

Écrans d'étanchéité dans les levées de la Loire : retour d'expérience sur 10 ans de « deep soil mixing » *Cut-off walls in the Loire levees: 10 years' experience of the "deep soil mixing" technique*

S. Patouillard¹, L. Saussaye², A. Le Kouby³, L. Gervais¹

¹ DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France, sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

² Cerema, équipe de recherche ENDSUM, Blois, France

³ UGE, Paris, France

Résumé

En 2013, la DREAL Centre-Val de Loire a présenté les différentes techniques de renforcement des levées de Loire utilisées depuis la seconde moitié du XX^e siècle, ainsi que les perspectives attendues de chantiers expérimentaux d'écrans étanches en corps de digues. Ces chantiers ont permis la comparaison de plusieurs techniques de « soil mixing » (2012-2013). En 2019, un premier bilan de ce suivi expérimental à 5 ans ainsi que le retour d'expérience de plusieurs chantiers d'écrans étanches sur les levées de Loire ont été communiqués et présentés. Ces chantiers ont conduit à faire évoluer les approches de conception et de réalisation en exploitant la connaissance des sols (de la digue et de ses fondations) et de la nappe alluviale circulant dans les couches perméables du sous-sol.

Depuis lors, les renforcements de digues conduits sur la Loire avec cette technique se sont poursuivis et représentent plus de 32 km. Dans le cadre de travaux de recherche sur la thématique « Vulnérabilité des digues au changement climatique des digues de Loire », un écran a été instrumenté à Montlouis-sur-Loire, en Indre-et-Loire, lors de sa réalisation.

L'objet du présent article est de présenter un état des connaissances sur la base des résultats à 10 ans du suivi expérimental (pérennité, rendement, contraintes de mise en œuvre et moyens de contrôle) et de compléter le retour d'expérience sur les chantiers de plus grande ampleur qui ont permis d'adapter la technique (liant ciment ou chaux-ciment, apport en eau, critères de malaxage). L'article présente les conditions dans lesquelles la technique est adaptée mais aussi pointe les limites de son application (types de sols, profondeur, dimension du chantier). Il décrit l'instrumentation à Montlouis-sur-Loire de la levée de Tours Loire amont permettant de mesurer la température et la teneur en eau volumique du matériau sol-ciment en insistant sur deux points : la validation de la méthode d'exécution au moment de la réalisation de l'écran et le choix d'une procédure de suivi pour vérifier la pérennité de ses caractéristiques mécaniques et hydrauliques. L'instrumentation est complétée par 2 piézomètres et une station météorologique. De plus, pour le suivi à long terme, des matériaux ont été prélevés pour tester leur perméabilité. Un carottage dans l'écran a également été effectué 2 ans après sa réalisation et soumis aux mêmes types d'essais.

Mots-clés

digue, étanchéité, soil mixing, chaux, ciment

Abstract

In 2013, DREAL Centre-Val de Loire presented the various techniques used since the second half of the 20th century to reinforce the levees of the Loire, as well as the expected prospects for experimental projects involving deep soil mixing cut-off walls in levees. These projects have enabled several soil mixing techniques to be compared (2012-2013). In 2019, an initial assessment of this experimental monitoring after 5 years and feedback from several cut-off walls projects on the Tours and Orléans Loire levees were communicated and presented (see Image). These projects have led to changes in design and construction approaches, using knowledge of soils (of the levee and its foundations) and of natural circulation of the alluvial water table in the permeable layers of subsoil. DREAL CVL has used this technique to reinforce more than 30 km of dykes on the Loire. As part of research on "Vulnerability of dykes on the Loire River to climate change", a cut-off wall was instrumented at Montlouis-sur-Loire, in the Indre-et-Loire region, during its construction. The purpose of this article is to present the current state of knowledge based on the results of 10 years of experimental monitoring (durability, yield, implementation constraints and control methods) and to supplement the feedback from larger-scale projects that have enabled the technique to be adapted (cement or lime-cement binder, water input, mixing criteria). The article presents the conditions under which the technique is suitable, but also points out the limits of its application (types of soil, depth, size of site). It describes the instrumentation used on the Montlouis-sur-Loire levee to measure temperature and volumetric water contained in the soil-cement material, focusing on two points: validation of the execution method during cut-off wall works, and the choice of a monitoring procedure to check the durability of its mechanical and hydraulic characteristics. The instrumentation is completed by 2 piezometers and a weather station. In addition, for long-term monitoring, materials were sampled and tested using permeability tests. A core sample was also taken from the screen 2 years after its completion and tested the same way. The article also focuses on some solutions used to treat transition zones (other types of reinforcement, bridges and quays in particular).

