

# RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES RENFORCEMENTS DES LEVEES DE LOIRE EN DEEP SOIL MIXING : ADAPTATION DE FORMULATION DU MELANGE

## **DEEP SOIL MIXING FEEDBACK IN LOIRE LEVEES: ADAPTATION OF THE MIX FORMULATION**

Lucile SAUSSAYE<sup>1</sup>, Sébastien PATOUILLARD<sup>2</sup>, Edouard DURAND<sup>1</sup>, Clément AUGÉARD<sup>1</sup>, Loïc GERVAIS<sup>2</sup>, Mathieu MONACO<sup>2</sup>, Manuel SCHUHMACHER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cerema, Blois, France

<sup>2</sup> DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France

**RÉSUMÉ** – Depuis 2013, la DREAL Centre-Val de Loire a dirigé plusieurs chantiers utilisant des techniques de mélange en place par *deep soil mixing*. Sur certains secteurs, la présence de matière organique a conduit à des défauts localisés de prise. Plusieurs formulations chaux/ciment ont été testées en laboratoire puis sur le terrain afin de pallier à cette problématique. Les résultats de ces essais sont présentés dans cet article.

**ABSTRACT**—Since 2013, DREAL Centre-Val de Loire has led several projects with deep soil mixing techniques. In some areas, the presence of organic matter has led to localized lack of setting and hardening. Several quicklime/cement formulations were tested in the laboratory and then in the field to overcome this problem. The results of these tests are presented in this paper.

### 1. Introduction

Les levées de la Loire moyenne assurent une protection contre l'inondation de la plaine alluviale, constituant de grands systèmes d'endiguement et totalisant près de 600 km d'ouvrages. Ces levées assurent la protection des populations, des biens et des activités installées dans le lit majeur du fleuve. Principalement constituées en terre, elles sont particulièrement sensibles au risque d'érosion interne (Abdelkaoui *et al.*, 2015), phénomène susceptible d'entraîner la formation de brèches en cas de crue.

Pour renforcer l'étanchéité d'une digue et de sa fondation, les techniques de mélange en place (*deep soil mixing*) représentent l'une des solutions constructives proposées. Elles consistent à désagrèger le sol en place, le plus souvent à l'aide d'un outil de malaxage, et à y introduire un liant hydraulique afin d'en améliorer certaines caractéristiques. Ces techniques sont fondées sur un savoir-faire des entreprises plutôt que sur des normes techniques, nécessitant une réflexion préalable à la réalisation des écrans sur la formulation de mélange à adopter en fonction du site.

Depuis 2013, la DREAL Centre-Val de Loire a piloté plusieurs chantiers utilisant des techniques de mélange en place par *deep soil mixing*. Ainsi, une vingtaine de kilomètres d'écrans ont été réalisés avec la technique de tranchée de sol mixé par voie sèche dont sept sur la levée d'Orléans. Le retour d'expérience a conduit à faire évoluer les approches de conception et de réalisation en exploitant au mieux la connaissance des sols. Dans tous les cas, une étude de formulation du mélange sol-liant en laboratoire préalable au démarrage des travaux ainsi que la mise en œuvre d'une zone de test grandeur nature semblent nécessaires. Cette dernière permet de valider la technique au démarrage du chantier. Ensuite, des contrôles réguliers des caractéristiques de l'écran pendant sa construction (prélèvements pour essais de résistance à la compression simple et essais de perméabilité en laboratoire) sont effectués.

Sur certains secteurs, la présence de matière organique a engendré des défauts

localisés de prise. Plusieurs formulations chaux/ciment ont été testées en laboratoire puis sur le terrain afin de pallier à cette problématique. Les résultats de ces essais sont présentés dans cet article qui complète une précédente publication présentée lors du symposium de la commission internationale des grands barrages (CIGB) en 2019 (Patouillard *et al.*, 2019).

## **2. Renforcement des levées de Loire par écrans étanches en *deep soil mixing***

### **2.1. Mise en œuvre**

La technique testée utilise un engin équipé d'une lame avec chaîne rotative, dite « trancheuse-malaxeuse », qui permet une réalisation continue de l'écran dans la digue et les sols de fondation avec la possibilité d'en faire varier la profondeur (Mathieu *et al.*, 2012). L'écran est alors constitué d'un mélange entre le sol en place, un liant hydraulique et de l'eau. Le liant hydraulique préconisé est un ciment CEMIII/C 32,5 N.

