre matériaux traités différents ont été reconstitués au laboratoire. Les paramètres qui varient entre les différents matériaux sont la teneur en chaux (2% ou 1%), la densité (98 % ou 95 % de l'OPN) et la salinité initiale du sol (avec et sans eau de mer). Un cinquième lot d'éprouvettes de limon non traité est également étudié, servant de référence pour quantifier l'accroissement des performances du sol par le traitement à la chaux. Au regard de la bibliographie, le

matériau traité à 2 % de chaux, sans eau de mer et à la densité la plus élevée (98 % de l'OPN) est supposé le plus durable. Il est appelé **matériau de référence**. Les conséquences sur la durabilité des variations de ces différents paramètres sont données en comparaison avec le matériau de référence.

Les propriétés qu'il a été choisi de caractériser sont la **résistance mécanique** en compression simple au moyen d'essais d'écrasement, **l'érosion interne et externe** respectivement au moyen des essais HET et MoJET, et la **porosité** au moyen de mesures en porosimétrie au mercure. Dans la perspective du monitoring par des **méthodes géo-électriques et sismiques** de l'ouvrage Digue2020, la détermination des propriétés géophysiques des matériaux vient compléter les caractérisations géomécaniques des matériaux au laboratoire. Des **corrélations** entre les différentes propriétés caractérisées ont également été recherchées.

L'étude de la durabilité montre que les cycles hydriques dégradent la résistance en compression simple et la résistance à l'érosion interne des matériaux traités à la chaux. Ces résistances restent cependant très supérieures à celle du limon non traité. **L'évolution de ces propriétés n'est pas linéaire**. Les premiers cycles de séchage-humidification à l'eau une mer sont les plus dégradants, puis au-delà de 4 cycles le taux de dégradation par cycle diminue. La densité et la teneur en chaux sont deux paramètres qui contrôlent de manière prépondérante la durabilité du matériau vis-à-vis de la résistance en compression simple et la résistance à l'érosion interne. La salinité initiale du sol, homogène dans le matériau suite au malaxage, augmente significativement la résistance à l'érosion mais n'a que peu d'influence sur la résistance en compression simple. L'allongement du temps de cure augmente la durabilité du matériau vis-à-vis de la résistance en compression simple mais n'a pas d'influence sur la durabilité vis-à-vis de l'érosion interne, du moins au-delà de 90 jours de cure.

L'étude de l'érosion externe par les essais MoJET n'a pas montré d'évolution significative de l'érosion consécutive aux cycles hydriques. Une modification chimique de la surface du matériau est observée formant une croûte de sels précipités qui semble protéger le matériau de l'érosion mais des comparaisons avec le matériau in situ seront nécessaires pour déterminer si la formation de la croûte est liée au protocole de séchage humidification ou si c'est un phénomène qui peut se développer in situ.

Le taux de compactage et donc la densité du matériau est le seul paramètre qui influe significativement sur la porosité. La teneur en chaux et le temps de cure n'ont pas ou peu d'impact sur la porosité et son organisation. Le matériau acquiert un état stable au regard de sa porosité dès les premiers cycles de séchage-humidification. La porosité est faiblement affectée par l'environnement.

L'étude des variations normalisées des différentes propriétés rappelées dans les paragraphes précédents a montré que la résistance en compression simple et les paramètres de la loi d'érosion sont les plus fortement dégradés par les cycles. La durabilité du sol traité à la chaux dans une digue maritime dépend donc de la durabilité de ces deux propriétés. La recherche de corrélation entre ces deux propriétés du matériau arrive à la conclusion qu'il n'est pas possible de généraliser une relation entre τ_c et R_c .

La résistivité électrique et les vitesses de propagation des ondes sismiques de volume (V_p & V_s) augmentent au cours de la cure en lien avec le développement des réactions pouzzolaniques qui modifient la taille des pores et la concentration ionique de l'eau des pores et la cohésion du matériau. Ces deux méthodes géophysiques sont complémentaires : les vitesses V_p et V_s permettent de discriminer la densité et la teneur en chaux dans différents matériaux, tandis que la résistivité est principalement sensible à la salinité du matériau (initiale et acquise au cours des cycles). Cependant, aucune des deux méthodes ne permet de discriminer précisément le nombre de cycles hydriques subi par le matériau au-delà de 4 cycles. Dans le cas de la résistivité, la salinité de plus en plus importante des matériaux masquerait les dégradations supposées des composés cimentaires au cours des cycles. La mise en relation de la résistivité électrique avec la résistance en compression simple et avec la contrainte de cisaillement critique n'ont pas abouti à des corrélations fiables. En revanche, une corrélation robuste est démontrée entre la résistance en compression simple des matériaux et les vitesses des ondes P et S, indépendamment de la salinité initiale du sol, comme cela a été démontré pour les roches (Sharma and Singh, 2008).

En conclusion, l'étude de la durabilité s'est basée sur la quantification des conséquences des cycles hydriques à l'eau de mer sur le comportement macroscopique du limon traité à la chaux. Différentes configurations de traitement et de densité ont été testées en prenant également en compte l'influence du temps de cure sur les conséquences des cycles hydriques. Les résultats montrent que les caractérisations géophysiques viennent appuyer cette étude. Les **méthodes électriques et sismiques sont complémentaires** : utilisées conjointement elles permettent d'accéder à des informations sur l'état hydrique, de salinité, de densité, de taux de chaux du sol.

Les cycles à l'eau de mer représentent de manière extrême les sollicitations environnementales s'exerçant sur les matériaux d'une digue de protection contre les submersions marines. Ces cycles provoquent une dégradation rapide de propriétés essentielles à l'intégrité d'une digue (résistance mécanique et érosion) mais la cinétique de dégradation décroît avec l'augmentation du nombre de cycles, et le limon traité à la chaux conserve des propriétés mécaniques toujours supérieures à celle du

limon non traité. La diminution de densité ou de teneur en chaux diminue fortement la durabilité du limon. La salinité du limon lors du traitement est neutre, voire à un effet positif, sur la durabilité du matériau. Pour assurer la durabilité d'une digue, nous suggérons de dimensionner l'ouvrage à partir des **propriétés résiduelles** du matériau et non pas à partir des propriétés du matériau à l'issue de sa cure. La difficulté étant de déterminer à quel moment on doit considérer que les propriétés résiduelles sont atteintes.

