

# Retour d'expérience sur les renforcements des levées de Loire en « deep soil mixing »

## *Deep soil mixing feedback in Loire levees*

Sébastien Patouillard<sup>1</sup>, Lucile Saussaye<sup>2</sup>, Edouard Durand<sup>2</sup>, Nathalie Manceau<sup>1</sup>, Alain Le Kouby<sup>3</sup>,  
Arthur Coulet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr,  
nathalie.manceau@developpement-durable.gouv.fr & arthur.coulet@developpement-durable.gouv.fr

<sup>2</sup> Cerema, Blois, lucile.saussaye@cerema.fr & edouard.durand@cerema.fr

<sup>3</sup> Ifsttar, Champs-sur-Marne, alain.lekouby@ifsttar.fr

### Résumé

Lors du colloque national « Dignes 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<sup>e</sup> siècle, ainsi que les perspectives attendues des chantiers expérimentaux d'écrans étanches réalisés en comparant plusieurs techniques de « soil mixing » (2012-2013). L'évaluation de ces techniques devait permettre de proposer des solutions moins coûteuses et plus adaptées dans le cadre des travaux de fiabilisation des levées de la Loire moyenne.

À la suite des chantiers expérimentaux, la DREAL Centre-Val de Loire a conçu des projets d'écrans étanches par tranchée de sol mixé dans des digues de plusieurs kilomètres : à Veuves (tronçon de 1 km), à Tours (10 km) et à Orléans (7 km). Ces ouvrages se sont avérés différents dans la lithologie de leur structure et de leur fondation. Ainsi, 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 celle des circulations naturelles de la nappe alluviale dans les couches perméables du sous-sol.

L'objet du présent article est de présenter un état des connaissances sur la base des résultats à 4 ans du suivi expérimental (pérennité, rendement, contraintes de mise en œuvre et moyens de contrôle) et du retour d'expérience sur les chantiers de plus grande ampleur qui ont permis d'adapter la technique : ciment ou chaux-ciment, apport en eau, critères de malaxage. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives d'application de la technique pour restaurer l'étanchéité de digues anciennes en terre en fonction des sols rencontrés.

### Mots-Clés

Digue, étanchéité, soil mixing, chaux, ciment

### Abstract

During the last national symposium "Dignes 2013", DREAL Centre-Val de Loire presented different techniques used to reinforce Loire levees since the middle of the XX<sup>th</sup> century and especially "deep soil mixing" experiments beginning. These cut-off walls techniques had to be tested and evaluated to know if they could be used as a cheapest but still efficient solution.

After the first tests, DREAL Centre-Loire performed longer deep soil mixing cutoff-walls in Loire levees: Veuves (1 km long), Tours (10 km) and Orleans (7 km). These projects allowed the engineers to improve conception standards using soils and undersoil water circulation knowledge.

This article presents the state of the art based on deep soil mixing tests results (five years to check durability, engine performance, conception and building) and on larger levees works feedback which allowed to experiment different lime-cement formulations, water adding and mixing speed. These results could be applied to fix old ground levees depending on soil geology.

### Key Words

Levee, impermeability, soil mixing, lime, cement

## Introduction

Les digues ou levées de la Loire Moyenne assurent une protection contre l'inondation de la plaine alluviale en formant de grands systèmes d'endiguement totalisant près de 600 km d'ouvrages.

Lors du colloque national « Dignes 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<sup>e</sup> siècle, ainsi que la mise en œuvre de chantiers expérimentaux d'écrans étanches pour comparer plusieurs techniques de mélange des sols en place avec un liant hydraulique [5].

L'objet du présent article est de présenter un état des connaissances sur la base des résultats à 4 ans du suivi expérimental (pérennité, rendement, contraintes de mise en œuvre et moyens de contrôle) et du retour d'expérience sur les chantiers de plus grande ampleur qui ont permis d'adapter la technique.

### 1- Comparaison des techniques de mélange en place

Malgré un corpus normatif relativement léger, les techniques de mélange en place sont de plus en plus proposées pour renforcer l'étanchéité d'une digue et de sa fondation. Le mélange en place, « soil mixing », consiste à désagréger le sol en place, le plus souvent à l'aide d'un outil de malaxage (lames spécifiques, tarières, tambours rotatifs...) et à introduire un liant qui est mélangé avec le sol afin d'en améliorer certaines caractéristiques.

Pour les digues de la Loire, cinq techniques de réalisation d'écrans étanches ont été sélectionnées :

- colonnes sécantes
- panneaux sécants
- jet haute pression (jet grouting ou équivalent)
- tranchée de sol mixé par voie sèche (VS)
- tranchée de sol mixé par voie humide (VH)

Le traitement est qualifié VH (voie humide) lorsque le mélange se fait au moyen de procédés permettant l'injection d'un coulis (liant hydraulique et eau) via l'outil de malaxage et VS (voie sèche) lorsque le liant est introduit sous forme pulvérulente, l'eau nécessaire étant ajoutée via l'outil de malaxage.

