

RÉHABILITATION DES DIGUES FLUVIALES ET MARITIMES : LUTTE CONTRE L'ÉROSION INTERNE PAR MISE EN PLACE D'UNE PAROI ÉTANCHE

AUTEURS : STÉPHANE MONLEAU, DIRECTEUR COMMUNICATION ET MARKETING, SOLETANCHE BACHY FRANCE - FABRICE MATTHIEU, CHEF DE PROJET À LA DIRECTION TECHNIQUE DE SOLETANCHE BACHY – © PHOTOS : PHOTOTHÈQUE SOLETANCHE BACHY - CÉDRIC HELSLEY - EMMANUEL GAFFARD

QUATRE MOIS APRÈS LA TEMPÊTE XYNTHIA QUI AVAIT FAIT 53 MORTS, LE GOUVERNEMENT AVAIT ANNONCÉ LA MISE EN PLACE D'UN "PLAN DIGUE" DESTINÉ À RENFORCER LES PROTECTIONS ET LES SYSTÈMES D'ALERTE. CE PLAN PRÉVOYAIT LE RENFORCEMENT DE 1 200 KILOMÈTRES DE DIGUES FLUVIALES ET MARITIMES. IL PRÉVOYAIT ÉGALEMENT DE METTRE L'ACCENT SUR LA PRÉVENTION, AVEC L'IDENTIFICATION DES ZONES À HAUTS RISQUES DE SUBMERSION. AUJOURD'HUI, UN GROS TRAVAIL A ÉTÉ ACCOMPLI POUR L'IDENTIFICATION DES DIGUES ET POUR LEUR CLASSEMENT EN 4 CATÉGORIES EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE L'OUVRAGE ET DE LA POPULATION PROTÉGÉE. CERTAINS TRAVAUX DEVRAIENT VOIR LE JOUR PROCHAINEMENT.



Cet article se propose de décrire les différentes techniques de parois d'étanchéité qui peuvent être mises en œuvre pour lutter, en particulier, contre l'érosion interne. La technique du Trenchmix®, application du sol mixing, sera décrite en détail à l'aide de plusieurs exemples.

LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE RENFORCEMENT DES DIGUES

L'objectif de ces techniques consiste à prévenir le risque de rupture. Compte tenu de l'hétérogénéité des digues et de leur état, la rupture de ces dernières peut intervenir avant leur surverse,

1- Barrage de la Ganguise (paroi en béton plastique).

1- Ganguise Dam (plastic concrete diaphragm wall).

notamment à cause de l'érosion interne due à l'écoulement de l'eau à travers la levée. Les travaux qui visent à renforcer une digue sont essentiellement de deux sortes :

→ Le renforcement des pieds de digue, afin de lutter contre les phénomènes d'érosion externe et d'affouillement ;



© DR 2

→ Le renforcement des corps de digue, afin de lutter contre les phénomènes d'érosion interne et de glissement.

LES RENFORCEMENTS EN CORPS DE DIGUE

L'objectif principal consiste à lutter contre les risques de brèches que provoque l'entraînement des matériaux dû à l'écoulement de l'eau à travers l'ouvrage.

Deux techniques sont employées selon les cas.

Dans le cas où un élargissement de la digue est possible, on cherchera à mettre en place, côté terre, un masque drainant. Ce masque sera constitué de matériaux sablo-graveleux.

Dans le cas fréquent où cet élargissement est impossible, on mettra en place, dans le corps de la digue une paroi dont le but sera d'assurer une étanchéité.

2- Barrage de Lower Carno au Royaume-Uni (paroi au coulis).

2- Lower Carno Dam in the United Kingdom (grout wall).

LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES PERMETTANT D'ASSURER UNE ÉTANCHÉITÉ

Ces techniques appartiennent à deux grandes familles :

→ Les coupures positives réalisées avec la mise en place d'un nouveau matériau après extraction ou refoulement du sol ;

→ Les voiles injectées.

On examinera, dans un premier temps, l'ensemble des techniques disponibles, leurs avantages et leurs inconvénients (voir tableau 1).

COUPURES POSITIVES

→ Les palplanches : il s'agit de mettre en place par battage, vibration ou verinage, une palplanche métallique.

→ Les parois au coulis et les parois en béton plastique (figures 1 et 2) : ces techniques sont directement inspirées de la paroi moulée. Dans le cas de la paroi en béton plastique, on procède à l'excavation de la paroi sous boue bentonitique à l'aide d'un atelier de type benne à câbles, benne hydraulique ou hydrofraise. Une fois l'excavation terminée, le bétonnage s'effectue à l'aide d'un tube plongeur. Dans le cas de la paroi au coulis, on procède directement à l'excavation de la paroi sous coulis bentonite-ciment à l'aide d'un atelier de type benne à câbles, benne hydraulique ou pelle rétro. Il est possible de réincorporer une partie des matériaux excavés (selon leur nature) dans les panneaux réalisés précédemment.

