

La plateforme de recherche DIGUE 2020 : un laboratoire de recherche in situ pour la conception de digues maritimes, l'étude des actions de la mer sur les digues et la durabilité

The DIGUE 2020 research platform: an in situ research laboratory for the design of coastal levees, the study of the actions of the sea on the levees and durability

L. Peyras¹, T. Mallet², S. Nicaise¹, T. Manicacci², C. Chevalier³, S. Palma Lopes³, P. Azemard⁴, N. Chaouch¹

¹ INRAE Centre PACA, Aix Marseille Université, UMR RECOVER, 13100 Aix-en-Provence, France, laurent.peyras@inrae.fr

² SYMADREM, Arles, France, symadrem@symadrem.fr

³ GERS, Université Gustave Eiffel, 13300 Salon de Provence, France, christophe.chevalier@univ-eiffel.fr

⁴ Cerema, Direction Méditerranée, Laboratoire d'Aix-en-Provence, Aix-en-Provence, France, pierre.azemard@cerema.fr

Résumé

Les ouvrages de protection contre la houle et/ou contre les submersions couvrent 17 % des côtes françaises, soit environ 1 200 km. Compte tenu du changement climatique, notamment l'élévation du niveau de la mer, et de la démographie importante, les enjeux sur le littoral sont considérables.

Dans ce contexte, la plateforme de recherche collaborative DIGUE 2020, réalisée par INRAE avec le partenariat du SYMADREM, du CEREMA et de l'Université G. Eiffel, a été conçue afin d'améliorer nos connaissances et permettre une meilleure maîtrise du risque de submersion marine. Cette plateforme DIGUE 2020 est adossée à la digue à la mer du SYMADREM dans le parc régional de la Camargue, à cheval sur les communes d'Arles et des Saintes-Maries-de-la-Mer. Il s'agit d'un laboratoire de recherche in situ sur les digues maritimes qui vise à étudier les principales thématiques suivantes :

- la conception et la réalisation de digue en sol-chaux en milieu maritime,
- la quantification des effets de l'action de la mer sur les digues de protection,
- la quantification de la durabilité du matériau des digues en sol-chaux en milieu maritime.

Durant le projet, trois thèses de doctorats [3-9-13] ont accompagné la réalisation de la plateforme sur les thématiques de recherche portées par DIGUE 2020. L'article présente les principaux résultats de ces recherches qui ont porté sur :

- la présentation de la plateforme de recherche construite. Celle-ci est un véritable laboratoire de terrain, structuré en différents plots correspondant à des teneurs en chaux différentes. La présentation porte sur la structuration de la plateforme elle-même et sur la présentation des effets de l'érosion par l'action de la mer sur les différents plots en lien avec leur composition ; la présentation des résultats relatifs à l'action de la mer et les investigations non destructives conduites sur la plateforme. Des défauts contrôlés simulant les problèmes courants de type conduits d'érosion ou terriers ont été introduits artificiellement et des mesures géotechniques innovantes depuis la surface ont été déployées ;

- la présentation des résultats relatifs à la caractérisation de la durabilité du sol-chaux pour un ouvrage maritime. Les questions de la durabilité sont encore peu maîtrisées sur une digue en sol-chaux en site maritime et le projet a permis d'investiguer les effets du temps, de l'enchaînement des cycles saisonniers, des cycles maritimes, de l'action des vagues, et des actions physico-chimiques.

Ce laboratoire in situ a vocation à accueillir d'autres projets de recherche, associant des partenaires académiques et du secteur socio-économique (gestionnaires de digues, industriels, bureaux d'ingénierie).

Mots-clés

DIGUE 2020 ; digue maritime ; sol chaux ; plateforme de recherche ; durabilité

Abstract

Hydraulic infrastructure designed to mitigate flooding covers 17% of the French coastline, roughly equating to 1,200 kilometers. With the pressing concerns posed by climate change, notably rising sea levels, and significant population density, the stakes along the coast are substantial.