Cette technique, particulièrement bien adaptée pour réaliser des écrans de profondeur inférieure à 10 m, sur de grands linéaires a été déployée en adaptant à chaque fois le dosage en ciment et en eau aux sols rencontrés (Poulain *et al.*, 2018).

### **2.2. Retour d'expérience sur les chantiers de la levée d'Orléans en 2017-2018**

La levée du val d'Orléans forme un système de protection contre les inondations de la Loire de près de 43 km. Cette digue, qui s'étend de Guilly à Saint-Pryvé-Saint-Mesmin (d'amont vers l'aval), protège près de 65 000 personnes situées dans le val inondable. L'étude de dangers de la levée d'Orléans réalisée en 2012 montre que le niveau de sûreté du système d'endiguement est bien inférieur au niveau de protection qu'il semble pouvoir apporter. Depuis 2016, la DREAL Centre-Val de Loire met en œuvre un projet global de fiabilisation pour augmenter ce niveau de sûreté. Celui-ci prévoit la reconstitution de l'étanchéité sur plusieurs secteurs pour un total d'environ 7 km. Un retour d'expérience de cette opération a fait l'objet de publications (Patouillard *et al.*, 2018 & 2019).

Sur certains tronçons de la levée d'Orléans, des défauts localisés de prise du mélange sol-ciment ont été constatés. Après investigation, l'une des origines de ce problème a été identifiée comme étant la présence d'une teneur en matières organiques (MO) significative (supérieure à 3%) dans les sols malaxés.

Par la suite, pour le traitement des tronçons présentant une teneur en MO élevée, une étude de formulation en laboratoire a été menée pour tester différentes natures et différents dosages en liant hydraulique, associé ou non à de la chaux vive (CaO) (Soletanche Bachy, 2018).

## **3. Adaptation de la formulation de *deep soil mixing* sur la levée d'Orléans**

### **3.1. Teneur en matières organiques des sols sur le linéaire à traiter**

Des prélèvements de sol sont réalisés à la tarière, espacés de 200 m sur le tracé de l'écran, sur l'ensemble de la hauteur de l'écran projeté, afin de constituer des échantillons

de sol « moyens ». Le corps de digue est sablo-limoneux, faiblement argileux, tandis que le sol de fondation de la levée est limono-graveleux.

La teneur en MO des sols est mesurée selon la norme XP P94-047 (méthode par calcination). La teneur en eau (w) des sols est mesurée selon la norme NF P94-050, à 50°C. La teneur en MO des sols est comprise entre 1,6 et 3,7%, avec une valeur moyenne de 2,8% (Figure 1). La teneur en eau des sols est comprise entre 10,9 et 19,4%, avec une valeur moyenne de 15,3%.

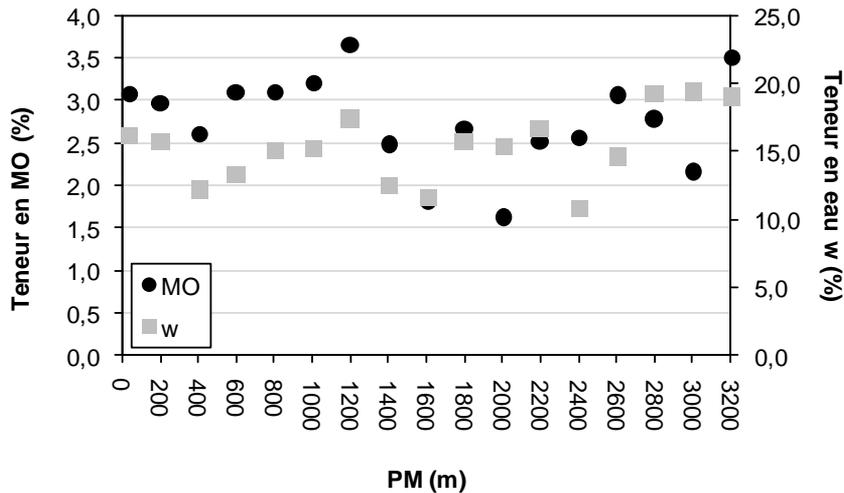


Figure 1. Teneur en MO et teneur en eau des sols sur le tronçon de levée étudié.