Key Words

Levee, impermeability, soil mixing, lime, cement



Chantier d'écran « deep soil mixing » en tranchée à Varennes/Loire (2021- dreal cvl/detl©drone expertise centre).

Deep soil mixing trench at Varennes/Loire (2021- dreal cvl/detl©drone expertise centre).

Introduction

Depuis 2010, la DREAL Centre-Val de Loire mène une réflexion sur les techniques de réalisation des écrans étanches en corps de digue. Elle s'est traduite en 2013 par une communication sur les différentes techniques de renforcement des levées de Loire utilisées depuis la seconde moitié du XX^e siècle et les perspectives attendues de chantiers expérimentaux d'écrans étanches en corps de digues utilisant plusieurs techniques de *Deep Soil Mixing (DSM)* [1]. Un premier bilan du suivi expérimental à 5 ans de ces techniques, accompagné par un retour d'expérience de plusieurs chantiers d'écrans étanches sur les levées de Loire, a été présenté en 2019 [2]. Ces publications présentent l'évolution des approches de conception et de réalisation en exploitant la connaissance des sols (de la digue et de ses fondations) et de la nappe alluviale circulant dans les couches perméables du sous-sol. Pour faire suite à ces travaux, il est d'abord proposé de présenter le bilan à 10 ans du suivi des chantiers expérimentaux. Ensuite, l'article complète le retour d'expérience des chantiers de plus grande ampleur qui représentent aujourd'hui plus de 32 km de linéaire de digues et qui ont fait évoluer l'application de la technique ainsi que son domaine de validité. Enfin, il est proposé de décrire les attendus et les premiers résultats de l'instrumentation d'une portion d'écran dans la levée protégeant le val de Tours (Montlouis-sur-Loire) menée dans le cadre de travaux de recherche sur la thématique « Vulnérabilité des digues de Loire au changement climatique ».

1- Bilan des chantiers expérimentaux à 10 ans

La technique de Deep Soil Mixing (DSM) telle qu'elle a été proposée dans les chantiers expérimentaux utilise un outil de malaxage de type trancheuse pour désagréger le sol en place en le mélangeant à un liant hydraulique afin d'en améliorer l'homogénéité, l'imperméabilité et la résistance. Le traitement est qualifié VH (voie humide) lorsque le mélange se fait au moyen de procédés permettant l'injection, via l'outil de malaxage, d'un coulis (liant hydraulique et eau) et VS (voie sèche) lorsque le liant est introduit sous forme pulvérulente, l'eau nécessaire étant ajoutée via l'outil de malaxage [2].

La Figure 1 présente les résultats du suivi à 4 et 8 ans en termes de perméabilité *in situ* (essais de type Nasberg réalisés dans l'écran) et de résistance à la compression simple (Rc) en fonction de la profondeur. La performance mécanique de l'écran est évaluée au cours de l'exécution afin de s'assurer de la prise (passage de l'état plastique à l'état solide) et du durcissement du mélange sol-ciment (augmentation de la résistance mécanique au cours du temps). Le suivi permet de s'assurer que la performance mécanique ne s'altère pas au cours du temps. Ces mesures ont été effectuées sur des carottes prélevées dans l'écran étanche de Sigloy (S, réalisé par VH) et de Guilly (G, réalisé par VS). Globalement, entre 4 et 8 ans, les perméabilités tendent à diminuer, avec des valeurs qui restent inférieures à 1.10^{-8} m/s, et les résistances mécaniques tendent à augmenter, ce qui montre la pérennité des écrans expérimentaux. Les limites indiquées en rouge sur les 2 graphiques correspondent aux valeurs cibles à 28 jours recherchées lors de l'exécution.

Par ailleurs, l'amélioration des connaissances sur le comportement des mélanges sol-ciment a permis d'adapter les techniques de carottages pour le prélèvement d'échantillons intacts, de taille des éprouvettes et de mesures en laboratoire afin d'augmenter le nombre de valeurs lors du suivi.