In this context, the collaborative research platform DIGUE 2020, spearheaded by INRAE in partnership with SYMADREM, CEREMA, and the University of G. Eiffel, was developed to enhance the management of the risk of marine submersion. The DIGUE 2020 platform is located adjacent to the SYMADREM seawall within the Camargue Regional Park, near the city of Arles. It serves as an in-situ research laboratory dedicated to coastal levees and focuses on the following key areas:

- Design and construction of a soil-lime breakwater in the marine environment.
- Quantification of the impacts of sea actions on coastal levees.
- Assessment of the longevity of lime-treated soil in a maritime environment for coastal levees.

Throughout the project, three PhD theses [3-9-13] were conducted in conjunction with the establishment of the platform, centering on the research themes undertaken by DIGUE 2020. The article presents the main results of this research, which focused on:

- The presentation of the built research platform. This is a genuine field laboratory structured in different parts corresponding to different lime contents. The focus is on the structural aspects of the platform itself and the examination of the effects of erosion due to sea actions on the various plots, segments, or sections in relation to their composition,
- The presentation of results pertaining to sea actions and non-destructive investigations performed on the platform. Controlled flaws that simulate common issues such as erosion pipes or burrows were artificially introduced, and innovative geotechnical measures were implemented from the surface,
- The presentation of the results regarding the durability of lime-treated soil for maritime structures. From a maritime perspective, questions about the durability of lime-soil levees remain insufficiently understood. The DIGUE 2020 project has allowed for an exploration of the effects of time, seasonal cycles, maritime cycles, wave actions, and physico-chemical processes.

This in situ laboratory is intended to host other research projects, involving both academic and socio-economic partners (levee managers, industrialists, engineering offices).

Key Words

DIGUE 2020; costal levees ; lime-soil; research platform; durability

Introduction

Les ouvrages de protection contre la houle ou contre les submersions couvrent 17 % des côtes françaises, soit environ 1 200 km. Compte tenu du changement climatique, notamment l'élévation du niveau de la mer, et de la démographie importante, les enjeux sur le littoral sont considérables.

Dans ce contexte, la plateforme de recherche collaborative DIGUE 2020, réalisée par INRAE avec le partenariat du SYMADREM, du CEREMA et de l'Université Gustave Eiffel, financée par le CPER et le FEDER, a été conçue afin de permettre une meilleure maîtrise du risque de submersion marine. Cette plateforme, unique en France et à l'international, a été étudiée à partir de 2017 et achevée en juillet 2020. Elle est adossée à la digue à la mer du SYMADREM dans le parc régional de la Camargue, à cheval sur les communes d'Arles et des Saintes-Maries-de-la-Mer. Elle a été réalisée par les entreprises GUINTOLI et MASONI avec une maîtrise d'œuvre portée par ISL ingénierie. Le contrôle extérieur a été assuré par la Société du Canal de Provence.

Il s'agit d'un laboratoire de recherche in situ sur les digues maritimes qui vise à étudier les principales thématiques suivantes :

- la conception et la réalisation de digue en sol-chaux en milieu maritime,
- la quantification des effets de l'action de la mer sur les digues de protection,
- la quantification de la durabilité du matériau des digues en sol-chaux en milieu maritime.

Structurés en plusieurs plots, les composants de la plateforme de recherche ont reçu des traitements différenciés. Les performances des compositions spécifiques de matériaux et les actions de la mer sur la plateforme seront suivies et analysées sur 20 ans grâce aux instruments de haute technologie implantés au cœur de la structure.

Ce laboratoire in situ a vocation à accueillir d'autres projets de recherche complémentaires, associant des partenaires académiques et du secteur socio-économique (gestionnaires de digues, industriels, bureaux d'ingénierie).

Les connaissances développées et partagées au moyen de la plateforme DIGUE 2020 ont pour objectif le développement de projets de confortement ou d'élaboration de nouvelles digues d'une conception durable. Sur le long terme, la plateforme DIGUE 2020 permettra des avancées techniques sur les digues maritimes sur d'autres sites maritimes en France et à l'international.