Ces techniques ont été caractérisées et comparées entre elles [1] à partir des retours d'expérience sur les chantiers réalisés en Europe depuis les années 2000. Une synthèse de cette comparaison est proposée dans le tableau 1.

Comparées aux écrans étanches en palplanches métalliques ou parois moulées, ces techniques semblent présenter des avantages en termes de réutilisation de matériaux, d'homogénéité de la structure, de rendement et de coût. Néanmoins, elles soulèvent aussi des questions sur leur efficacité dans le temps et leur adéquation avec tous les types de sols.

TABLEAU 1 : AIDE AU CHOIX « SOIL MIXING »

	Tranchée sol mixé voie sèche	Tranchée sol mixé v. humide	Colonnes sécantes	Panneaux sécants	Jet Grouting
Perméabilité	1,10-8 m/s ou moins	1,10-8 m/s ou moins			
Profondeur atteinte / Largeur d'écran	jusqu'à 10 m / 50 cm min	jusqu'à 10 m / 50 cm min	15 à 40 m / 60 à 80 cm	30 m max / 50 à 80 cm	35 à 50 m / 80 à 300 cm
Rendement / vitesse d'avancement	140 m <sup>2</sup> /h (écran de 7 m de haut) / limitée à 20 m/h pour malaxage optimum	160 m <sup>2</sup> /h	15 à 40 m <sup>2</sup> /h	11 à 25 m <sup>2</sup> /h	nc
Vibrations	0,02 à 1,2 mm/s - 70 Hz max ; sans risque pour le bâti et ouvrage d'art	faibles comparées à la mise en œuvre de palplanches (battage et vibrofonçage)			
Coût €/m <sup>2</sup>	140 à 215	150	160 à 340	220 à 430	370 à 600

Sur les grands linéaires de digues de la Loire (de 1 à 10 kilomètres), la technique de tranchée de sol mixé a paru la mieux adaptée. En effet, elle permet d'améliorer l'étanchéité de la digue et de sa fondation en garantissant une continuité d'écran dans la mise en œuvre. La profondeur limitée à 10 m est souvent suffisante puisque l'intervention sur plusieurs kilomètres impose de laisser en fondation une couche perméable au-dessus du substratum pour permettre les circulations de la nappe alluviale entre le lit majeur protégé et le fleuve. Les valeurs des principales caractéristiques qui peuvent être attendues sur cette technique sont précisées dans le tableau 2.

TABLEAU 2 : CARACTÉRISTIQUES ATTENDUES (EXPÉRIENCE DE CHANTIERS)

	Tranchée de sol mixé par voie humide	Tranchée de sol mixé par voie sèche
Étanchéité	perméabilité à 28 jours ( $k_{28}$ ) $\leq 1,10^{-8}$ m/s	perméabilité à 28 jours ( $k_{28}$ ) $\leq 1,10^{-8}$ m/s
Résistance mécanique	compression simple à 28j ( $R_{c28}$ ) $\geq 1,5$ MPa	compression simple 28j ( $R_{c28}$ ) $\geq 1,5$ MPa
Profondeur	Max 10 m	Max 10 m
Structure	mélange homogène	
Pérennité	durée de 50 à 100 ans	

La fonction principale de l'écran est d'améliorer l'étanchéité du corps de digue et il n'est pas nécessaire d'exiger une résistance mécanique très importante. Cette résistance constitue

un paramètre de la tenue dans le temps (limitation des fissurations ou tassements ultérieurs). De plus, le choix s'est porté sur des écrans suffisamment larges pour assurer leur tenue à long terme en cas de déformation ou d'altération de la digue (au moins 30 cm de largeur pour des nécessités de mise en œuvre). Si l'écran étanche est réalisé dans une route positionnée en crête de la digue et qu'il doit supporter des charges de trafic routier, des essais de portance sont fortement recommandés avant la reconstitution du corps de chaussée. Les essais de contrôle sur ses performances mécaniques et hydrauliques peuvent être faits in situ et en laboratoire.

## 2- Chantiers expérimentaux de la levée d'Orléans

### Présentation

En 2012 et 2013, la DREAL Centre-Val de Loire a dirigé des chantiers expérimentaux utilisant les deux techniques de mélange en place par tranchée de sol mixé (VH et VS) afin d'évaluer leurs performances dans la prévention de l'érosion interne et notamment leur pérennité à moyen et long terme. L'entreprise Soletanche Bachy ainsi que plusieurs organismes de recherche (Cerema, Ifsttar, Irstea et BRGM) ont été associés à cette expérimentation. Ces chantiers ont été menés sur deux tronçons de la levée d'Orléans – communes de Guilly et de Sigloy - qui ne pouvaient pas être renforcés par épaissement en raison de la proximité du fleuve d'un côté et d'une ou plusieurs maisons encadrée(s) dans l'ouvrage de l'autre côté.

### Résultats du suivi à 4 ans

Les écrans des deux chantiers font l'objet d'un protocole de suivi à long terme avec aujourd'hui les résultats à 4 ans [3].