### 3.2. Etude de formulation en laboratoire

Les objectifs initiaux de qualité du mélange *deep soil mixing* sont les suivants :

- $R_{c28} \geq 1,5$  MPa ;
- $k_{28} \leq 1.10^{-8}$  m/s.

Suite au constat que les 3 formulations intégrant le ciment au laitier CEMIII/C 32,5 N seul ne permettaient pas d'atteindre les performances escomptées, 6 formulations de mélange sol-liant(s) différentes ont été proposées (Tableau 1). Il s'agit d'ajouter au sol soit du ciment au laitier CEMIII/C 32,5 N (usine de Lumbres) associé à de la chaux vive (CaO) soit deux liants hydrauliques routiers (LHR) prêts à l'emploi (PAE), constitués avec du clinker, de la chaux vive et du laitier (Soletanche Bachy, 2018).

Chacune des formulations a donné lieu à la confection d'une série de 6 éprouvettes cylindriques de 97 mm de diamètre et de 194 mm de hauteur afin de mesurer :

- la résistance à la compression simple  $R_c$  à 7, 14, 28 et 56 jours selon la norme NF EN 13286-41 ;
- la perméabilité  $k$  à 14 et 28 jours selon la norme ISO 17892-11.

Différents prélèvements de sols sont mélangés pour constituer un échantillon de sol représentatif de la levée. Le sol est tamisé à 20 mm afin de ne conserver que la fraction 0/20 mm. La quantité d'eau d'apport est de 380 L/m<sup>3</sup> de mélange.

L'échéance de 56 jours est retenue afin de tenir compte de la cinétique d'hydratation du mélange chaux-ciment et des LHR/liants PAE, réputée plus lente.

Tableau 1. Formulations testées.

Mélange	Nature du liant hydraulique	Dosage en liant hydraulique (kg/m <sup>3</sup> de mélange)	Dosage de chaux vive (kg/m <sup>3</sup> de mélange)
1	CEMIII/C 32,5 N	160	-
2	CEMIII/C 32,5 N	175	-
3	CEMIII/C 32,5 N	210	-
4	CEMIII/C 32,5 N	210	10
5	CEMIII/C 32,5 N	210	20
6	CEMIII/C 32,5 N	210	30
7	CEMIII/C 32,5 N	180	50
8	PAE 1 (LHR)	230	-
9	PAE 2 (LHR)	210	-

La Figure 2 représente les valeurs de  $R_c$  en fonction du temps pour chacun des mélanges. La Figure 3 représente leur perméabilité. Seules deux formulations se sont avérées compatibles avec les objectifs du projet en appliquant un coefficient multiplicateur de 2 à 3 issu des observations entre les résultats en laboratoire et ceux de terrain. En effet, les mélanges en laboratoire sont plus fins et plus homogènes que ceux produits par la trancheuse-malaxeuse. La formulation retenue est composée de 20 kg/m<sup>3</sup> de CaO et de 210 kg/m<sup>3</sup> de ciment CEMIII/C 32,5 N LH SR.

La performance hydraulique des mélanges est atteinte quel que soit le mélange (Figure 3).

Comme indiqué précédemment, dans le cas étudié, l'utilisation de ciment de laitier seul, même à dosage élevé, ne permet pas d'atteindre la résistance à la compression ciblée (Figure 2). L'incorporation simultanée de chaux vive accroît significativement la résistance à la compression simple. Cet effet est probablement lié aux mécanismes d'hydratation de la chaux : réduction de la teneur en eau, accroissement de la température et forte alcalinité.

L'utilisation de liants PAE ne permet pas d'atteindre les performances mécaniques escomptées, bien que leur composition chimique se rapproche de certaines formulations testées par ailleurs. Cela peut simplement s'expliquer par des conditions d'utilisation différentes de celles pour lesquelles ces liants ont été développés.