Dans cet article, nous présentons les premiers résultats obtenus durant le projet ayant abouti à la construction de la plateforme. En effet, la réalisation de la plateforme de recherche s'est accompagnée en parallèle de trois thèses de doctorat. La présentation des résultats est organisée de la façon suivante :

- la présentation de la plateforme de recherche construite (SYMADREM et INRAE) ;
- la présentation des résultats relatifs à l'action de la mer et les investigations non destructives (Cerema) ;
- la présentation des résultats relatifs à la caractérisation de la durabilité du sol-chaux pour un ouvrage maritime (Univ. G. Eiffel).

Plateforme de recherche sur les sols traités à la chaux en milieu marin

Organisation de la plateforme DIGUE 2020

Construite entre l'automne 2019 et le début d'été 2020, la plateforme de recherche est accolée à

la digue maritime qui sépare les étangs du Galabert et du Fangassier dans le parc naturel régional de Camargue. Le sol de la plateforme est issu de la déconstruction de la digue existante : de classe GTR A1 (classe F1 selon NF EN 16907-2), avec 76 % de passant à 80 μm et une valeur de bleu de sol (VBs) de 2,16 g/100 g, le sol contient par ailleurs de la matière organique (autour de 5 %), des traces de chlorures, sulfates. Compte tenu des contraintes environnementales fortes, l'homogénéisation et le traitement ont été réalisés sur une zone dédiée éloignée. La largeur en crête est de 3 m, la hauteur d'environ 1,35 m : 5 couches de remblai d'épaisseur 30 cm ont été compactées par un compacteur à pieds dameurs VP5 sur le sol support amélioré par un cloutage en 0/300 mm (FIGURES 1 et 5).



FIGURE 1. Vues de la construction de la plateforme : traitement, compactage, plateforme achevée.

La plateforme comprend 4 plots correspondant à des teneurs en chaux et des taux de compactage différents (FIGURE 2) : du sud vers le nord, les plots 1 à 3 sont traités à des teneurs en chaux variant de 2,5 à 4 %, tandis que le taux de compactage varie entre 95 et 98,5 % de la masse volumique Optimum Proctor ($\rho_d\text{OPN}$).

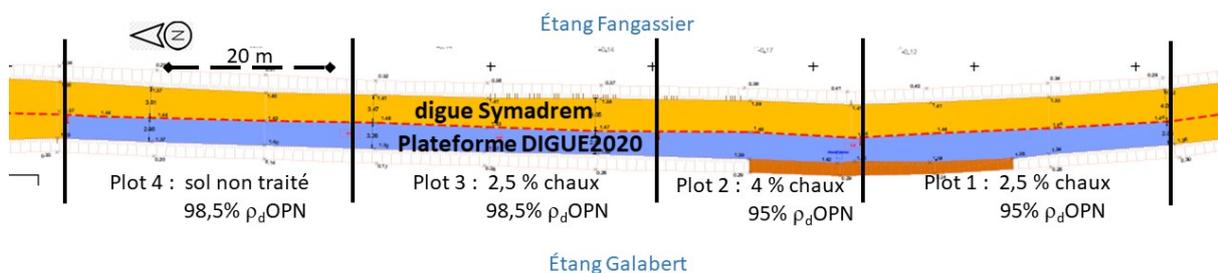


FIGURE 2. Organisation de la plateforme DIGUE2020, vue en plan.

Le plot 4 en sol non traité et compacté à 98,5 % $\rho_d\text{OPN}$ représente le témoin par rapport aux plots traités à la chaux : il permet une analyse comparative de l'évolution entre le sol traité et le sol non traité.

Comparaison de la résistance à l'érosion

Le talus ouest de la plateforme présente une pente de 3(base)/2(hauteur) et est directement exposé aux actions mécaniques et hydrauliques de l'étang du Galabert (houle, clapot, cycles d'humidification/séchage). La plateforme est par ailleurs soumise à l'érosion éolienne, aux conditions environnementales comprenant des températures chaudes en été, pas de gel ainsi

qu'une exposition directe au soleil sans protection de surface.