À Sigloy, un écran (VH) de 111 m de long et de 6 m de profondeur a été réalisé dans un corps de digue argilo-sableux avec des sols de fondations d'alluvions sableuses et graveleuses reposant sur des argiles gris-bleu à verdâtres (Tableau 3). Le substratum calcaire est présent à plus de 10 m de profondeur.

À Maison Vieille – lieu-dit de Guilly -, un écran (VS) de 126 m de long et de 8 m de profondeur a été réalisé dans un corps de digue limono-sableux avec des sols de fondations en alluvions d'abord limoneuses puis sablo-graveleuses reposant sur des argiles verdâtres (Tableau 4). Le substratum calcaire est présent à plus de 10 m de profondeur.

Entre 0 et 2 ans, le suivi (sondages carottés et essais de perméabilité en place) a été mené dans la zone de convenance, destinée aux essais mais aussi zone de calage des paramètres de la machine. À 4 ans, il a été décidé de réaliser le suivi au droit de la zone de production. Les investigations ont montré que le mélange, de couleur gris verdâtre à gris bleuté, caractéristique de matériaux cimentaires, était globalement homogène, malgré la présence de graves. Le mélange de Maison Vieille semble moins cohésif et résistant qu'à Sigloy, au vu des enregistrements des paramètres de foration et des mesures en laboratoire. Toutefois, les essais d'érosion de conduit en laboratoire (HET) ont montré que l'écran de Maison Vieille n'était pas érodable.

TABLEAU 3 : CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCRAN EXPÉRIMENTAL DE SIGLOY (VOIE HUMIDE)

Temps de cure	1 an	2 ans	4 ans
Zone	Convenance		Production
Dosage en ciment C (kg/m <sup>3</sup> de sol)	234	272	243
Rapport C/E	0,33	0,36	0,29
k in situ (m/s)	6.10 <sup>-9</sup> -3.10 <sup>-8</sup>	3.10 <sup>-10</sup> -2.10 <sup>-9</sup>	7.10 <sup>-9</sup> -2.10 <sup>-8</sup>
k en laboratoire (m/s)	1,4.10 <sup>-9</sup>	-	0,1-2,3.10 <sup>-10</sup>
R <sub>c</sub> (MPa)	3,0-6,5 R <sub>c</sub> moy = 4,7 (13 val.)	1,5-10,7 R <sub>c</sub> moy = 6,5 (18 val.)	2,2-4,0 R <sub>c</sub> moy = 2,9 (5 val.)
w (%)	-	18,2-42,3 w moy = 28,0 (32 val.)	32,8-40,4 w moy = 36,0 (5 val.)
pH	-	8,6-9,0 pH moy = 8,7 (32 val.)	8,6-11,6 pH moy = 10,2 (17 val.)

TABLEAU 4 : CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCRAN EXPÉRIMENTAL DE GUILLY, LIEU-DIT MAISON VIEILLE (VOIE SÈCHE)

Temps de cure	1 an	2 ans	4 ans
Zone	Convenance		Production
Dosage en ciment C (kg/m <sup>3</sup> de sol)	222	220	220
Rapport C/E	0,23	0,24	0,31
k in situ (m/s)	6.10 <sup>-8</sup>	1.10 <sup>-9</sup>	5.10 <sup>-10</sup> -5.10 <sup>-9</sup>
k en laboratoire (m/s)	1,5.10 <sup>-7</sup>	1,0.10 <sup>-9</sup> - 3,0.10 <sup>-9</sup>	1,2-2,3.10 <sup>-10</sup>
R <sub>c</sub> (MPa)	0,53-0,84 R <sub>c</sub> moy = 0,70 (3 val.)	0,30-4,4 R <sub>c</sub> moy = 2,2 (13 val.)	0,28-2,5 R <sub>c</sub> moy = 1,2 (8 val.)
w (%)	-	24,0-39,0 w moy = 31,2 (32 val.)	24,9-32,9 w moy = 28,5 (8 val.)
pH	-	8,6-9,0 pH moy = 8,9 (32 val.)	9,1-9,6 pH moy = 9,3 (14 val.)

D'autres travaux de recherche ont été testés pour le suivi des performances obtenues sur le mélange in situ et sur des mélanges préparés en laboratoire : notamment une tentative de suivi à 2 ans par méthodes géophysiques avec Tomographie de Résistivité Électrique (TRE) qui n'a pas abouti en raison de la géométrie élargie de l'écran non détectable en profondeur. Sur la figure 1, l'évolution de la résistance mécanique (R<sub>c</sub>) est tracée en fonction de la profondeur. Les valeurs obtenues avec

la méthode VH sont effectivement supérieures à celles de la méthode VS pour deux zones où les matériaux naturels sont un peu différents. Une certaine disparité est observée entre les valeurs pour chacune des méthodes.