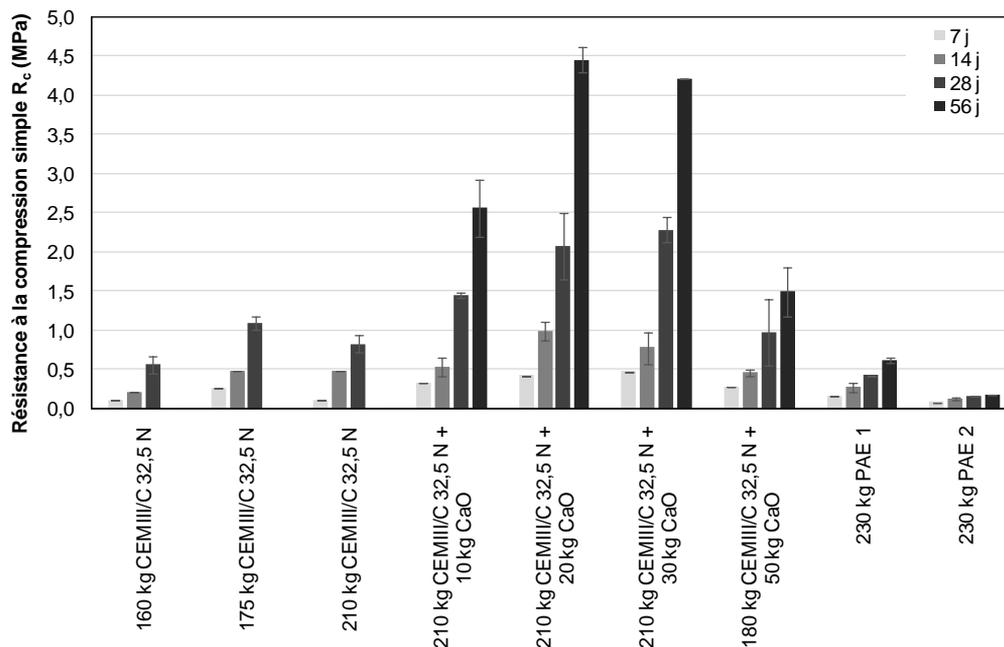


Figure 2. Résistance à la compression simple des mélanges sol-chaux-liant hydraulique confectionnés en laboratoire.

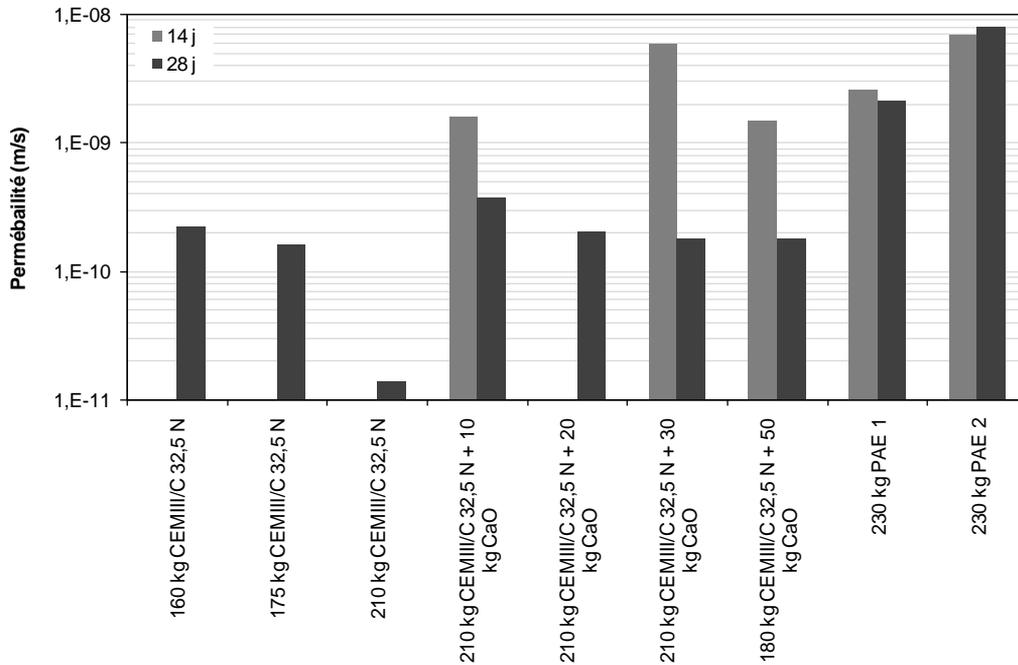


Figure 3. Perméabilité des mélanges sol-chaux-liant hydraulique confectionnés en laboratoire.