INRAE réalise des visites régulières permettant le suivi de l'érosion. Outre l'observation visuelle, des mesures avec un LIDAR de terrain permettent le relevé de 2 profils par plot. Des mesures intégrées par photogrammétrie sont plus rarement réalisées, car elles nécessitent de réunir des conditions météorologiques favorables et un niveau bas de l'étang. L'objectif de ces mesures est de comparer l'érosion des différents plots : comparer le recul du talus et comparer les volumes érodés.

Pour tous les plots, l'érosion a été plus importante qu'anticipée : les couches les plus basses ont été érodées, sans doute en lien avec un compactage limité par la portance de la fondation. Le plot 4 non traité n'a pas résisté à un an de sollicitation, et a dû être renforcé par des pieux bois. La FIGURE 3 montre un profil par plot mesuré au LIDAR en février 2023, soit un peu plus de 2 ans après l'achèvement des travaux. Tous les plots ont subi de l'érosion, les couches de compactage sont révélées avec une fragilité en fond de couche. Le plot 4, non traité, est le plus érodé. Le plot 3 (plus compacté) et le plot 2 (teneur en chaux plus élevée) sont sensiblement plus résistants que le plot 1.

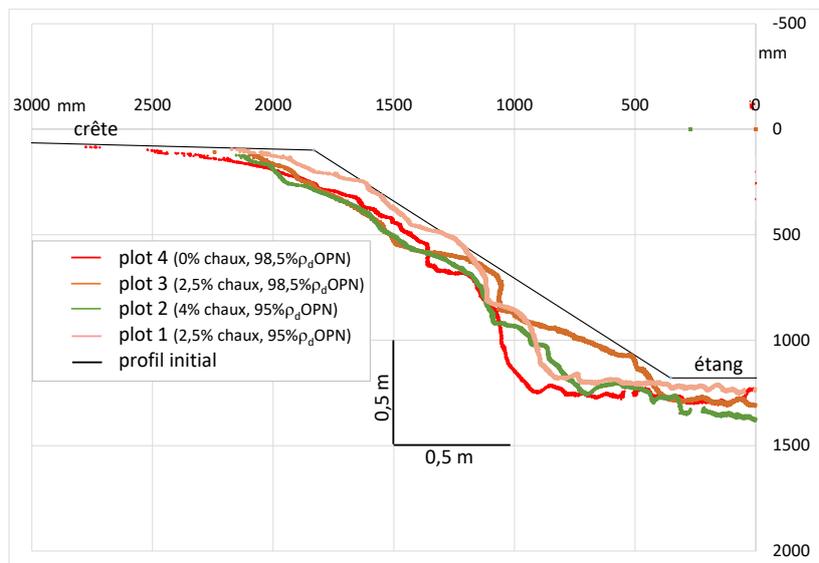


FIGURE 3. Profils des talus de la plateforme DIGUE 2020 relevés en février 2023.

Cette résistance relative des différents plots correspond bien à ce qui est observé visuellement sur le linéaire total. Ce constat ponctuel pourra être vérifié par les mesures par photogrammétrie et LIDAR 3D réalisées depuis 2023 et qui permettent de quantifier le volume érodé.

Action de la mer et investigations non destructives

Action de la mer

Dès l'origine du projet, le choix du site a dû intégrer la nécessité technique d'être soumis aux actions marines récurrentes sans être trop directement exposé afin de pouvoir évaluer la durabilité des solutions testées sur la durée de vie projeté de la plateforme. Lors du choix du site

les sollicitations ont été évaluées par des analyses simplifiées à partir de données bathytopographiques et de calculs empiriques de fetchs. De nombreux autres paramètres (foncier, réglementaire, environnementaux, d'accessibilité, etc.) ont également été pris en compte pour aboutir à un compromis. Le site retenu est à l'écart des parcours touristiques ce qui limite les risques de dégradations. La plateforme sera ainsi soumise aux actions du clapot, de bascule des étangs sous l'action du vent, des entrées maritimes lors des tempêtes sans être exposés directement aux vagues littorales.