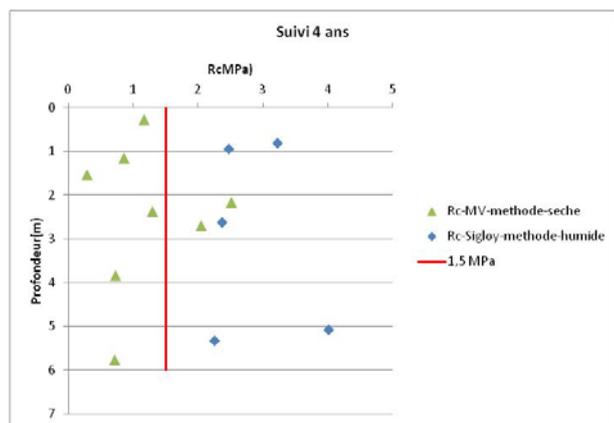


FIGURE 1 : ÉVOLUTION DE LA RÉSISTANCE A 4 ANS



FIGURE 2 : ÉCHANTILLONS MÉTHODE VS - MÉTHODE VH

Une autre explication avancée est que la texture du matériau issu de la méthode VS semble plus friable que la texture du matériau obtenu par la méthode VH (Figure 2).

TABLEAU 5 : PERMÉABILITÉ MESURÉE EN LABORATOIRE A 4 ANS EN FONCTION DE LA PROFONDEUR

Profondeur (m)	Perméabilité (m/s)	
	Maison Vieille (VS)	Sigloy (VH)
1,31		2,3.10 <sup>-10</sup>
4,48	2,31.10 <sup>-10</sup>	
4,65		0,331.10 <sup>-10</sup>
5,56	2,19.10 <sup>-10</sup>	
5,66		0,10.10 <sup>-10</sup>
5,97	1,19.10 <sup>-10</sup>	

De même, en ce qui concerne la perméabilité, des différences sont observées entre les deux méthodes surtout en profondeur. En effet, il semble qu'il y ait peu de variation de la perméabilité en fonction de la profondeur pour la méthode VS

alors que la perméabilité diminue avec la profondeur pour la méthode VH (Tableau 5).

### 3- Retour d'expérience sur les digues de Loire

À la suite des chantiers expérimentaux, la DREAL Centre-Val de Loire a conçu des projets d'écrans étanches par tranchée de sol mixé dans des tronçons de digues de plusieurs kilomètres : à Veuves (tronçon de 1 km), à Tours (10 km) et à Orléans (7 km). Ces opérations ont conduit à faire évoluer les approches de conception et de réalisation en exploitant au mieux la connaissance des sols (de la digue et de ses fondations) et des couches perméables du sous-sol permettant la circulation naturelle de la nappe alluviale.

#### Veuves

La levée du val de Cisse-Vouvray s'étend sur 45 km en rive droite de la Loire, sur les départements de Loir-et-Cher et d'Indre-et-Loire. Elle protège d'importants enjeux (environ 10 000 habitants) répartis sur 13 communes. Le secteur de Veuves présentait une grande sensibilité au risque d'érosion interne d'après l'étude de dangers de la levée de Cisse-Vouvray [2] du fait de la présence de maisons encastrées, de canalisations traversantes et d'arbres en pied de levée côté val. Le traitement de l'étanchéité a consisté à réaliser un écran (VS) dans le corps de digue sur toute la traversée du bourg de Veuves (1 km) en 2014. Cet ouvrage a également permis de relier les renforcements existants (datant des années 1980) côté val, constitués par une recharge de talus avec filtre drainant. La levée supporte la RD952 où le trafic est de 7 000 véhicules/jour et qui est un axe important pour les transports exceptionnels. La configuration du site a conduit à implanter l'écran dans l'axe de la demi-chaussée côté Loire.

Un retour d'expérience pour la préparation de ce premier chantier montre l'importance de mener une concertation très en amont des travaux avec les différents gestionnaires impactés (routes, réseaux, collectivités), afin de fixer les modalités possibles d'intervention en phase travaux :

- trouver la période la plus propice à une interruption de la circulation et définir le circuit de déviation des usagers de la route et des transports exceptionnels ;
- prévoir les coupures de réseaux et les incidences auprès des abonnés, ou demander les dérogations temporaires réglementaires.

Une planche d'essai a été réalisée afin de déterminer si la méthodologie proposée par l'entreprise était satisfaisante pour le suivi de la réalisation de l'écran et le maintien de la propreté du chantier. Cependant, l'absence d'enregistrement de paramètres machine (profondeur, vitesse d'avancement, débit de la pompe donc volume d'eau injecté) a conduit à une mauvaise visibilité des conditions de réalisation de l'écran. Le relevé de ces paramètres reposait entièrement sur les opérateurs et cela n'est pas apparu comme suffisant. De plus, pour le contrôle des travaux, l'outil de prélèvement du matériau traité (système de préleveur à piston) n'était pas fiable du fait de sa

souplesse et de son diamètre trop petit. Ainsi, la quantité prélevée a été insuffisante pour faire les essais en laboratoire.