Perspectives

Dans ce travail ont été quantifiées au laboratoire les dégradations des propriétés des matériaux traités suite à l'application d'un nombre variable de cycles hydriques à l'eau de mer. Cela dans la perspective d'effectuer des comparaisons avec les propriétés des matériaux de l'ouvrage Digue 2020 et leurs évolutions au cours du temps, en environnement maritime.

Tout d'abord nous proposons des perspectives de recherche sur les phénomènes physiques et chimiques responsables de la dégradation des propriétés mécaniques et d'érosion. Ces derniers n'ont pas été directement caractérisés dans ce travail, seules quelques hypothèses ont été émises à partir de la comparaison des différentes propriétés du matériau, caractérisées suite aux cycles hydriques salins. Les variations d'état hydriques provoqueraient d'une part la fragilisation mécanique du matériau (notamment par les forces de succion au cours du séchage), et d'autre part, une modification chimique avec une dégradation des composés cimentaires. Pour valider cela, une étude à l'échelle microscopique et une étude approfondie de la chimie du matériau devront être menées. Il serait également intéressant de pouvoir découpler l'effet de l'augmentation de la salinité du sol au cours du temps de l'effet des variations hydriques du matériau, par exemple avec des essais de percolation à l'eau de mer.

Une seconde perspective est, à partir des données de teneur en eau enregistrées au cours des cycles et des courbes de porosité au mercure, d'estimer les paramètres non mesurés du sol tel que la variation de la perméabilité avec la teneur en eau et la courbe de rétention d'eau par des modélisations numériques. Par ailleurs, il sera intéressant de développer un modèle numérique prédictif à partir de cette étude expérimentale pour estimer les propriétés du sol traité au-delà des 12 cycles hydriques réalisés au laboratoire. Cependant pour ce dernier point, l'amélioration de la compréhension des phénomènes physico-chimique de dégradation du matériau est nécessaire au préalable.

Concernant les futures études in situ sur l'ouvrage Digue 2020, plusieurs perspectives peuvent être proposées :

- Le suivi de l'ouvrage à long terme par des mesures géophysiques : résistivité électrique et méthodes sismiques (réfraction et ondes de surface). Les mesures géophysiques seront couplées à des mesures ponctuelles de teneur en eau, salinité et valeur de succion du sol. L'instrumentation sera répartie entre zone constituée de limon A2 traité à 2,5% de chaux, et une zone du même limon A2 mais non traité. La densité nominale (énergie de compactage) des deux zones sera a priori identique. Une comparaison entre l'évolution des propriétés des matériaux dans le limon traité et non traité sera menée ;
- Des essais in situ ou sur des éprouvettes carottées dans la digue et non remaniées devront être menés dès la fin de la construction de la digue puis, si possible, après 1 et 3 mois, puis une fois par an. L'objectif est double. D'une part, il s'agit d'évaluer la durabilité du limon traité in situ, en fonction de conditions environnementales non maîtrisées mais enregistrées au cours du temps (température, teneur en eau, saturation, salinité, niveau de l'eau sur la digue...). D'autre part, l'objectif sera d'évaluer la représentativité de la méthode d'étude de la durabilité au laboratoire par rapport à l'évolution des propriétés du matériau in situ dans des conditions environnementales similaires.

Plus généralement, dans le contexte du changement climatique, toutes les digues de protection contre les inondations fluviales et maritimes devront, à plus ou moins long terme, être renforcées. Face à la raréfaction des ressources naturelles en sable utilisé dans la fabrication des bétons, le traitement des sols à la chaux apparaît comme une solution pragmatique pour le renforcement des digues dans les régions où la ressource en calcaire est importante, en Europe notamment. Dans un autre contexte, celui du développement des infrastructures de transport, le traitement des sols à la chaux pourrait être généralisé pour la construction de canaux fluviaux au travers des terrains argileux comme c'est le cas sur le tracé du futur *Canal Seine-Nord*.

Références bibliographiques

- Abu-Hassanein, Z.S., Besson, C.H., Wang, X., Blotz, L., 1996. Electrical resistivity of compacted clays. *Geotechnical Testing Journal* 51–57.
- Ali, H., Mohamed, M., 2017. The effects of compaction delay and environmental temperature on the mechanical and hydraulic properties of lime-stabilized extremely high plastic clays. *Applied Clay Science* 150, 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.09.019>
- Archie, G.E., 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Journal of Petroleum Technology*.
- Beck, Y.L., 2008. Evaluation de l'état hydrique d'un sol fin par méthodes électriques et électromagnétiques: application géotechnique. Ecole centrale de Nantes.
- Bell, F.G., 1996. Lime stabilization of clay minerals and soils.
- Benahmed, N., Bonelli, S., 2012. Investigating concentrated leak erosion behaviour of cohesive soils by performing hole erosion tests. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 16, 43–58. <https://doi.org/10.1080/19648189.2012.667667>
- Boardman, D., Glendinning, S., Rogers, C., 2001. Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes. *Geotechnique* 533–543.
- Bonelli, S., 2013. *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*, Wiley/ISTE. ed.
- Bonelli, S., Nicaise, S., Charrier, G., Chaouch, N., Byron, F., Grémeaux, Y., 2018. Quantifying the erosion resistance of dikes with the overflowing simulator, in: 3rd International Conference on Protection against Overtopping, 6-8 June 2018, UK. Presented at the 3rd International Conference on Protection against Overtopping, UK, p. 7.
- Briaud, J.-L., 2008. Case Histories in Soil and Rock Erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 134, 1425–1447. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:10\(1425\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:10(1425))
- Briaud, J.-L., Govindasamy, A.V., Shafii, I., 2017. Erosion Charts for Selected Geomaterials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 143, 04017072.
- Briaud, J.L., Ting, F.C.K., Chen, H.C., Cao, Y., Han, S.W., Kwak, K.W., 2001. Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 127, 105–113. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:2\(105\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:2(105))
- Bryson, L.S., 2005. Evaluation of Geotechnical Parameters Using Electrical Resistivity measurements, in: *Earthquake Engineering and Soil Dynamics (GSP 133)*, Proceedings of the Sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress, Austin, Texas, USA.
- Carroll, D., Starkey, H.C., 1958. Effect of sea-water on clay minerals, in: *Clay and Clay Minerals*, Proc. Nat. Conf. Clays and Clay Minerals, 7th.
- CFBR, 2015. *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai*. Editions du Comité Français des Barrages et Réservoirs. 132 pages.
- CFBR, 2014. *Utilisation des sols traités à la chaux dans les ouvrages hydrauliques*.
- Charles, I., Herrier, G., Chevalier, C., Durand, E., 2012. An experimental full-scale hydraulic earthen structure in lime treated soil, in: *Proceedings of the Sixth International Conference on Scour and Erosion*, Paris, France, Aug. pp. 181–188.
- Charles, I., Herrier, G., Chevalier, C., Durand, E., Puiatti, D., 2014. A real scale experimental dike in lime-treated soil: Evaluation of the methodology, mechanical and hydraulic performance, in: *Scour and Erosion ISCE7*. Perth.