Investigations non destructives

Dans le cadre du projet, la thèse de S. Gendrey [7-8-9] a porté sur l'établissement d'un modèle de fusion de données géophysiques (résistivité électrique, sismique) pour évaluer des paramètres géotechniques. Le modèle proposé permet de découpler les effets de la densité et de la teneur en eau sur les deux observables géophysiques (résistivité et vitesse de propagation des ondes sismiques) et ainsi lever les ambiguïtés des estimations basées sur un seul observable. Dans un premier temps, la démarche est basée sur l'étude en laboratoire d'éprouvettes de sol compacté et humidifié avec de l'eau de mer synthétique. L'évolution des paramètres géophysiques en fonction de la masse volumique et de la teneur en eau (Figure 4), a permis l'obtention d'un modèle de conversion par fusion de données fondé sur la théorie des possibilités.

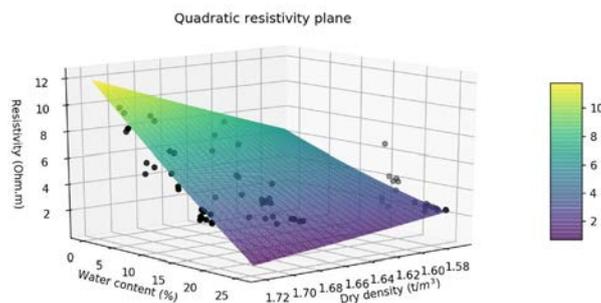


FIGURE 4. Corrélation quadratique des résistivités selon les teneurs en eau de mer et densité sèches sur des éprouvettes de sol non traités [7-8-9].

Dans un second temps, des simulations numériques ont confirmé l'intérêt de cette approche pour détecter et caractériser des défauts à partir de la combinaison de méthodes géophysiques usuellement utilisées.

Lors de la construction de la plateforme, un certain nombre d'artéfacts (tubes vides, ballons) ont été positionnés dans le corps de digue (Figure 5). Ils constituent des défauts contrôlés qui permettront de tester la capacité de détection de techniques de surface et de suivre l'évolution de cette détection au cours du vieillissement de l'ouvrage.

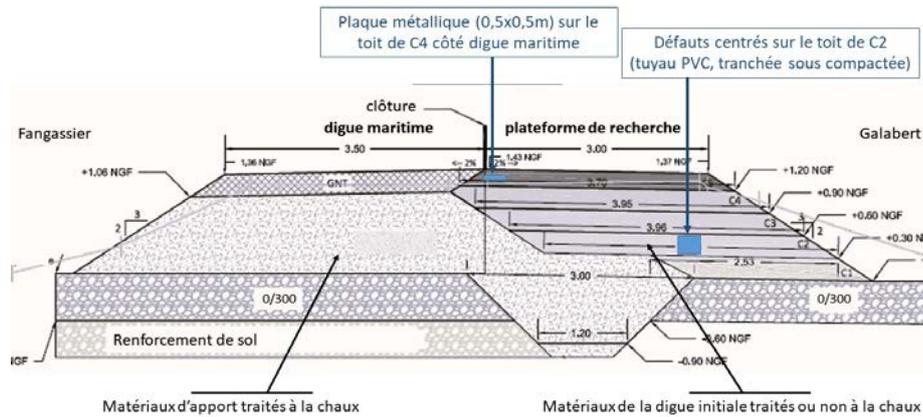


FIGURE 5. Coupe en travers de la digue et disposition des défauts contrôlés.

Enfin un jeu de données sismiques et électriques a été acquis sur le site (Figure 6), constituant le référentiel au jeune âge (état zéro). Destinées à caractériser une évolution, aucune interprétation de ces mesures brutes n'a été réalisée.



FIGURE 6. Mesures de Tomographie de Résistivité Électrique sur la plateforme.