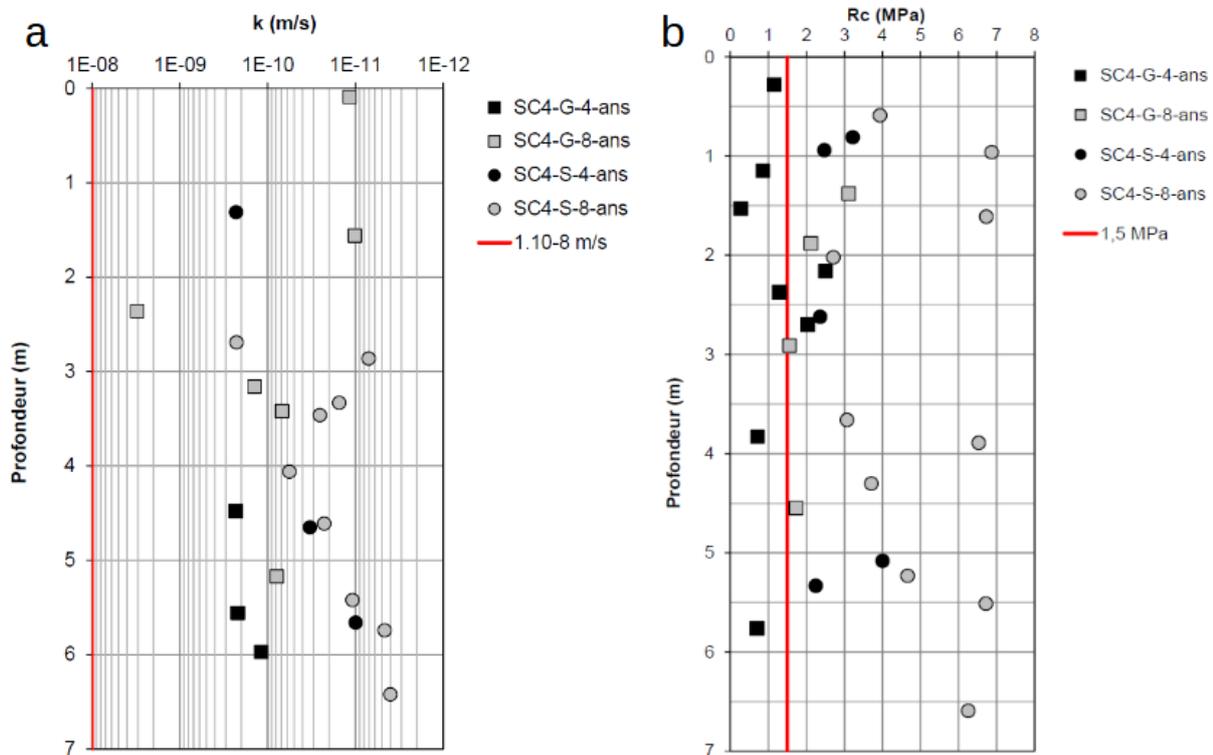


FIGURE 1. Perméabilités (a) et Rc (b) des écrans expérimentaux 4 et à 8 ans.

2- Retour d'expérience sur des chantiers de grande ampleur

Présentation synthétique des chantiers et enseignements tirés

Entre 2013 et 2023, la DREAL Centre-Val de Loire a conduit 21 chantiers permettant la réalisation d'écrans étanches en corps de digue sur plusieurs systèmes d'endiguement de la Loire moyenne. Ce sont plus de 32 km d'écrans qui ont été réalisés dans des levées et leurs sols de fondation. Les techniques (VH et VS) de Deep Soil Mixing (DSM) proposées dans les chantiers expérimentaux utilisent le liant CEMIII/C 32,5 N dosé entre 160 et 230 kg/m³ de sol traité. Le dosage dépend fortement des caractéristiques des sols rencontrés. Sa formulation est déterminée en laboratoire puis testée et affinée sur une planche d'essai.

Malgré des géométries et des structures relativement différentes, ces techniques se sont révélées adaptées dans la majorité des cas. Cependant, certains tronçons de digues n'ont pas pu être traités convenablement à partir de ces techniques, soit parce que la prise du mélange ne se faisait pas, soit parce que les caractéristiques attendues de l'écran n'étaient pas atteintes malgré la prise. Cela a conduit d'abord à réaliser des reprises d'écran (mise en place d'un nouvel écran sur l'écran frais dont la prise ne se fait pas) puis à améliorer le mélange par l'ajout de chaux vive au ciment (10 à 50 kg/m³ de sol traité) dès lors que la cause des défauts de prise avait été imputée en partie à la présence d'un taux important de matière organique [2]. Sur certains tronçons où les caractéristiques mécaniques n'étaient pas atteintes, un dispositif de suivi des écrans a été mis en place pour s'assurer de la pérennité de l'ouvrage (tests de perméabilité) comme à Veuves (41) ou à La Riche (37).