### 3.3. Réalisation d'une planche d'essais

Lors du démarrage des travaux, une planche d'essais a été réalisée. Celle-ci est volontairement localisée au droit de la section présentant les teneurs en MO les plus élevées. Dans un premier temps, celle-ci a permis de vérifier la faisabilité technique de l'ajout de chaux vive à la formulation de *deep soil mixing* sur un tronçon d'écran d'une quarantaine de mètres de longueur. Ensuite, cette planche d'essais a consisté à renforcer significativement la fréquence et le nombre d'éprouvettes de mélange prélevées dans l'écran, à des profondeurs différentes. Le nombre d'éprouvettes constituées lors de ce démarrage permet ainsi de réaliser des mesures de  $R_c$  et de  $k$  à court terme afin de vérifier la prise du mélange, d'apprécier si les objectifs de caractéristiques de l'écran seront bien atteints et de mettre en place des actions correctives le cas échéant. Il a aussi permis de vérifier les caractéristiques du mélange à moyen et long termes. La Figure 4 et la Figure 5 attestent que la performance hydraulique du mélange visée est atteinte dès 7 jours et que sa performance mécanique est atteinte à 56 jours. Les performances moindres constatées ici sont liées aux différences de finesse et d'homogénéité des mélanges en laboratoire et sur site. La valeur de  $R_c$  mesurée à 90 jours au droit du profil PM1160 montre une évolution de la performance mécanique du mélange à long terme.

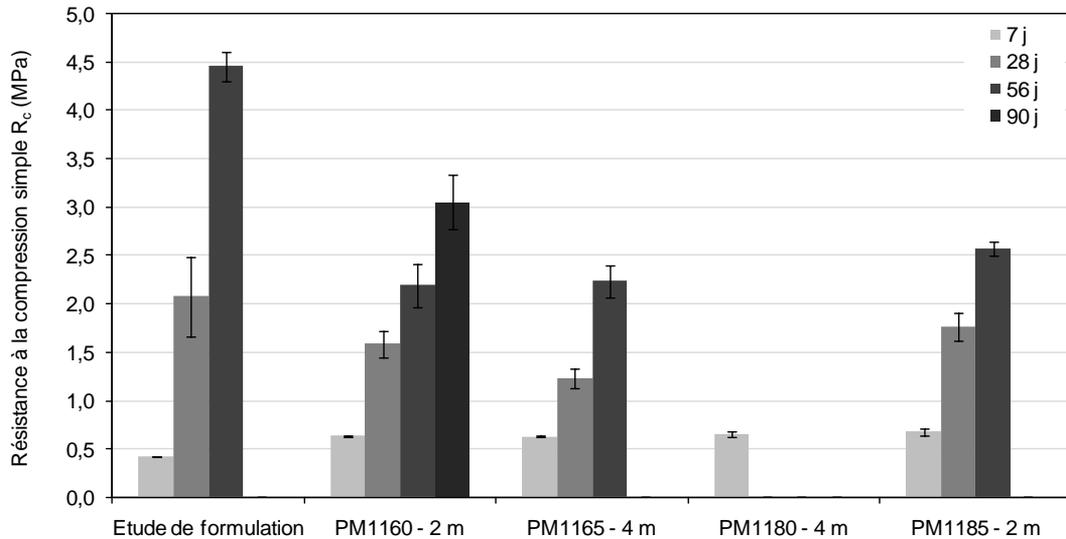


Figure 4. Résistance à la compression simple du mélange sol-chaux-ciment prélevé lors de la réalisation de la planche d'essais.