- Charles, I., Herrier, G., Puiatti, D., Chevalier, C., Durand, E., 2017. Un ouvrage hydraulique en vrai grandeur en sol traité à la chaux, in: Colloque CFBR-SHF. Chambéry.
- Chedid, M., Shafii, I., Briaud, J.L., 2018. Erosion tests on the Teton Dam soils, in: Keh-Chia, Y. (Ed.), Scour and Erosion IX. CRC Press, Taipei, pp. 505–510. <https://doi.org/10.1201/9780429020940-68>
- Chevalier, Christophe, Haghghi, I., Herrier, G., 2012. Resistance to erosion of lime treated soils: a complete parametric study in laboratory. Presented at the ISCE6.
- CIRIA, 2013. The international Levee Handbook.
- Clare, K.E., Cruchley, A.E., 1957. * Laboratory Experiments in The Stabilization of Clays With Hydrated Lime. *Geotechnique* 7, 97–111.
- Colebrook, C., 1939. Correspondence turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. *Journal of the Institution of Civil Engineers* 12, 399–422.
- Cuisinier, O., Auriol, J.-C., Le Borgne, T., Deneele, D., 2011. Microstructure and hydraulic conductivity of a compacted lime-treated soil. *Engineering Geology* 123, 187–193.
- De Baecque, M., Boussafir, Y., 2018. Quels essais de laboratoire pour évaluer la durabilité des matériaux de digue?, in: Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Presented at the Journées Nationales de Géotechnique et de géologie de l'Ingénieur, Champs-sur-Marne.
- De Baecque, M., Chevalier, C., Palma-Lopes, S., Le Feuvre, M., Reiffsteck, P., Charles, I., Herrier, G., 2017. Resistance to erosion of lime treated soils for application to coastal dikes, in: EWGIE Meeting. Presented at the EWGIE meeting, Delft, p. 11.
- De Windt, L., Deneele, D., Maubec, N., 2014. Kinetics of lime/bentonite pozzolanic reactions at 20 and 50°C: Batch tests and modeling. *Cement and Concrete Research* 59, 34–42.
- Delavernhe, L., 2011. Étude multi-échelle de la réactivité des altérites lors du traitement à la chaux. Université de Nantes.
- Deneele, D., Nael, J., Dony, A., Colin, J., Herrier, G., Lesueur, D., 2013. La carbonatation d'un sol traité à la chaux - Approche expérimentale. Presented at the TerDOUEST Le traitement des sols pour un terrassement durable, pp. 211–221.
- DigueELITE, 2018. Le traitement des sol à la chaux: une technique éprouvée appliquée à la construction d'ouvrage hydrauliques. Livret 1 Document d'information à usage des maîtres d'ouvrage et maîtres d'oeuvre.
- 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.
- Eades, J.L., Grim, R.E., 1966. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. Highway research record.
- ERINOH, 2016a. Méthodologie de reconnaissance et diagnostic de l'érosion interne des ouvrages hydroliques en remblai, Presses des Ponts. ed, ERINOH.
- ERINOH, 2016b. Erosion Interne dans les Ouvrages Hydrauliques : Méthodologie de caractérisation expérimentale, Presses des Ponts. ed, ERINOH.
- Faisant, T., Peyras, L., Jeannot, C., Tekatlian, A., Gendrey, S., Chevalier, C., De Baecque, M., Schleyer-Lindenmann, A., Bertoldo, R., De Paris, C., Mallet, T., 2019. Projet de R&D DIGUE 2020 : réalisation d'une plateforme de recherche en site maritime pour l'étude des actions de la mer sur les digues, la durabilité, et la perception du risque de submersion, in: Digue maritimes et fluviales de protection contre les inondations., Aix-en-Provence.
- Fargier, Y., 2011. Développement de l'Imagerie de Résistivité Électrique pour la reconnaissance et la surveillance des Ouvrages Hydrauliques en Terre (Thèse de doctorat). Ecole Centrale de Nantes (ECN)(ECN)(ECN).