Enfin, ces techniques se sont révélées inadaptées sur certains tronçons (géométrie particulière de la digue, zone de transition avec une écluse, un pont, un quai, etc.) notamment pour des raisons d'encombrement des engins de chantier. Ces cas ont conduit à recourir à d'autres techniques telles que la paroi au coulis bentonite-ciment, les palplanches métalliques voire dans certains cas à abandonner l'écran étanche (intervention au niveau du talus amont). Dans un cas notamment, les mauvais résultats des études de formulation au droit d'une ancienne brèche ont conduit à affiner les investigations géotechniques et découvrir que la levée disposait sur ce tronçon d'un noyau argileux qu'il convenait de ne pas déstructurer. Le Tableau 1 donne une synthèse par grand système d'endiguement de ces éléments à partir de la base de données des chantiers conduits par la DREAL Centre-Val de Loire.

TABLEAU 1. Synthèse des chantiers d'écrans étanches dans les digues de Loire de 2013 à 2023.

Système d'endiguement	Période	DSM (m)	Nature dominante du sol	Ajout chaux (m)	Reprise ¹ (m)	Dispositif de suivi ²	Abandon technique DSM (m)	Autre technique (m)
Cisse-Vouvray	2014	1 000	limon			1 000		
Orléans	2013 à 2018	7 250	limon & argile	3 640	385		465	
Tours	2014 à 2021	13 100	sable & limon			400		500
Nevers (rive gauche)	2020	770	sable & limon					10
Blois	2021	1 430	sable & limon					
Ouzouer/Sully	2022 à 2023	910	limon	455				
Authion	2021 à 2023	8 100	limon	1 900			180	180
Total	2013 à 2023	32 560		5 995	385	1 400	645	690

1 Réalisation d'un 2nd écran sur un autre dont le mélange n'a pas permis la prise.

2 Écran avec Rc non conforme.

Nous constatons que les techniques DSM sans adaptation particulière ont pu être mise en œuvre dans 76 % du linéaire à renforcer par écran étanche en corps de digue. En effet, la technique sans adaptation n'a parfois pas pu être mise en œuvre avec certains sols à dominante limoneuse et argileuse. Suivant les cas rencontrés, cela peut s'expliquer par la nature des argiles et de leur capacité à adsorber l'eau, la présence importante de matières organiques ou d'une impossibilité de malaxage homogène (déstructuration incomplète du sol avec formation de boulettes d'argiles rendant le mélange sol-ciment localement hétérogène). Pour 19.5 % du linéaire, ces techniques se sont révélées convenir moyennant une adaptation : ajout de chaux dans la formulation (18,3 %) ou reprise de l'écran (1,2 %). Ainsi, les écrans étanches réalisés avec les techniques DSM (avec ou sans chaux) semblent aujourd'hui de bonne qualité pour 96 % du linéaire. Pour

4,3 % du linéaire d'écrans réalisés, les caractéristiques (le plus souvent la résistance mécanique) sont inférieures aux attentes et ont conduit à mettre en place un dispositif de suivi sur au moins 10 ans. L'écran dont les caractéristiques sont les plus préoccupantes est celui du système d'endiguement de Cisse-Vouvray dans la traversée de Veuves. Par ailleurs, pour presque 3,5 % du linéaire prévu initialement, la technique n'a pas été mise en œuvre : abandon ou autre technique mieux adaptée.

Retour d'expérience du suivi de l'écran de Veuves

L'exécution du chantier d'écran étanche par tranchée de sol mixé (VS) réalisé sur la commune de Veuves en 2014 a été présentée dans une précédente publication [2], annonçant la mise en place d'un suivi de l'évolution de l'écran à 10 ans compte tenu d'une imperméabilité et d'une résistance mécanique trop faibles mesurées en fin de chantier. Pour mémoire, ces moins bons résultats ont été en partie attribués dans cette publication à un défaut de dosage et de mise en œuvre du malaxage sans que cela puisse être démontré dans la mesure où il n'y avait pas eu d'enregistrement des paramètres de la machine (profondeur, vitesse d'avancement, débit de la pompe pour l'injection d'eau).

Ce suivi a été pris en charge par l'entreprise de travaux sous la forme de 2 protocoles. Le 1^{er} protocole consiste à réaliser des essais de perméabilité en forage fermé à charge constante dans l'écran et des essais de perméabilité en forage ouvert à charge variable dans le corps de digue (hors écran) comme montré dans la Figure 2. Ces essais sont reproduits sur 3 zones. Les résultats de ces mesures de perméabilité, réalisées entre -3 et -4 m sous la chaussée n'ont pas été concluants sur les 3 zones. L'une d'entre elles ne respecte pas les exigences attendues pour l'écran ($k < 1.10^{-8}$ m/s).