Les perméabilités mesurées en laboratoire (4 profils, 3 profondeurs) étaient supérieures à  $1.10^{-8}$  m/s à 28 jours (figure 2) et n'étaient donc pas conformes aux prescriptions. Les résistances mécaniques étaient également inférieures à 1,5 MPa sur 5 profils à 28 jours et conduisaient à douter de la tenue dans le temps de l'ouvrage.

Dans ce contexte, l'entreprise a pris à sa charge un suivi de l'évolution de l'écran sur 10 ans (essais d'eau en forage Ø de 116 mm au niveau de 3 profils). Les résultats, obtenus sur le terrain à ce jour, donnent une perméabilité inférieure à  $1.10^{-8}$  m/s, ce qui laisse présager une évolution favorable de l'ouvrage dans le temps, mais pose la question de la représentativité des essais en laboratoires à 28 jours réalisés en phase chantier.

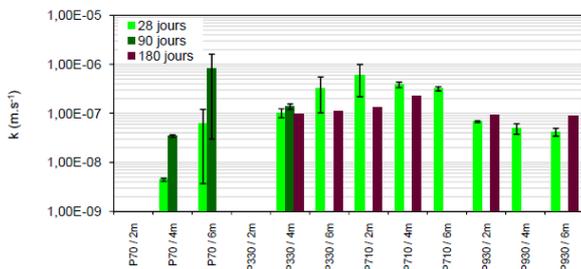


FIGURE 2 : PERFORMANCES HYDRAULIQUES DE L'ECRAN DE VEUVES ENTRE 28 ET 180 JOURS

Ce chantier a aussi permis de mettre en place un protocole efficace pour maintenir le site propre et éviter tout dommage aux habitations et aux réseaux d'eau pluviale (figure 3).



FIGURE 3 : DISPOSITIF POUR LE MAINTIEN DE LA PROPRETE

Enfin, un dispositif pour le suivi des vibrations générées par la machine a été testé (figure 4). Il a permis de montrer que cette technique ne générait quasiment pas de vibration (celles observées sont en limite du seuil détectable par les outils de mesure).



FIGURE 4 : DISPOSITIF DE SUIVI DES VIBRATIONS

Cette technique de traitement de l'étanchéité permet donc de réaliser des travaux en milieu urbanisé en minimisant les risques de dommage au bâti (figure 5).



FIGURE 5 : PROXIMITE DU BATI

### Tours

La levée de Tours Loire amont s'étend sur près de 10 km entre Montlouis-sur-Loire et l'amont de Tours. Elle constitue la première ligne de défense du val de Tours (135 000 personnes) contre les inondations. Cette digue présentait un risque de formation de brèche en cas de crue par érosion interne souligné dans l'étude de dangers des levées du val de Tours [4] qui préconisait de refaire l'étanchéité sur toute sa longueur. Le traitement de l'étanchéité de la digue a été réalisé en 4 phases, entre 2014 et 2019. Chacune de ces phases représente une longueur de digue de 2 à 4 km, en partie sous la route départementale RD751 dont le trafic quotidien est d'environ 12 000 véhicules.

Un retour d'expérience sur la conception, la mise en œuvre et le contrôle de cette opération a fait l'objet d'une publication CFBR en 2018 [6]. Il présente l'intérêt de disposer d'une étude approfondie des sols de la digue et de ses fondations, pour adapter le dimensionnement et la technique avec :

- le prolongement de l'étanchéité dans la partie superficielle du sol d'assise de 1,50 à 2,00 m minimum pour réduire l'érosion de contact entre la levée et sa fondation et pour traiter les éventuelles hétérogénéités (conduits racinaires, canalisations abandonnées ou préalablement traitées, anciennes infiltrations...);
- la limitation de la profondeur de l'écran pour ne pas entraver les mouvements naturels de la nappe dans les

couches perméables du sous-sol ;

- la recherche d'une couverture minimum entre 2 couches de perméabilités très différentes afin d'éviter de concentrer les écoulements au point d'interface ;
- l'implantation préférentielle du pied d'écran dans la couche la moins perméable possible ;
- la vérification au niveau du pied de digue côté val des gradients hydrauliques pour le critère d'érosion interne, faite sur plusieurs profils en travers par modélisation numérique du réseau d'écoulement ;
- la sélection d'un liant hydraulique adapté aux sols et la définition des dosages dans une étude de formulation testée en laboratoire.

Au cours de la réalisation de l'écran, ces paramètres ont été ajustés aux conditions du site, afin, notamment, d'assurer le bon fonctionnement de l'engin de malaxage. L'expérience des premiers travaux a conduit à mettre en place un laboratoire de chantier pour systématiser les contrôles de la qualité de l'écran (tous les 100 ou 200 m) pendant l'exécution des travaux. Les conditions spécifiques du site de la Levée de Tours Loire amont, notamment la présence d'une route en crête de digue, ont conduit à adapter le chantier pour restituer la route à la circulation le plus rapidement possible.