- FEMA, 2004. Federal Guidelines for Dam Safety (Glossary of Terms), Interagency Committee on Dam Safety. ed.
- Flores, R.D.V., Sheahan, T.C., Di Emidio, G., 2010. Small-Strain Shear Modulus and Strength Increase of Cement-Treated Clay. *Geotechnical Testing Journal* 33, 102354. <https://doi.org/10.1520/GTJ102354>
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M., 2000. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal* 37, 1000–1024.
- Friedman, S.P., 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 46.
- Fry, J.-J., Vogel, A., Royet, P., Courivaud, J.-R., 2012. Dam failures by erosion: lessons from ERINOH data bases, in: 6th International Conference on Scour and Erosion. Presented at the 6th International Conference on Scour and Erosion, Paris, p. 8.
- Garver, L.L., 1987. Canal repair techniques using lime-stabilized soil. *Lime for Environmental Uses*. ASTM International.
- GTS, 2000. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique LCPC/Setra.
- Gutschick, K.A., 1985. Canal lining stabilization proves successful. *Pit & Quarry* 58–60.
- Haghighi, I., 2012. Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion : développement d'essais et applications pratiques (Thèse de doctorat). Université Paris-Est.
- Haghighi, I., Chevalier, C., Duc, M., Guédon, S., Reiffsteck, P., 2013. Improvement of Hole Erosion Test and Results on Reference Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139, 330–339.
- Hanson, G.J., Cook, K.R., 2004. Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ. *Applied Engineering in Agriculture* 20.
- Hanson, G.J., Robinson, K.M., 1993. The Influence of Soil Moisture and Compaction on Spillway Erosion 36. <https://doi.org/10.13031/2013.28469>
- Hanson, G.J., Simon, A., 2001. Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA. *Hydrological Processes* 15, 23–38. <https://doi.org/10.1002/hyp.149>
- Hauke, G., 2008. An Introduction to Fluid Mechanics and Transport Phenomena, *Fluid Mechanics and Its Applications*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8537-6>
- Henensal, P., Duchatel, F., 1990. L'érodimètre à jets mobiles. *Bull. Lab. Ponts et Chaussées*, 167: 47-53 167, 47–53.
- Herrier, Gontran, Berger, R., Bonelli, S., 2012. The Friant-Kern canal: a forgotten example of lime-treated structure in hydraulic conditions, in: 6th International Conference on Scour and Erosion. SHF, pp. 8–p.
- Herrier, G., Bonelli, S., Cornacchioli, F., Nerincx, N., Nicaise, S., Puiatti, D., Richard, J.M., Tachker, P., 2018. Erosion resistant dikes thanks to soil treatment with lime, in: 3rd International Conference on Protection against Overtopping. Presented at the 3rd International Conference on Protection against Overtopping, HAL, UK, p. 9.
- Herrier, G., Cuisinier, O., Deneele, D., Puiatti, D., 2013. Etude de la perméabilité d'un limon traité à la chaux. Presented at the Le traitement des sols pour un terrassement durable, TerDOUEST.
- Herrier, G., Lesueur, D., Puiatti, D., 2012. Lime treated materials for embankment and hardfill dam, in: Int Symposium on Dams for a Changing World. Kyoto, Japan, p. 7.
- Hilt, G.H., Davidson, D.T., 1960. Lime fixation on clayey soils. *Highway Research Board Bulletin* 262:20–32.
- Hird, C.C., Chan, C.M., 2005. Correlation of ShearWaveVelocity with Unconfined Compressive Strength of Cement-Stabilized Clay, in: Proceedings of the International Conference on Deep Mixing Best

- Practice and Recent Advances, Stockholm, Swedish Geotechnical Institute, Sweden. Sweden, pp. 79–85.
- Ho, L.S., Nakarai, K., Duc, M., Kouby, A.L., Maachi, A., Sasaki, T., 2018. Analysis of strength development in cement-treated soils under different curing conditions through microstructural and chemical investigations. *Construction and Building Materials* 166, 634–646. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.112>
- Hooton, R., Kolluru, S., Popovics, J., Shah, S., 2000. Determining Elastic Properties of Concrete Using Vibrational Resonance Frequencies of Standard Test Cylinders. *Cement, Concrete and Aggregates* 22, 81. <https://doi.org/10.1520/CCA10467J>
- ICOLD, 1995. Dam Failure, Statistical Analysis. Bulletin 99, International Commission on Large Dams 73.
- Jodry, C., 2016. Développements méthodologiques pour l'imagerie et le suivi temporel par méthodes géoélectriques des structures de protection contre les inondations fluviales ou les submersions marines (Thèse de doctorat). Université de Nantes (Unam).
- Kalinski, R.J., Kelly, 1993. Electrical-Resistivity Measurements For Evaluating Compacted-Soil Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 7.
- Keller, G.V., Frischknecht, F.C., 1966. Electrical methods in geophysical prospecting.
- 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.
- Koslanant, S., Onitsuka, K., Negami, T., 2006. Influence of salt additive in lime stabilization on organic clay. *Geotechnical Engineering*, 37(2), 95. 37, 95.
- Lay, T., Wallace, T.C., 1995. Modern global seismology, Elsevier. ed.
- LCPC/Setra, 2000. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique LCPC/Setra.
- Le Borgne, T., 2010. Caractérisation et quantification des éléments perturbateurs de prise lors du traitement des sols (Thèse de doctorat). Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL.
- Le Roux, Rivière, 1969. Traitements des sols argileux par la chaux. Bulletin Liaison Labo. Routiers P. et Ch.
- Le Runigo, B., 2008. Durabilité d'un limon traité à la chaux et soumis à différentes sollicitations hydrauliques: comportements physico-chimique, microstructural, hydraulique et mécanique (Thèse de doctorat). Université de Nantes.
- 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.
- Lemaire, K., Deneele, D., Bonnet, S., Legret, M., 2013. Effects of lime and cement treatment on the physicochemical, microstructural and mechanical characteristics of a plastic silt. *Engineering Geology* 166, 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.09.012>
- Little, N.D., 1995. Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime, National Lime Association. ed. Arlington.
- 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.
- Locat, J., Trembaly, H., Leroueil, S., 1996. Mechanical and hydraulic behaviour of a soft inorganic clay treated with lime. *Canadian geotechnical journal* 33, 654–669.
- Lopez-Lara, T., Zepeda-Garrido, A., Castario, V.M., 1999. A Comparative study of the Effectiveness of Different additive on the Expansive Behavior of Clay. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*.
- Maillet, G.M., Rizzo, E., Revil, A., Vella, C., 2005. High Resolution Electrical Resistivity Tomography (ERT) in a Transition Zone Environment: Application for Detailed Internal Architecture and Infilling Processes Study of a Rhône River Paleo-channel. *Marine Geophysical Researches* 26, 317–328. <https://doi.org/10.1007/s11001-005-3726-5>