FIGURE 2. Essais pour comparaison dans l'écran a) et dans le corps de digue b)
(DREAL Centre-Val de Loire).

Le 2nd protocole avait pour but de suivre l'évolution de l'écran sur 10 ans, afin d'en vérifier la pérennité, par le biais de mesures de perméabilité Nasberg réalisées dans les réservations faites lors du premier protocole et accessibles par des bouches à clé comme illustré dans la Figure 3.



FIGURE 3. Mesures de perméabilité dans l'écran (DREAL Centre-Val de Loire).

À partir de la seconde année, si les perméabilités mesurées sont supérieures à celles de l'année précédente, le protocole prévoit de poursuivre les mesures à un rythme annuel. En revanche, si les perméabilités mesurées sont inférieures ou égales la fréquence passe à 2 ans.

Les résultats obtenus lors de la 1^{re} campagne de 2015 ont servi de « point zéro » dans l'analyse de l'évolution de la perméabilité de l'écran. Avant chaque essai, il convient de vérifier l'état des gravillons présent sur la hauteur de la lanterne sous le tubage. En cas d'éventuel colmatage, les gravillons sont aspirés puis remplacés par des gravillons propres. Une saturation préalable de chaque tube est effectuée la veille des essais par un remplissage en eau. L'essai débute après une mise à niveau de l'eau. Il est ainsi mesuré la vitesse d'infiltration de l'eau en mesurant la profondeur du niveau d'eau dans le tube en fonction du temps.

La figure 4 montre les résultats du suivi à 6 ans. La perméabilité de l'écran au cours du temps des deux zones conformes en 2015 (SD-R et SD-U) a augmenté la première année puis est restée relativement constante depuis 2016. La perméabilité de la zone SD-E a également augmenté la première année mais a tendance à diminuer depuis 2016 pour retrouver le niveau de 2015. Ainsi, deux zones sur les trois suivies ont des perméabilités de 1.10^{-7} m/s (non conformes aux exigences initiales).

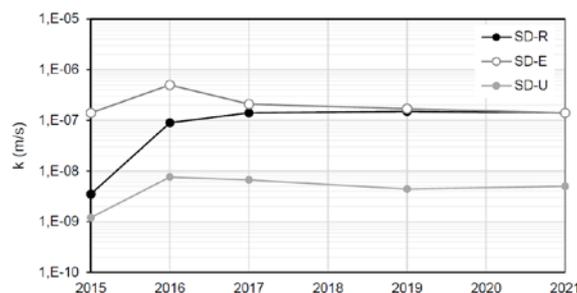


FIGURE 4. Mesures de perméabilité issues du protocole n°2 (DREAL Centre-Val de Loire).

La comparaison avec la perméabilité initiale du corps de digue mesurée à 5.10^{-7} m/s (hors zone urbaine R et E) semble confirmer que l'écran ($k < 10^{-7}$ m/s) améliore effectivement l'étanchéité de la digue, et cela d'autant plus qu'il a permis de traiter les hétérogénéités de la structure et

plusieurs réseaux abandonnés. Cependant, il semble désormais peu probable d'atteindre des perméabilités de l'ordre de 1.10^{-8} m/s d'ici 2025.

Retour d'expérience sur l'utilisation de la chaux en complément du ciment CEMIII/C 32,5 N

Comme évoqué précédemment, les adaptations de formulation de mélange sol-ciment ont conduit parfois à l'utilisation de chaux. Cette utilisation est justifiée en présence de sols dont la teneur en matière organique, mesurée par calcination, dépasse 3 %. L'un des exemples d'utilisation de la chaux est le chantier de réalisation d'écran étanche par tranchée de sol mixé qui a eu lieu à Sigloy en 2018. Un contrôle a été effectué par carottage puis essais de perméabilité et de résistance à la compression simple en laboratoire en 2021.

La Figure 5 présente les résultats du contrôle obtenus sur le matériau constitutif de l'écran étanche. Ses caractéristiques hydrauliques et mécaniques sont satisfaisantes et confirment la pertinence de la formulation retenue.