Caractérisation de la durabilité du sol-chaux pour un ouvrage maritime

Le traitement à la chaux de sols fins est une technique d'amélioration bien maîtrisée dans le domaine des terrassements. Cette technique n'est cependant pas encore largement utilisée pour les structures hydrauliques du fait du manque de connaissances sur la durabilité à long terme des sols traités à la chaux pour ce type d'ouvrages [10-14]. Dans le cas du projet, il s'agissait donc d'étudier l'influence du traitement à la chaux sur la durabilité d'un sol fin dans le cadre de son utilisation pour une digue maritime en Camargue. Une thèse de doctorat a été dédiée à cette étude [3]. La démarche scientifique a été basée sur deux volets : une étude paramétrique et multi-physique conduite au laboratoire, et un suivi géophysique de la plateforme in situ. Nous résumons ici l'étude de durabilité au laboratoire.

Protocole expérimental

Afin de démontrer l'effet du traitement à la chaux sur la durabilité d'un sol fin, un protocole expérimental a été mis en œuvre. L'objectif était d'accélérer le vieillissement de matériaux en reproduisant les variations cycliques de conditions environnementales, et de caractériser différentes propriétés des matériaux (sensibilité à l'érosion, microstructure, propriétés géomécaniques et géophysiques) à différents stades de dégradation. L'influence des propriétés initiales sur le comportement à long terme a également été prise en compte pour établir des critères de durabilité. Ainsi, des échantillons de différents matériaux ont été reconstitués suivant le même protocole. À partir d'une formulation de référence **TW2%d98** pour un sol préparé avec de l'eau du réseau (TW : « tap water ») avec une teneur en chaux optimale de 2 %, et compactage à 98 % de l'OPN, différentes situations « dégradées » ont été considérées : préparation avec de l'eau de mer **SW2%d98** (SW : « Salt Water »), sol sous compacté à 95 % de l'OPN **TW2%d95** ou sous traité à 1 % de teneur en chaux **TW1%d98**. Le sol naturel a aussi été testé [4].

Bien que différents temps de cure aient été étudiés, nous nous focalisons dans cet article sur un temps de cure de 90 jours en conditions contrôlées avant d'appliquer les cycles hydriques avec l'eau de mer artificielle (NF P18-837). Jusqu'à 12 cycles de séchage-humidification ont été imposés aux différents matériaux suivant un protocole rigoureux [5].

Résultats

Plusieurs propriétés des matériaux ont été suivies au cours de ces cycles : résistance à l'érosion (interne et externe), performance mécanique, microstructure et propriétés géophysiques [4] (résistivité électrique et vitesses sismiques). Nous nous concentrons ici sur l'érosion interne (érosion de conduit par Hole Erosion Test [1-10]) et la résistivité électrique [3, 4, 6].

Les évolutions du coefficient d'érosion k_{er} en fonction de la contrainte de cisaillement critique τ_c et du nombre de cycles sont résumées Figure 7(a). Ces résultats montrent des cinétiques bien distinctes suivant les matériaux étudiés. Il apparaît clairement que des conditions de réalisation moins exigeantes en termes de compactage (TW2%d95) ou de teneur en chaux (TW1%d98) rendent les matériaux plus érodables. Le matériau de référence (TW2%98) et son équivalent constitué à l'eau de mer (SW2%d98) présentent une meilleure résistance à l'érosion (k_{er} faible et τ_c élevé). Le résultat de la Figure 7(b) est un premier essai de corrélation de la résistivité électrique avec l'initiation de l'érosion de conduit (τ_c), pour 4 matériaux traités et un nombre croissant de cycles à l'eau de mer. La relation entre résistivité et τ_c dépend fortement de la composition et du compactage des matériaux. La résistivité est ici principalement contrôlée par la salinité de l'eau, et ne semble pas très sensible à la dégradation des composés cimentaires liés au traitement à la chaux, contrairement à τ_c qui en dépend fortement. Le paramètre commun à ces deux observations est le nombre de cycles d'humidification à l'eau de mer.