- Makki-Szymkiewicz, L., Hibouche, A., Taibi, S., Herrier, G., Lesueur, D., Fleureau, J.-M., 2015. Evolution of the properties of lime-treated silty soil in a small experimental embankment. *Engineering Geology* 191, 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.03.008>
- Marot, D., Regazzoni, P.-L., Wahl, T., 2011. Energy-Based Method for Providing Soil Surface Erodibility Rankings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 137, 1290–1293. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000538](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000538)
- Maubec, N., 2010. Approche multi-échelle du traitement des sols à la chaux. Etude des interactions avec les argiles. (Thèse de doctorat). Université de Nantes.
- Mehenni, A., 2015. Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités (Thèse de doctorat). Université de Lorraine.
- Mehenni, A., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2016. Impact of Lime, Cement, and Clay Treatments on the Internal Erosion of Compacted Soils. *Journal of Materials in Civil Engineering* 28, 04016071. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001573](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001573)
- Mitchell, J.K., 1993. *Fundamentals of soil behaviour*, Second edition, Ed. John Wiley and Sons. ed.
- Nazarian, S., Yuan, D., Tandon, V., 1999. Structural field testing of flexible pavement layers with seismic methods for quality control. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 50–60.
- Nguyen, T.T.H., 2015. Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement au gel (Thèse de doctorat). Paris Est.
- Osula, D.O.A., 1996. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite. *Engineering Geology* 42, 71–81. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00067-4)
- Otoko, G.R., 2014. The Effect of Salt Water on the Physical Properties, Compaction Characteristics and Unconfined Compressive Strength of a Clay, Clayey Sand and Base Course. *European International Journal of Science and Technology* 3, 9–17.
- Palacky, G.J., 1988. Resistivity characteristics of geologic targets, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, volume 1, theory., Society of Exploration Geophysicists., ed. M. N. Nabighian.
- Pellerin, F.-M., 1980. La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES - LCPC* 105–116.
- Pham, T.L., 2008. Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide (Thèse de doctorat). Ecole des Ponts ParisTech.
- Pomakhina, E., Deneele, D., Gaillot, A.-C., Paris, M., Ouvrard, G., 2012. ²⁹Si solid state NMR investigation of pozzolanic reaction occurring in lime-treated Ca-bentonite. *Cement and Concrete Research* 42, 626–632. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.01.008>
- Rajasekaran, G., Murali, K., Srinivasaraghavan, R., 1995. Fabric and mineralogical studies on lime treated marine clays. *Ocean engineering* 24, 227–234.
- Rajasekaran, G., Srinivasaraghavan, R., Murali, K., 1997. Effect of chlorides and sulphates on lime treated marine clays. *Soils and Foundations* 37, 105–115.
- Rao, S.M., Shivananda, P., 2005. Role of curing temperature in progress of lime-soil reactions. *Geotechnical & Geological Engineering* 23, 79–85.
- Regazzoni, P.-L., 2009. Confrontation et analyse d'érodimètres et caractérisation de la sensibilité à l'érosion d'interface. Thèse de l'université de Nantes.
- Reiffsteck, P., Pham, T.L., Vargas, R., Paihua, S., 2006. Comparative study of superficial and internal erosion tests, in: *Third International Conference on Scour and Erosion*. p. 5.
- Rhoades, J.D., Kaddah, M.T., Halvorson, A.D., Prather, R.J., 1997. Establishing soil electrical conductivity-salinity calibrations using four-electrode cells containing undisturbed soil cores. *Soil Science Society American Journal* 123, 137–141.

- Richard, G., Cosenza, P., Aboubacar, A., Tabbagh, A., 2005. Etude des variations de résistivité électrique d'un sol limoneux en fonction de sa teneur en eau et de sa porosité, in: 5ème Colloque GEOFCAN.
- Rogers, C.D.F., Glendinning, S., 1996. Modification of clay soils using lime, in: Proceedings, Seminar on Lime Stabilization. pp. 99–114.
- RTDMF, 2015. Référentiel technique:digues maritimes et fluviales.
- Serratrice, J.F., 2015. Préparation des éprouvettes de laboratoire par compactage semi-statique.
- Sharma, P.K., Singh, T.N., 2008. A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 67, 17–22. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0109-y>
- Slowinski, E.J., Masterton, W.L., 1990. Qualitative Analysis and the Properties of Ions in Aqueous Solution, Second edition, College Publishers. ed. Saunders Golden Series.
- Stapledon, D., MacGregor, P., Bell, G., Fell, R., 2005. *Geotechnical Engineering of Dams*, Taylor & Francis. ed. Taylor & Francis.
- Stoltz, G., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2014. Weathering of a lime-treated clayey soil by drying and wetting cycles. *Engineering Geology* 181, 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.013>
- Szymkiewicz, F., 2011. Évaluation des propriétés mécaniques d'un sol traité au ciment. Université Paris-Est.
- Tashiro, C., Ikeda, K., Inoue, Y., 1994. Evaluation of pozzolanic activity by the electric resistance measurement method. *Cement and Concrete Research* 24, 1133–1139.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. *Applied geophysics* second edition, Cambridge University Press. ed.
- Thompson, M., 1968. Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils. Presented at the Committee on lime and lime-fly ash stabilisation 44th annual meeting.
- Toohy, N. M., Mooney, M.A., 2012. Seismic modulus growth of lime-stabilised soil during curing. *Geotechnique* 62, 161.
- Toohy, N.M., Mooney, M.A., 2012. Seismic modulus growth of lime-stabilised soil during curing. *Géotechnique* 62, 161–170. <https://doi.org/10.1680/geot.9.P.122>
- Vaughan, P.R., Soares, H.F., 1982. Desing of filters for clay cores of dams. *J. Geotech. Eng. Div.* 108(1), 17–31.
- Wakim, J., Hadj-Hassen, F., De Windt, L., 2009. Effect of aqueous solution chemistry on the swelling and shrinkage of the Tournemire shale. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46, 1378–1382. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.08.002>
- Wan, C.F., Fell, R., 2004. Investigation of Rate of Erosion of Soils in Embankment Dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130, 373–380. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:4\(373\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(373))
- Wan, C.F., Fell, R., 2002. Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test (UNICIV No. 412), UNICIV.
- Waxman, H.M., Smits, L.J.M., 1968. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal* 243, 107–122.
- White, J.R., 2007. *Fluid mechanics*, 7th edition, McGraw-Hill. ed. McGraw-Hill.
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., Gardner, L.W., 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 1956, vol. 21, no 1, p. 41-70. *Geophysics* 21, 41–70.

Références des sites internet

Encyclopédie Larousse : <https://www.larousse.fr/encyclopedie>

US-EPA : <https://archive.epa.gov/esd/archive-geophysics/web/html/index-12.html>

Eau de mer, salinité moyenne : <http://doc.lerm.fr/salinite-leau-mer/>

Référence des normes

AFNOR. 2005. NF EN1997-1. Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales

ASTM D559/D 559M 2015 Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures

ASTM D6276-99a (2006), Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006

ASTM D6276-19 (2019), Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization

NF P18-837 Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique. Produits de calage et/ou scellement à base de liants hydrauliques. Essai de tenue à l'eau de mer et/ou à l'eau à haute teneur en sulfates. 1987

NF P94-100 Sols : reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essais d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement, 2015

NP P94.041 Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide, 1995

NP P94.057 Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation, 1992

NF P94-052-1 Sols : reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Partie 1 : limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration, 1995

NF P94-068 Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la taché, 1993

NF EN 459-1 Chaux de construction - Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité, 2015

NF EN 13286-41 Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41 : méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques 2003

Annexes

Annexe 1 : Description et objectifs généraux du projet Digue2020

Le projet DIGUE 2020 pour objectif de créer une plateforme de recherche en Région Paca, sur le littoral méditerranéen afin de permettre une permanence des observations in situ, sur une période significative de plusieurs années.