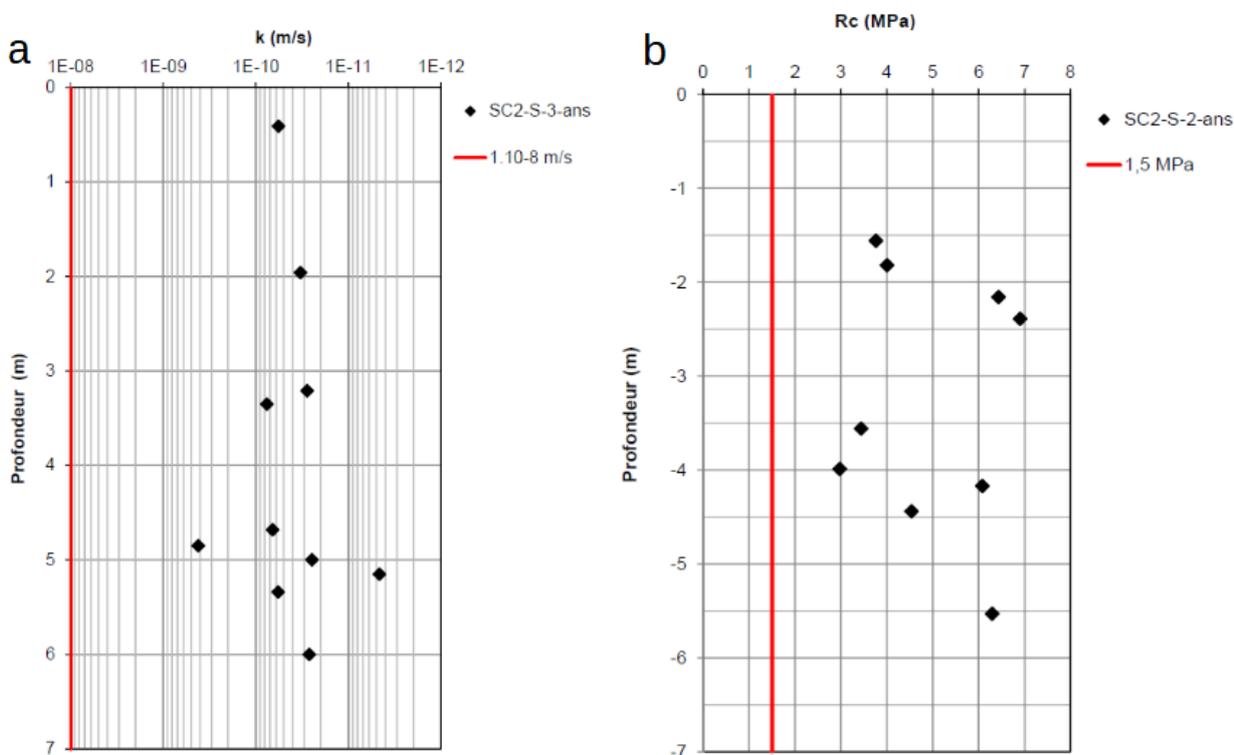


FIGURE 5. Perméabilités (a) et R_c (b) de l'écran de Sigloy à 3 ans.

3- L'instrumentation de la levée renforcée par écran étanche à Montlouis-sur-Loire

Afin d'améliorer la connaissance sur le comportement à long terme, des travaux de recherche sur la thématique « Vulnérabilité des digues de Loire au changement climatique » ont conduit à mettre en place une instrumentation lors de l'exécution de l'écran étanche du système d'endiguement de Tours à Montlouis-sur-Loire en 2017 illustrée par la Figure 6. Cette instrumentation permet de mesurer les évolutions de teneur en eau volumique et de température de l'écran (sondes TDR positionnées entre 1,5 et 5,5 m de profondeur dans l'écran), sur plusieurs

années, avec pour objectif d'évaluer la sensibilité du mélange sol-ciment aux variations de l'environnement et la pérennité de son comportement. Pour cette évaluation, une mesure de référence est également effectuée à 1 m de profondeur environ dans le corps de digue sablo-limoneux (teneur en eau volumique, température, succion). Par ailleurs, une station météorologique permet de suivre les variations de l'environnement extérieur, à partir de mesures de température et de pluviométrie, et 2 piézomètres sont implantés pour suivre les variations de niveaux d'eau dans le sol de fondation de la levée.

L'instrumentation n'a pas vocation à évaluer les variations de perméabilité et de résistance à la compression simple de l'écran. Pour mesurer ces paramètres, un suivi ponctuel par des sondages destructifs peut-être envisagé (mesure de perméabilité in situ de type essai Nasberg, sondage carotté pour prélèvement d'échantillon intact et mesure de résistance à la compression simple et de perméabilité en laboratoire), tel que cela a été présenté dans le paragraphe précédent.