Le traitement des réseaux a également fait l'objet d'une attention particulière sur cette opération. Pour la réalisation de l'écran, la dépose préalable des réseaux est indispensable, ce qui nécessite une bonne anticipation de l'opération avec leurs gestionnaires. Ceux-ci doivent pouvoir organiser des coupures sur plusieurs jours ou réaliser des dévoiements provisoires (bypass, mise en aérien...), avec un rétablissement après 2 jours de temps de cure de l'écran. Enfin, pour les réseaux traversants ne pouvant pas être supprimés, des dispositifs assurant la continuité d'étanchéité entre les réseaux et l'écran ont été mis en œuvre.

Dans le cas de canalisations béton (figure 6), l'étanchéité peut être obtenue via la liaison béton-béton. Une fenêtre est ouverte dans l'écran pour repositionner le réseau, puis un massif de béton non essorable est coulé entre l'écran et la canalisation.



FIGURE 6 : PASSAGE DE CANALISATION BÉTON

Cette méthode a l'avantage d'être simple à mettre en œuvre, et ne présente pas de risque de défaut d'exécution qui remettrait en cause l'étanchéité de la digue. En revanche, elle lie définitivement un élément de la canalisation avec l'écran et ne

permet pas d'intervention ultérieure sur cet élément. Elle a été utilisée exclusivement pour les canalisations d'eaux pluviales.

Sur une canalisation de rejet d'une station d'épuration, un dispositif de type « passe tube » ou joint annulaire a été utilisé (figure 7). Après réalisation de l'écran étanche avec un temps de cure suffisant pour qu'il atteigne une résistance mécanique satisfaisante, un carottage est réalisé dans l'écran. Un élément de canalisation est mis en place dans ce carottage, avec un joint annulaire, qui, par serrage des boulons latéraux, comprime un joint caoutchouc pour obtenir l'étanchéité entre la canalisation et l'écran. Ce dispositif offre plus de souplesse pour le gestionnaire de réseau en cas de besoin d'intervention ultérieure, mais présente quelques inconvénients de mise en œuvre. La réalisation du carottage doit être de bonne dimension et le serrage du joint suffisant, ce qui nécessite une attention particulière lorsque les opérateurs sont peu habitués à ce genre de dispositif.

Cette technique a été utilisée pour une canalisation qui a été déviée de quelques mètres, de sorte à réaliser le carottage dans un écran âgé d'un an. Dans un écran de quelques jours, il n'est pas certain que la résistance soit suffisante pour mettre en œuvre le joint annulaire.



FIGURE 7 : PASSAGE DE CANALISATION AVEC JOINT ANNULAIRE

Pour le passage de câbles ou de canalisations de petites dimensions, un dispositif dit « passe-câble » a été utilisé (figure 8). Là encore c'est un joint caoutchouc qui, par serrage, assure l'étanchéité, mais, cette fois-ci, entre une pièce fixe et le réseau.

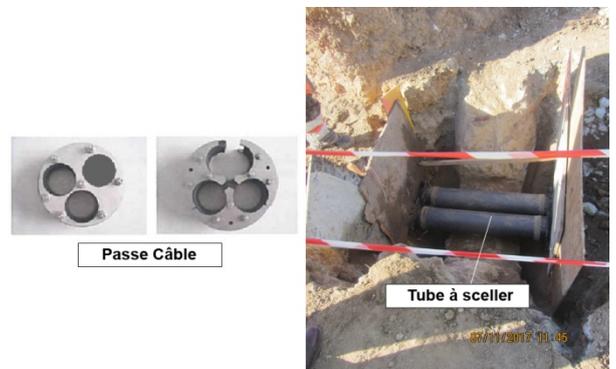


FIGURE 8 : PASSAGE DE CABLES

Après réalisation et durcissement de l'écran, une fenêtre est ouverte pour sceller la pièce fixe, composée d'un tube traité en surface pour assurer la bonne adhérence avec le béton coulé autour. Elle peut ensuite accueillir plusieurs réseaux. Les dispositifs passe-câbles assurent l'étanchéité aux deux extrémités du tube.

Pour le cas de la suppression d'une canalisation située à 7 m de profondeur sous la crête de digue, il a été décidé de ne pas procéder au retrait total de la canalisation car cela aurait nécessité d'ouvrir l'ouvrage au niveau de ses fondations, avec le risque de les déstructurer. Un puits blindé a été ouvert, permettant d'atteindre la canalisation, de la couper sur 2 m de long et procéder à l'obturation des tronçons laissés en place (figure 9). Le puits a ensuite été remblayé avant la réalisation de l'écran étanche sur une profondeur de 8 m.