En rupture avec les pratiques traditionnelles, les fonctions recherchées sont celles d'une digue moderne :

- réduire les risques de rupture par brèche provoquée par l'érosion grâce à un gain considérable, dû au **sol-chaux**, de résistance à la surverse et à l'érosion interne, et à une quantification précise des actions extérieures sur l'ouvrage ;
- réduire les coûts de construction et de maintenance des digues ;
- réduire les nuisances de transport en limitant l'apport de matériaux issus de gisements éloignés, et en utilisant des sols locaux considérés comme médiocres vis à vis des techniques traditionnelles ;
- intégrer digues et déversoirs dans l'environnement paysager sans rompre la continuité écologique ;
- permettre de restaurer les anciennes digues sans déconstruction : en utilisant les ressources locales, et en réduisant la production de déchets.

De manière générale et à long terme, l'enjeu est de permettre la maîtrise des risques de submersions marines dans une logique de protection des habitants dans le respect du développement durable (utilisation d'un matériau naturel, la chaux ; et construction prenant en compte les aspects environnementaux et écologiques des sites).

Le projet DIGUE 2020 comprend cinq modules :

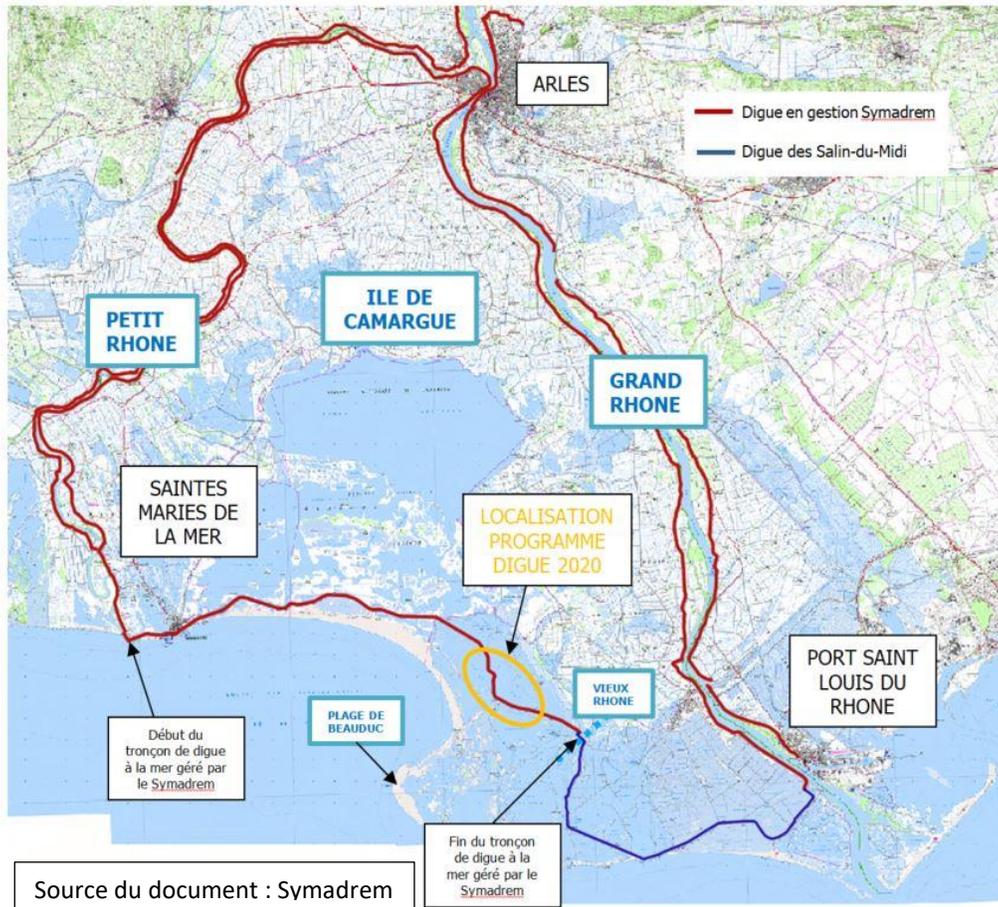
➤ **Module 1. Conception et construction de la plateforme de recherche DIGUE 2020**

Cette plateforme de quelques centaines de mètres de long (environ) en matériau nouveau – le sol-chaux - sera réalisée dans un secteur soumis à l'action de l'eau. Elle constituera un laboratoire de terrain pour la recherche s'inscrivant sur le long terme.

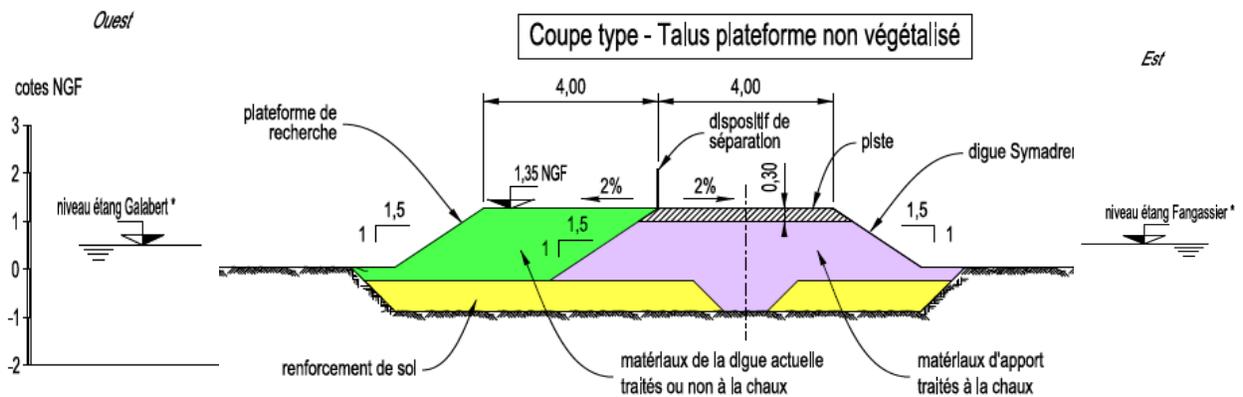
- **Module 2. Quantifier les actions de la mer et ses conséquences sur la plateforme de recherche DIGUE 2020** y compris les actions extrêmes, et une signature de leur évolution dans le cadre du changement climatique.
- **Module 3. Quantifier la durabilité de la plateforme de recherche DIGUE 2020 et ses matériaux constitutifs (sol-chaux)** vis à vis de ces actions, ou évaluer la durée de son aptitude à accomplir sa fonction de protection contre les submersions.
- **Module 4. Evaluer la perception du risque de submersion marine et la perception de l'efficacité des digues de protection** par les populations des territoires concernés.
- **Module 5. Coordination et communication**