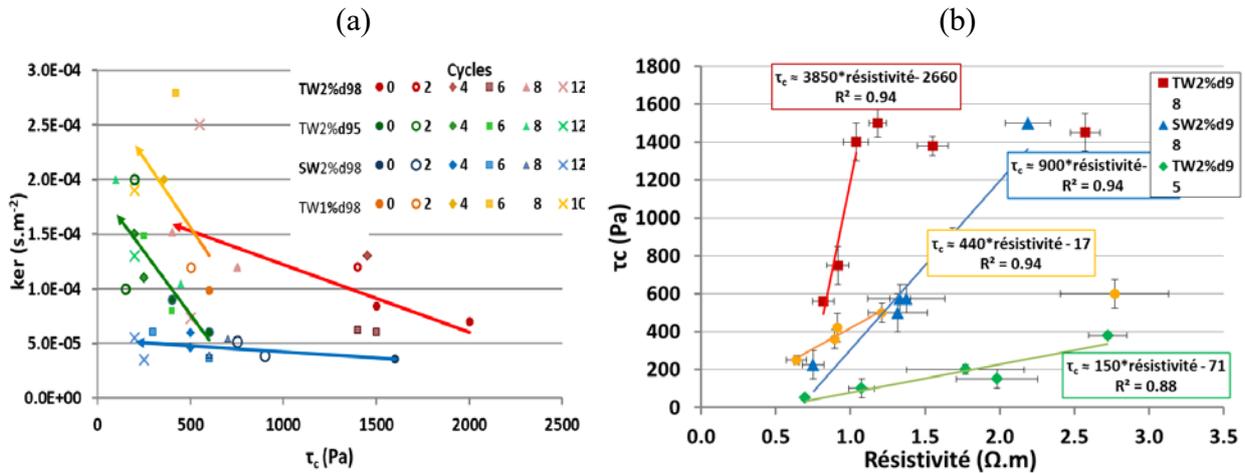


FIGURE 7. Résultats de l'étude au laboratoire : (a) contrainte de cisaillement critique τ_c et coefficient d'érosion k_{er} pour les différents matériaux et pour un nombre croissant de cycles de séchage-humidification (flèches), et (b) corrélation entre l'essai d'érosion (τ_c) et les mesures de résistivité électrique pour différents matériaux et un nombre croissant de cycles de séchage-humidification (ajustements linéaires).

Synthèse

L'étude de la durabilité a montré que les cycles hydriques diminuent la résistance des sols (traités ou non) à l'érosion de conduit. Cependant la résistance des sols traités à la chaux demeure clairement supérieure. La densité (taux de compactage) et la teneur en chaux sont les paramètres qui contrôlent la durabilité du matériau au regard de ce type d'érosion. Enfin, la résistivité électrique pourrait contribuer aux études de durabilité en informant sur l'état des matériaux (état hydrique et salinité).

Conclusion

La plateforme de recherche collaborative DIGUE 2020 est un véritable laboratoire de terrain adossée à la digue à la mer en Camargue. Elle a été conçue pour étudier les principaux sujets suivants :

- la conception et la réalisation de digue en sol-chaux en milieu marin, permettant la démonstration du concept et des recommandations techniques ;
- la quantification des effets de l'action de la mer sur les digues de protection, permettant de quantifier l'érosion de la digue par la mer en fonction de la teneur en chaux et de détecter et caractériser des défauts à partir de la combinaison de méthodes géophysiques ;
- la quantification de la durabilité du matériau des digues en sol-chaux en milieu marin : l'étude paramétrique au laboratoire a montré que la durabilité des matériaux était contrôlée par leur état initial (taux de compactage, teneur en chaux) et significativement impactée par les cycles d'exposition à l'eau de mer.

Durant la construction de la plateforme, trois thèses de doctorats [3-9-13] ont été conduites sur les thématiques de recherche portées par DIGUE 2020. Les principaux résultats de ces recherches sont présentés dans l'article et les références de ces travaux sont précisées.