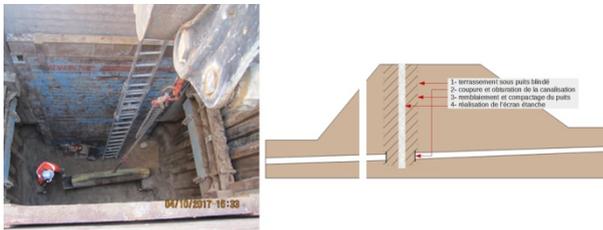


FIGURE 9 : COUPURE D'UNE CANALISATION PROFONDE

La question de la continuité de l'écran s'est également posée pour le passage des ponts. Le pont routier de la RD142 à Montlouis-sur-Loire passe au-dessus de la digue de Tours Loire amont et les poutres de ce pont se situent à 1 m au-dessus de la crête de digue limitant l'intervention des engins de chantier classiques. Pour réaliser la continuité de l'écran étanche sous le pont, il a été décidé d'excaver la digue sur une hauteur de 3,50 m puis de monter une paroi en bentonite ciment par niveaux (figure 10).

La formulation du mélange bentonite-ciment a été testée pour assurer une perméabilité de la paroi inférieure à  $10^{-8}$  m/s. Le mélange est produit en centrale puis acheminé sur le chantier où il est directement mis en œuvre. Après avoir excavé la digue sur 3,50 m de hauteur, une tranchée est ouverte sur 2,00 m de profondeur pour atteindre la profondeur d'écran souhaitée à 5,50 m sous la crête de digue. Le mélange bentonite-ciment y est coulé, puis un premier temps de cure de 3 jours est observé avant toute nouvelle intervention.

La reconstitution de la digue s'est ensuite déroulée par paliers. Après la prise et le durcissement d'un niveau de paroi bentonite-ciment, la fosse excavée est remblayée en réemployant les matériaux de la digue (de classe GTR B5m) compactés par couches de 15 cm. Une fois un palier d'environ 2 m de remblai réalisé, une nouvelle tranchée est creusée pour atteindre le niveau de paroi bentonite-ciment inférieur et y couler un nouveau niveau de paroi. Ici, la paroi bentonite ciment est coulée sur trois niveaux (-5,50 m / -3,50 m / -1,70 m) et la reconstitution du remblai est réalisée en deux

étapes.

Des indentations sont prévues pour assurer la continuité entre les différents niveaux de paroi bentonite-ciment et avec l'écran en tranchée de sol mixé déjà réalisé de part et d'autre. Celles-ci sont obtenues via le raclage des extrémités de l'écran et via la pose de bastaings retirés avant coulage d'un nouveau niveau dans la paroi de bentonite-ciment.

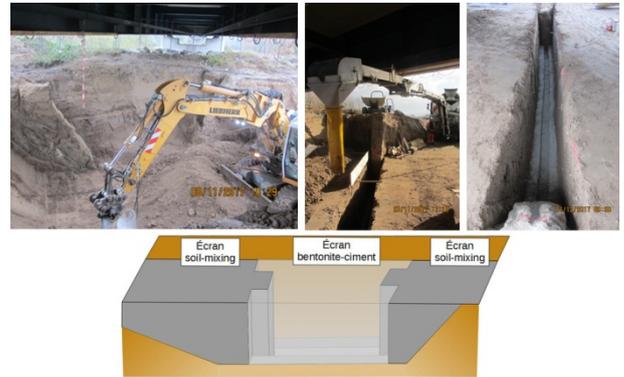


FIGURE 10 : PAROI EN BENTONITE-CIMENT SOUS LE PONT ET JONCTION AVEC L'ÉCRAN EN TRANCHEE DE SOL MIXÉ

## Orléans

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 (800 m à Guilly - 2,3 km à Saint-Denis-en-Val - 3,3 km à Sigloy - 850 m à Saint-Pryvé-Saint-Mesmin). Un retour d'expérience de cette opération a fait l'objet d'une publication CFBR en 2018 [6]. Celui-ci présente comment des défauts de prise d'écran ont nécessité de caractériser plus finement les sols, notamment par la recherche de la teneur en matière organique. Les résultats ont permis d'expliquer en partie les défauts localisés de prise. Une réflexion sur la nature du liant à incorporer au mélange a donc été menée en concertation avec l'entreprise pour y remédier.

Sur le tronçon de Sigloy, la formulation des mélanges des précédents écrans reposait sur un apport de 160 à 180 kg de ciment CEMIII/C 32,5 N par mètre cube de sol traité. Malgré une augmentation du dosage de ciment à 210 kg/m<sup>3</sup> les performances mécaniques et hydrauliques demandées n'ont pas été atteintes (Figure 11). Aussi, une adaptation de la nature du liant a-t-elle été proposée avec un apport de chaux vive (CaO) compris entre 10 et 50 kg de CaO par mètre cube de sol traité. Cet apport peut se faire soit par ajout au ciment CEMIII/C

32,5 N soit par l'utilisation de liants prêts à l'emploi (PAE).