Annexe 2 : Plan de l'ouvrage Digue2020 et principales caractéristiques

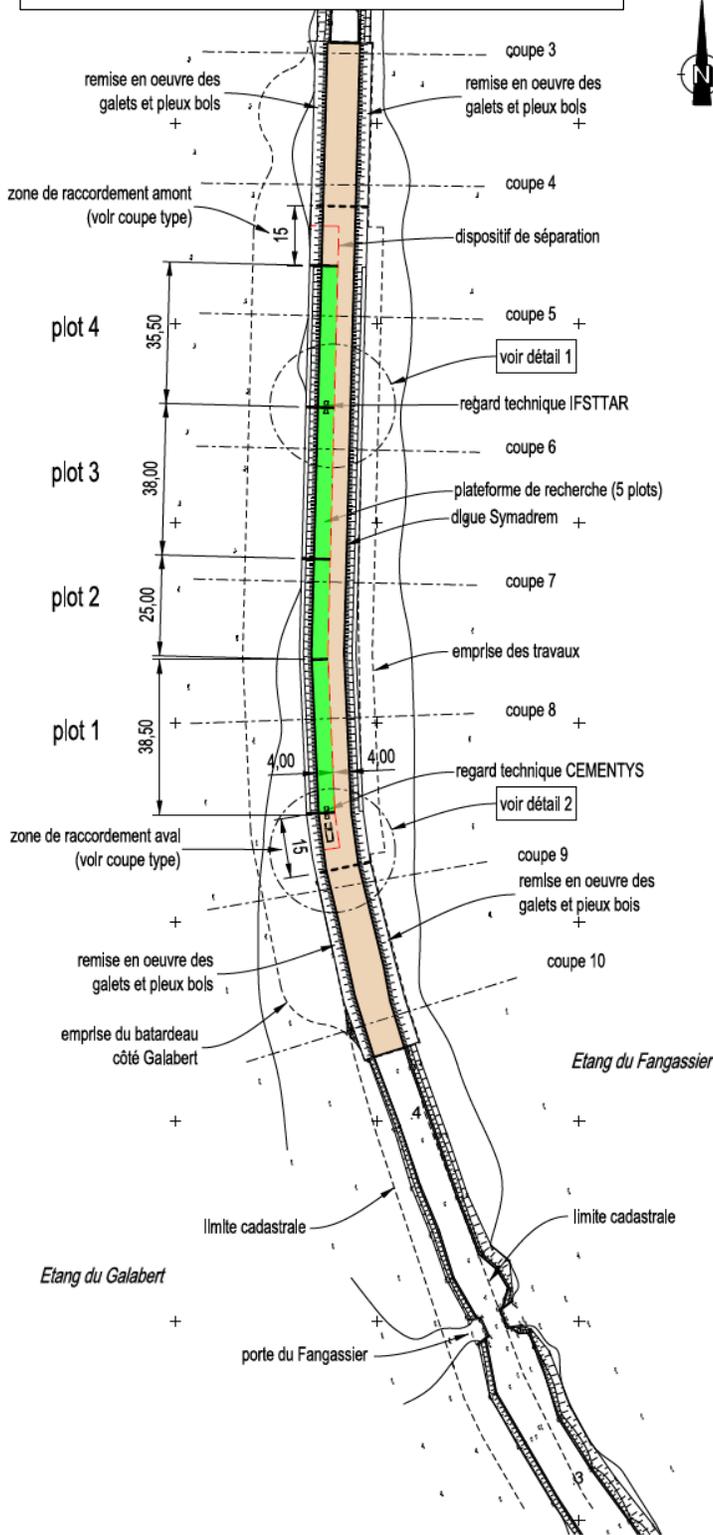
Localisation de l'ouvrage Digue 2020



Coupe type de l'ouvrage Digue2020 (source : ISL Ingénierie)



Plan de l'ouvrage (source : ISL Ingénierie)



Plot	Caractéristiques
1	Chaux 2,5% Densité 95 % OPN
2	Chaux 4% Densité 95 % OPN
3	Chaux 2,5% Densité 98,5 % OPN
4	Chaux 0% Densité 98,5 % OPN

Instrumentation géophysique des plots 3 et 4 par l'IFSTTAR

Flûte de 36 électrodes
espacées de 0,5 m



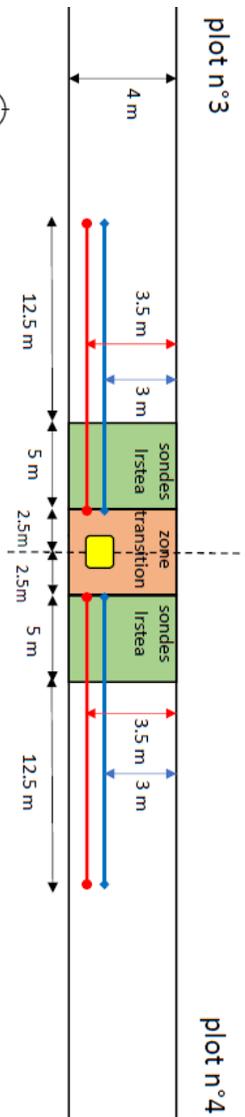
Flûte de 24 géophones
espacés de 0,75 m



Regard technique



Etang du Galabert



Autres capteurs (Irstea)