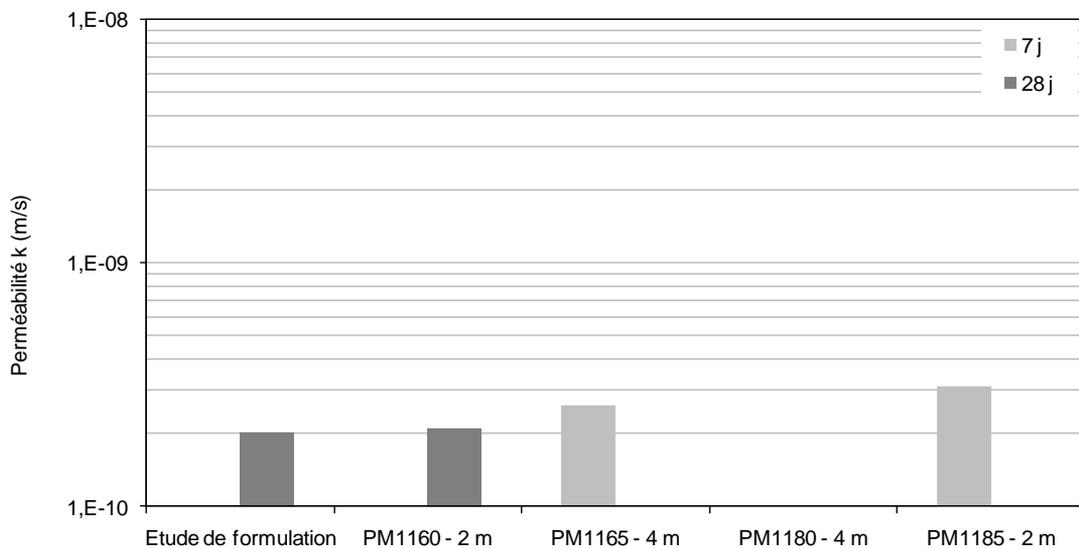


Figure 5. Perméabilité du mélange sol-chaux-ciment prélevé lors de la réalisation de la planche d'essais.

## 4. Prescriptions adaptées au mélange chaux-ciment

### 4.1. Études géotechniques préalables

Les études préalables à la réalisation d'un écran étanche par mélange du sol en place dans une digue doivent inclure :

- une étude géotechnique de reconnaissance des sols complète intégrant la détermination de la teneur en MO des sols rencontrés et du mélange de sols sur la hauteur de l'écran et de tout autre perturbateur chimique éventuel de la prise et de l'hydratation du liant hydraulique ;
- une étude de formulation complète en laboratoire intégrant plusieurs natures de sols (formation lithologique la plus défavorable et/ou mélange de sols), plusieurs natures de liants, plusieurs dosages en liants voire en eau afin de déterminer la formulation de traitement optimale à adopter en phase travaux ;

- à l'issue de cette étude de formulation, notamment en cas de doute sur la formulation de mélange à adopter, il faut recourir à la réalisation d'une planche d'essais afin de valider définitivement la technique de mise en œuvre et la formulation du mélange (nature du ou des liants, dosage en liants, dosages minimal et maximal en eau).

#### **4.2. Contrôle de la qualité du mélange sol-chaux-ciment**

Les modalités de contrôle de la qualité du mélange sont les suivantes :

- prélèvement d'échantillons de chaux et de ciment épandus afin de pouvoir les tester ultérieurement en cas de défaillance sur les performances mécaniques attendues ;
- tous les 100 m, lors des prélèvements de mélange à l'état frais à 2 profondeurs dans l'écran, mesure de la densité in situ et confection d'éprouvettes pour la réalisation d'essais de perméabilité et de résistance à la compression simple en laboratoire à 7, 56 et 90 jours (voire au-delà s'il subsiste des éprouvettes conservatoires à l'issue des travaux) ;
- tous les 200 m, la réalisation d'essais de contrôle des performances hydrauliques et mécaniques, resserrée tous les 100 m en cas de doute sur l'atteinte des objectifs.

Le délai de 56 jours constitue une adaptation aux modalités de contrôle pour un mélange chaux-ciment dont l'hydratation est plus lente. Dans le cas idéal, il est recommandé d'opérer un suivi à long terme de l'écran si l'accès est toujours possible (au niveau de la planche d'essais par exemple).

### **5. Conclusions**

Les écrans étanches réalisés dans les digues de Loire en *deep soil mixing* depuis plus de 6 ans ont ouvert des perspectives de restauration performante de ces ouvrages. Les connaissances progressent concernant la pérennité des caractéristiques de perméabilité et de résistance mécanique de ces écrans. L'observation de défauts de prise du mélange sol-ciment a nécessité de caractériser plus finement les sols, notamment par la recherche de la teneur en matière organique. Une réflexion sur la nature du liant à incorporer au mélange dans le cas de la présence de sols avec une teneur en MO élevée (supérieure à 3%) a donc été menée en concertation avec l'entreprise pour y remédier.