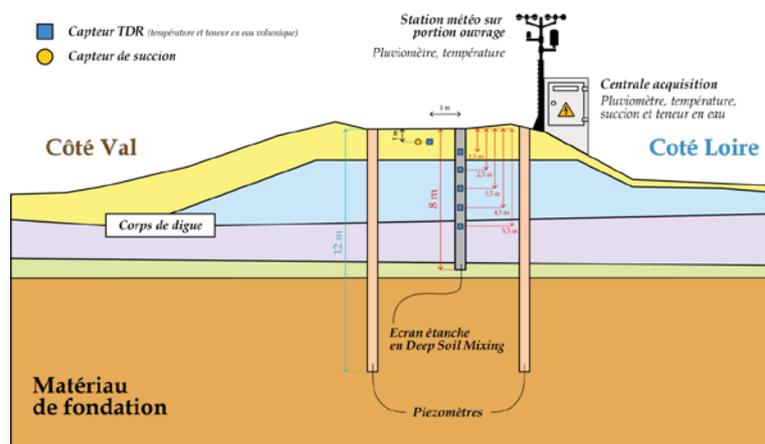


FIGURE 6. Schéma de l'instrumentation (coupe transversale).

La Figure 7 présente l'évolution de la teneur en eau massique dans l'écran et dans le corps de digue. Une légère diminution de la teneur en eau est observée dans l'écran au cours du temps (Figure 7a). L'évolution de la teneur en eau dans le corps de digue montre une bonne corrélation avec la pluviométrie (Figure 7b).

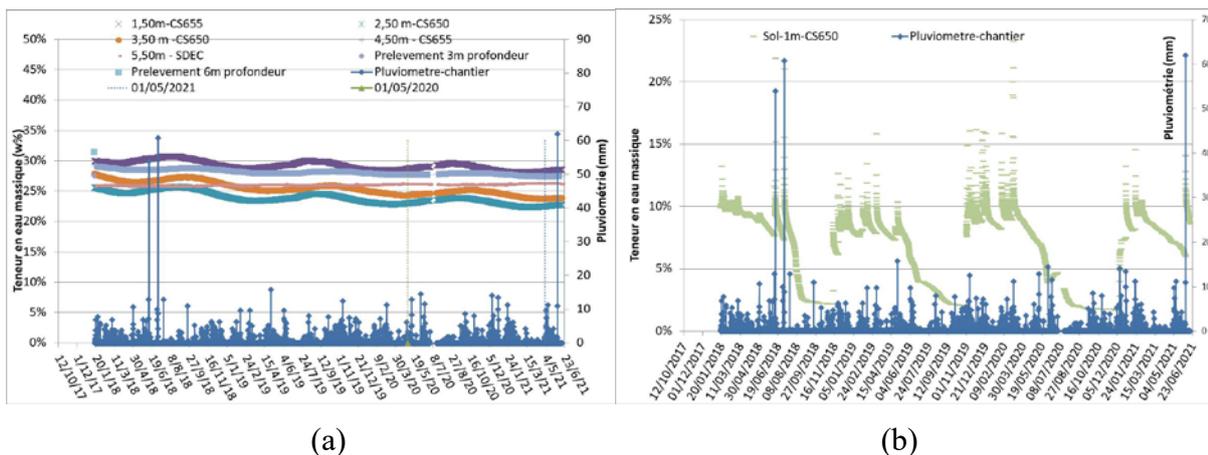


FIGURE 7. Pluviométrie sur le site et évolution de la teneur en eau massique (a) dans l'écran et (b) à 1 m de profondeur dans le corps de digue en fonction du temps.

La teneur en eau de l'écran est assez élevée (25-30 %). Les variations de teneur en eau sont d'autant plus importantes que la mesure est proche de la surface. À 5,50 m de profondeur, les variations de teneur en eau deviennent très faibles.

La Figure 8a présente les variations de température dans l'écran. La Figure 8b présente l'évolution de la succion et de la teneur en eau dans le corps de digue.

Les variations de température montrent les mêmes particularités que celles de teneurs en eau. La variation de température est d'autant plus importante que la mesure est proche de la surface. En surface, il semble que l'écran subit les mêmes variations de température que le corps de digue.

L'écran étanche et le corps de digue subissent des cycles d'humidification-séchage dont l'intensité varie selon les saisons. La succion dans le corps de digue est supérieure à 200 kPa entre août et novembre 2018. Elle est plus faible entre la mi-mai et début août.