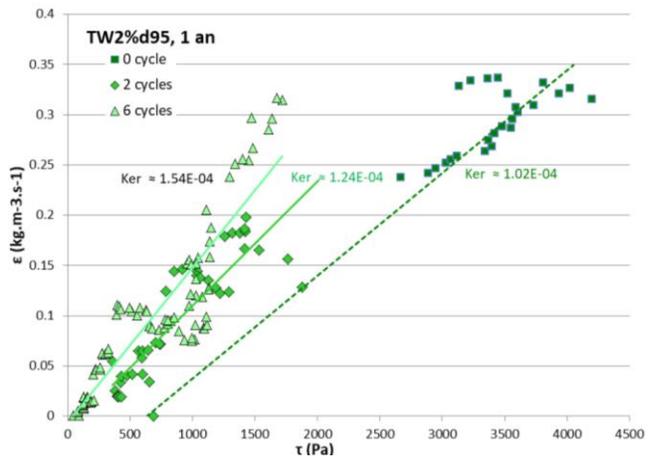
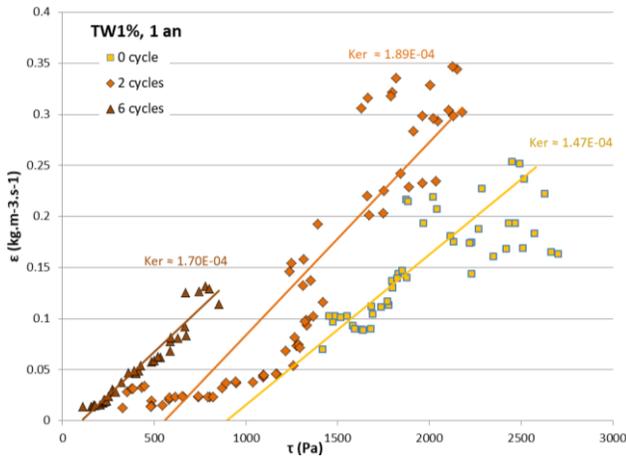
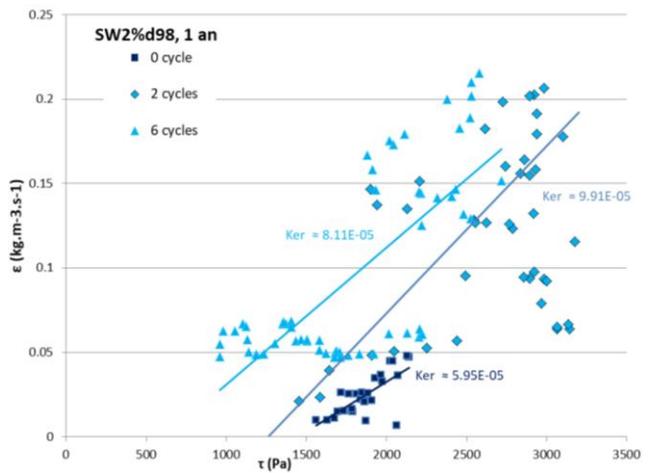
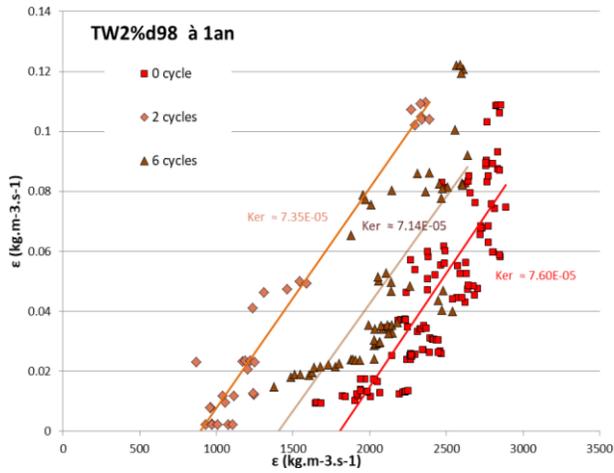
- **Température** : sonde PT100 (0-100°C)
- **Résistivité électrique du sol** : sonde Wenner (0-400 Ohm.m)
- **Teneur en eau** : sonde TDR (0-100%)
- **Succion** : sonde tensiométrique (0-500kPa)
- **Pression interstitielle** : piézomètre à corde vibrante (0-10kPa)
- **pH** : sonde pH (0-14)
- **Salinité du sol** par calcul à partir de la conductivité électrique (0-100mS/cm)
- **Mesures météorologiques** : vent, pluviométrie température et humidité de l'air

ECHELLE : 1/1000



ISL INGENIERIE
65 avenue Clément Ader
34170 CASTELNAU LE LEZ
FRANCE
Tel : (+33) 04.67.54.51.88
E-mail : info@isl-ingenierie.fr

Annexe 3 : Résultats interprétés des essais HET sur les différents matériaux traités, à l'issu des cycles hydriques à l'eau de mer, après 1 an de cure



Annexe 4 : Classification de l'érosion des matériaux selon Wan & Fell (2002), conséquence du temps de cure sur les indices d'érosion après les cycles hydriques.

TW2%d98	Cure 90 jours			Cure 1 an			
Cycles appliqués	0	2	6	0	2	6	Sol non traité (0 cycles)
I_{HET}	4.22	3.91	3.75	4,11	4,14	4,13	2,95
Description de l'érosion : classification de Wan & Fell	Modérément lent	Modérément rapide	Modérément rapide	Modérément lent	Modérément lent	Modérément lent	Très rapide
SW2%d98	Cure 90 jours			Cure 1 an			
Cycles appliqués	0	2	6	0	2	6	Sol non traité (0 cycles)
I_{HET}	4,30	4,18	4,30	4,22	4,00	4,09	2,95
Description de l'érosion : classification de Wan & Fell	Modérément lent	Modérément lent	Modérément lent	Modérément lent	Modérément lent	Modérément lent	Très rapide
TW1%d98	Cure 90 jours			Cure 1 an			
Cycles appliqués	0	2	6	0	2	6	Sol non traité (0 cycles)
I_{HET}	4.09	3.96	3.23	3,83	3,72	3,77	2,95
Description de l'érosion : classification de Wan & Fell	Modérément lent	Modérément rapide	Très rapide				
TW2%d95	Cure 90 jours			Cure 1 an			
Cycles appliqués	0	2	6	0	2	6	Sol non traité (0 cycles)
I_{HET}	4,03	3,71	3,82	4,00	3,91	3,81	2,95
Description de l'érosion : classification de Wan & Fell	Modérément lent	Modérément rapide	Modérément rapide	Modérément lent	Modérément rapide	Modérément rapide	Très rapide