La construction de cette plateforme étant maintenant terminée, ce laboratoire in situ vise à conduire d'autres nouveaux projets de recherche, associant des partenaires académiques et du secteur socio-économique (gestionnaires de digues, industriels, bureaux d'ingénierie). À ce titre, le projet de recherche BIGALPS financé par l'Europe va être engagé et mobilisera la plateforme. Ce projet s'inscrit dans le domaine de la stabilisation des sols et a pour objectif de développer une bio-technologie respectueuse de l'environnement et capable de traiter certains des problèmes de stabilité des sols (glissements de terrain, érosion, stabilisation des sols de fondation, etc.).

Remerciements

Ce projet a été financé avec le concours de l'Union Européenne avec le Fonds Européen de Développement Régional et a reçu le soutien de l'État, de la Région SUD Provence-Alpes-Côte d'Azur et du département des Bouches-du-Rhône dans le cadre du CPER. Les auteurs remercient vivement ces institutions pour avoir financé ce projet.

Références

- [1] Chevalier C., Bonelli S. (2016). *Méthodologie de caractérisation expérimentale*, ERINOH Érosion INterne dans les Ouvrages Hydrauliques. Paris. Presse des Ponts.
- [2] Chevalier C., Haghghi I., Herrier G. (2012). Resistance to erosion of lime treated soils: a complete parametric study in laboratory. Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE6), Paris, France
- [3] De Baecque M. (2019). Caractérisation multi-physique de la durabilité d'un sol traité à la chaux pour une application aux digues maritimes. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est. <https://theses.hal.science/tel-02899988>
- [4] De Baecque M., Chevalier C., Le Feuvre M., Palma-Lopes S., Reiffsteck P. (2018). Durability of lime treated soil in coastal environment: Methodology for a laboratory study and first results. Ninth International Conference on Scour and Erosion (ICSE), Nov. 5-8, Taipei, Taiwan.
- [5] De Baecque M., Chevalier C., Palma Lopes S., Reiffsteck P. (2020). Influence of sea water and wetting-drying cycles on the erosion of a lime treated soil: perspectives to marine dike improvement. 10th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-10), Virtual.
- [6] Du Plooy R., Palma Lopes S., Villain G., Dérobert X. (2013). Development of a multi-ring resistivity cell and multi-electrode resistivity probe for investigation of cover concrete condition. NDT & E International, 54, 27-36.
- [7] Gendrey S. *et al.* (2019). Diagnostic d'ouvrages hydrauliques en terre en milieu maritime par contrôles non destructifs et fusion de données. 3è colloque sur les Digues Maritimes et Fluviales de Protection contre les Inondations, mars 2019, Aix-en-Provence, France
- [8] Gendrey S. *et al.* (2019). Improving the diagnosis of coastal earth-filled dikes combining geophysical methods by data fusion. iPoster presented at: AGU fall meeting, December 9-13, 2019, San Francisco.
- [9] Gendrey S (2020). Évaluation de la teneur en eau et de la masse volumique sèche par combinaison de méthodes géophysiques : application aux digues en terre. Thèse de doctorat de l'université d'Aix Marseille. <https://www.theses.fr/259366587>
- [10] Herrier G., Berger R., Bonelli S. (2012). The Friant-Kern canal: a forgotten example of lime-treated structure in hydraulic conditions. Sixth International Conference on Scour and Erosion (ICSE6), Paris, France.
- [11] Haghghi I., Chevalier C., Duc M., Guédon S., Reiffsteck P. (2013). Improvement of Hole Erosion Test and Results on Reference Soils. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 139, 330-339.
- [12] Herrier G., Puiatti D., Chevalier C., Froumentin M., Bonelli S., Fry J.J. (2013). Lime Treatment: New Perspectives for the use of Silty and Clayey Soils in Earthen Hydraulic Structures. *Wasserwirtschaft*, 103(5), 112-115.
- [13] Jeannot C. (2020). Études expérimentales et numériques du comportement vibroacoustique de sols sous écoulement turbulent dans le contexte de l'érosion interne de digues. Thèse de doctorat d'Aix Marseille Université.
- [14] Mehenni A., Cuisinier O., Masrouri F. (2016). Impact of Lime, Cement, and Clay Treatments on the Internal Erosion of Compacted Soils. *J. Mater. Civil Eng.*, 28, 04016071.