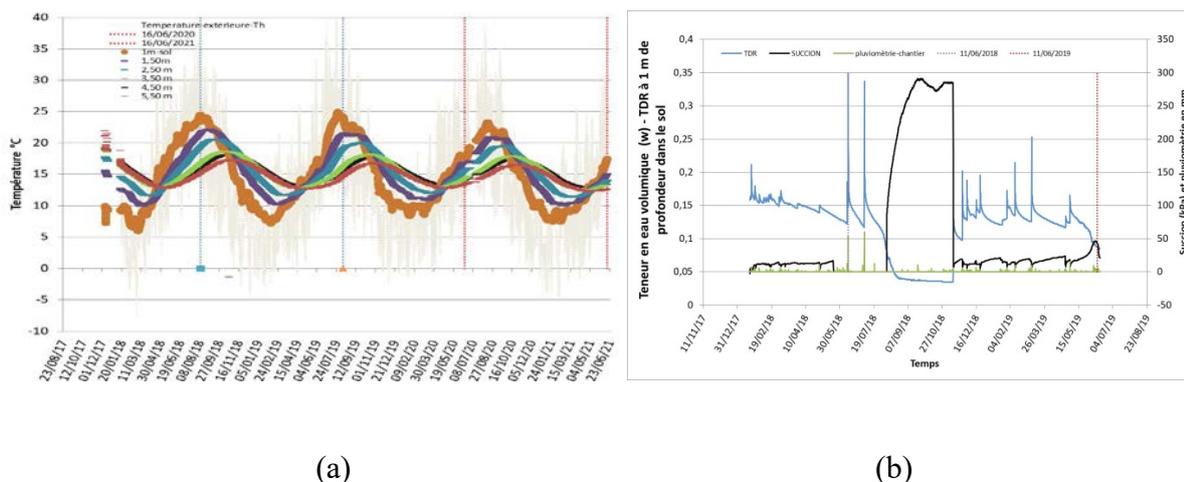


FIGURE 8. (a) Température dans l'écran et (b) succion à 1 m de profondeur dans le corps de digue sur une période d'un an.

Ces observations peuvent servir de référence pour une campagne d'essais en laboratoire intégrant de cycles de vieillissement de matériaux par humidification-séchage ou pour des modèles hygrothermomécaniques dans le but d'établir des modèles de comportement proches des cas réels.

Conclusions et perspectives

Les écrans étanches DSM réalisés dans le cadre de chantiers expérimentaux de la levée d'Orléans en 2013 présentent un bon comportement dans le temps avec des caractéristiques hydrauliques et mécaniques satisfaisantes au terme de 10 ans. Les chantiers de plus grande ampleur conduits sur la même période par la DREAL Centre-Val de Loire ont montré que cette technique s'adapte bien à des structures de levées différentes dans la majorité des cas rencontrés. Cependant la connaissance des sols et de la nappe d'accompagnement du fleuve sont essentiels pour sa mise en œuvre. La réalisation d'un test grandeur nature est aussi nécessaire pour valider la technique au démarrage du chantier ainsi que des contrôles réguliers des caractéristiques de l'écran pendant sa construction (prélèvements pour R_c et perméabilité). Le retour d'expérience de ces chantiers alimente le guide technique pour la réparation des digues publié par le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) [3].

Dans certains cas, les investigations complémentaires peuvent conduire à préconiser une autre technique (5 % en linéaire étudié). Sur quelques tronçons, les défauts de performance de l'écran ont conduit à mettre en place un suivi dans le temps. Les résultats du suivi sur le chantier de Veuves par exemple montrent que la perméabilité de l'écran semble s'être stabilisée sans amélioration prévisible.

Enfin, l'instrumentation d'un écran DSM Montlouis-sur-Loire dans le cadre de travaux de recherche sur la thématique « Vulnérabilité des digues de Loire au changement climatique » ouvre des perspectives sur la connaissance du comportement à long terme de ce type de structure.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tous les acteurs qui ont contribué à l'étude et au suivi de ces écrans DSM ainsi que les entreprises qui les ont construits : Solétanche Bachy, Vinci Construction Terrassement, Botte Fondation, et Keller.

Références

- [1] Patouillard S., Auger N., Maurin J. (2013). Les renforcements de digues en Loire moyenne, mise en perspective des techniques et expérimentation, Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions – 2e colloque national, 2013, Hermès Lavoisier, pp. 706-710.
- [2] 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 », Dignes Maritimes et Fluviales de Protection contre les Inondations – 3e colloque national, Aix-en-Provence, 2019.
- [3] CFBR (2021). Recueil de méthodes et de techniques de confortement et réparation des digues de protection en remblai - Partie II. ISBN : 979-10-96371-17-4.