La mise en œuvre du mélange chaux-ciment a permis d'ouvrir l'éventail des sols pour lesquels la technique est applicable. Dans tous les cas, une étude de formulation du mélange sol-liant en laboratoire préalable au démarrage des travaux ainsi que la mise en œuvre d'une zone de test grandeur nature (planche d'essais) avant réalisation semblent nécessaires. La technique est adaptée ainsi à un ouvrage et un type de sol.

La planche d'essais permet de valider la technique au démarrage du chantier. Ensuite, des contrôles réguliers des caractéristiques de l'écran pendant sa construction (prélèvements pour essais de résistance à la compression simple et essais de perméabilité en laboratoire) sont effectués.

Les résultats confirment une marge d'adaptation de la technique sur des sols de différentes natures et permettent d'envisager de nouvelles perspectives d'application de la technique pour restaurer l'étanchéité de digues anciennes en terre en fonction des types de sols rencontrés.

La zone test présentée ici fera l'objet d'un suivi in situ au cours des prochaines années afin de conforter les résultats obtenus à long terme.

## **6. Remerciements**

Les auteurs remercient tous les acteurs qui ont permis la réalisation de ces travaux dans un contexte d'adaptation parfois difficile et plus particulièrement les représentants du le groupement d'entreprises Vinci Construction Terrassement-Soletanche Bachy pour le partage de connaissance des données géotechniques.

## **7. Références bibliographiques**

- Abdelkaoui F., Auger N., Gervais L. (2015). Le traitement de l'érosion interne sur les levées de Loire. GT DREAL Centre-Val de Loire/Département Etudes et Travaux Loire.
- Le Kouby A., Chevalier Ch., Saussaye L., Szymkiewicz F., Fargier Y. (2014). Renforcement des digues par la technique du deep soil mixing. Synthèse des résultats d'essais des chantiers innovants du Val d'Orléans. Gestion des risques hydrologique et des ouvrages fluviaux, 18-19 novembre 2014, Aix-en-Provence, France.
- Mathieu F., Lebreton M., Hoffman M., Mercer R. (2012). Dyke rehabilitation with a trencher: recent applications in Europe. 4<sup>th</sup> International conference on grouting and deep mixing, New Orleans, USA.
- Patouillard S., Auger N., Maurin J. (2013). Les renforcements de digues en Loire moyenne, mise en perspective des techniques et expérimentation. Colloque CFBR - Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions, 12-14 juin 2013, Aix-en-Provence, France.
- Patouillard S., Mathieu F., Saussaye L. (2018). Efficacité et durabilité des écrans étanches « soil mixing » dans les digues. Colloque CFBR - Méthodes et techniques innovantes dans la maintenance et la réhabilitation des barrages et des digues, 27-28 novembre 2018, Chambéry, France.
- Patouillard S., Saussaye L., Durand E., Manceau N., Le Kouby A., Coulet A. (2019). Retour d'expérience sur les renforcements des levées de Loire en deep soil mixing. Colloque Digues 2019, 3<sup>ème</sup> Colloque sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les inondations, 20-21 mars 2019, Aix-en-Provence, France.
- Patouillard S., Saussaye L., Mathieu F., Le Kouby A., Tourment R. (2019). Retour d'expérience sur les mélanges chaux/ciment dans les écrans deep soil mixing des levées de la Loire. ICOLD-CIGB, Réunion annuelle/Symposium, 9-14 juin 2019, Ottawa, Canada.
- Poulain D., Tourment R., Patouillard S., Chalus B., Chapuis H., Monier Th., Pestel A., Saussaye L., Le Kouby A. (2018). Techniques for repairing levees. 26<sup>th</sup> International congress of the International committee on large dams (ICOLD), 1-7 juillet 2018, Vienne, Autriche.
- Soletanche Bachy (2018). Confortement des levées de la Loire – Secteurs Guilly – Sigloy – Saint-Denis-en-Val – Saint-Pryvé-Saint-Mesmin - Note de formulation. Indice L.