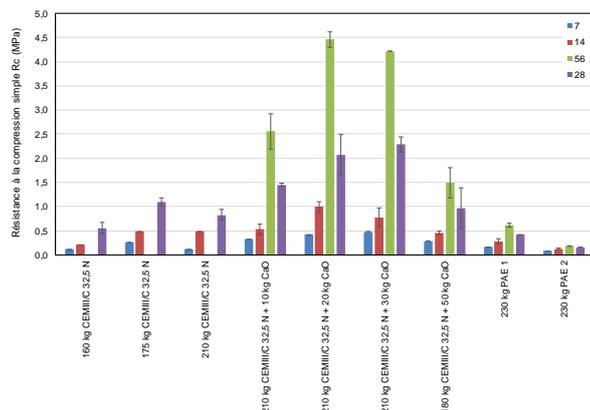


FIGURE 11 : RÉSISTANCES A LA COMPRESSION SIMPLE OBTENUES AVEC L'ÉTUDE DE FORMULATION EN LABORATOIRE

L'effet de la chaux vive implique probablement les mécanismes suivants : réduction de la teneur en eau, accroissement de la température et forte alcalinité, prompts à inhiber les effets néfastes de la matière organique.

Seules 2 formulations ont permis d'atteindre les performances mécaniques et hydrauliques requises à 28 jours, avec une augmentation des performances mesurée à moyen terme (56 jours). La formulation retenue est composée de 210 kg de ciment CEMIII/C 32,5 N et de 20 kg de CaO par mètre cube de sol traité.

Dans un premier temps, l'étude de formulation en laboratoire a été réalisée à partir de prélèvements de sols :

- tous les 200 m
- dont les teneurs en matière organique ont été mesurées par la méthode de calcination
- 6 formulations complémentaires aux 3 formulations initiales, avec incorporation de CaO

Dans un second temps, la DREAL Centre-Val de Loire a imposé la réalisation d'un plot d'essai (tronçon d'écran in situ) pour valider la mise en œuvre de la nouvelle formulation et tester les échéances de contrôle en termes de perméabilité et de résistance mécanique. Le principe du laboratoire de chantier a été confirmé avec des contrôles qualité renforcés (validation de la formulation sur une planche d'essais à 7, 28 et 56 jours et la réalisation d'essais complémentaires de  $R_c$  et de  $k$  à 56 jours en considérant une action de la chaux à long terme).

## Conclusion

Depuis 2013, la DREAL Centre-Val de Loire a expérimenté la réalisation d'écrans étanches « soil mixing » dans les levées de Loire et suivi plusieurs grands chantiers avec la technique de tranchée de sol mixé par voie sèche en milieu contraint (proximité des habitations et des ponts. Cette technique a montré une certaine adaptabilité à des structures de levées différentes.

La connaissance des sols et de la nappe d'accompagnement du fleuve sont essentiels pour sa mise en œuvre. Elle permet d'adapter la formulation et les modalités de contrôle, voire même, le cas échéant, à préconiser une autre technique pour certains types de sol. Dans tous les cas, la réalisation d'un test grandeur nature est 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 forage d'eau pour perméabilité).

Le suivi sur plusieurs années semble aujourd'hui montrer une amélioration dans le temps des performances de perméabilité et confirme bien l'intérêt de la technique qui garantit la continuité de l'écran dans la digue et sa fondation. D'autres essais sont cependant encore nécessaires pour répondre à la pérennité à long terme. Le coût moyen des opérations s'élève à moins d'un million d'euros le kilomètre comprenant l'écran étanche (7 à 8 mètres de profondeur en moyenne), le traitement des canalisations rencontrées ainsi que la reprise des aménagements de voirie. Le rendement de 160 m<sup>2</sup>/h a été atteint sur les sections courantes limitant notablement la durée des chantiers.

Le retour d'expérience présenté dans l'article contribuera à alimenter le guide technique pour la réparation des digues [7] en cours de préparation par le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR).

## Références

- [1] DREAL CVL / DETL (2015). *Renforcement de corps de digue par mélange en place*, GT travaux sur les levées de Loire, version provisoire.
- [2] Henry E. Brousse G. Vieillard C. Rosier E. (2015). *Rapport de l'étude de dangers du système d'endiguement du val de Cisse-Vouvray* – SAFEGE
- [3] Le Kouby A. Saussaye L. Szymkiewicz F. Fargier Y. Chevalier C. Fanelli S. (2015 & 2017). *Renforcement des digues par la technique du deep soil mixing - Synthèse des résultats d'essais des chantiers innovants du Val d'Orléans*
- [4] Maurin J. Boulay A. Tourment R. Beullac B. (2013). *Etudes de Dangers des levées de Tours* – Rapport d'étude DREAL CVL / DETL
- [5] 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 – digues 2013, Hermès Lavoisier, pp. 706-710.
- [6] Patouillard S. Saussaye L. Mathieu F. (2018). *Efficacité et durabilité des écrans étanches « soil mixing » dans les digues* – CFBR novembre 2018.
- [7] Poulain D. Tourment R. Patouillard S. Saussaye L. Le Kouby A. (2018). *Techniques de renforcement des digues* - §3 pp 6-11 – 26th ICOLD World Congress, Vienna.