Cela permet de diminuer le volume de coulis utilisé, ainsi que la quantité de déblais à évacuer.

→ L'écran mince (figures 3 et 4) : la construction d'une paroi mince s'effectue par le vibrofonçage d'un profilé métallique en forme de "H" équipé de tubes d'injection. Lors de la remontée du profilé, on procède à l'injection en pied du vide créé. L'empreinte du profilé en forme de "H" est comblée par le coulis qui forme un des panneaux de la paroi mince (figure 3). La répétition de ce processus forme un écran étanche continu. Dans certains terrains, il est possible de combiner le vibrofonçage avec un jet de coulis haute pression, afin de faciliter la descente du profilé (procédé Vibrojet®).

→ Le Trenchmix® : cette technique est décrite en détail dans le chapitre suivant ;

→ Le Geomix® : le Geomix® est un procédé de soil mixing, développé par Soletanche Bachy, qui consiste à utiliser le sol en place comme matériau de construction.

TABLEAU 1 : AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES

PROCÉDÉS À BASE DE PAROIS OU ANALOGUES		
MÉTHODE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
PALPLANCHES	<ul style="list-style-type: none"> Installation rapide 	<ul style="list-style-type: none"> Vibrations et bruits à la mise en œuvre Prix élevé Étanchéité relative, fenêtres possibles
PAROIS D'ÉTANCHÉITÉ ÉPAISSES (paroi au coulis, paroi béton plastique)	<ul style="list-style-type: none"> Rapidité d'exécution Possibilité d'ancrage dans du rocher Profondeurs importantes (50 m et plus) Étanchéité élevée ($\leq 10^{-7}$ m/s) 	<ul style="list-style-type: none"> Déblais (sauf en cas de réincorporation dans la paroi)
PAROIS MINCES	<ul style="list-style-type: none"> Rapidité d'exécution et coût faible Étanchéité élevée ($\leq 10^{-7}$ m/s) 	<ul style="list-style-type: none"> Profondeur limitée à 25 m Pas d'ancrage dans le rocher
TRENCHMIX®	<ul style="list-style-type: none"> Rapidité d'exécution et coût faible Peu de déblais 	<ul style="list-style-type: none"> Profondeur limitée à 10 m Pas d'ancrage dans le rocher
GEOMIX®	<ul style="list-style-type: none"> Rapidité d'exécution Peu de déblais Possibilité d'ancrage dans le rocher 	
PROCÉDÉS À BASE DE VOILES D'INJECTION		
MÉTHODE	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
INJECTION D'IMPREGNATION	<ul style="list-style-type: none"> Petite perforation Souplesse, adaptabilité 	<ul style="list-style-type: none"> Limitée aux sols $k \geq 10^{-6}$ Résultat $> 10^{-6} - 10^{-7}$ m/s
JET GROUTING	<ul style="list-style-type: none"> Petite perforation Souplesse, adaptabilité 	<ul style="list-style-type: none"> Problème de déviations de forages Rejets très importants

Le sol est déstructuré lors de l'excavation et mélangé à un coulis de ciment. Le mélange obtenu constitue la paroi Geomix®.

Ce procédé est le résultat de l'alliance des techniques de soil mixing et de la technologie Hydrofraise.

On fusionne ainsi les avantages de chacun : la robustesse et l'expérience de l'Hydrofraise avec l'ingéniosité du soil mixing, qui consiste à mélanger le sol en place à un coulis bentonite/ciment. Un nouvel outil a été développé : le CSM (Cutter Soil Mixing), constitué de moteurs hydrauliques sur lesquels sont montées deux paires de tambours rotatifs qui assurent le forage et le malaxage sol/ciment.

Cet équipement est compatible avec de nombreux types de porteurs, ce qui apporte une grande souplesse d'utilisation (figures 5 à 7).

VOILES INJECTÉS

→ L'injection classique : l'injection d'un coulis dans un sol, au travers de forages, permet d'étancher ce sol par remplissage des vides. Les techniques varient en fonction des objectifs recherchés et de la nature des terrains.

Une première distinction apparaît entre les terrains rocheux où l'injection pourra se faire "à trou ouvert", les parois du forage étant stables, et les terrains meubles où le forage sera équipé d'un tube à manchettes dans lequel sera descendu l'obturateur d'injection.

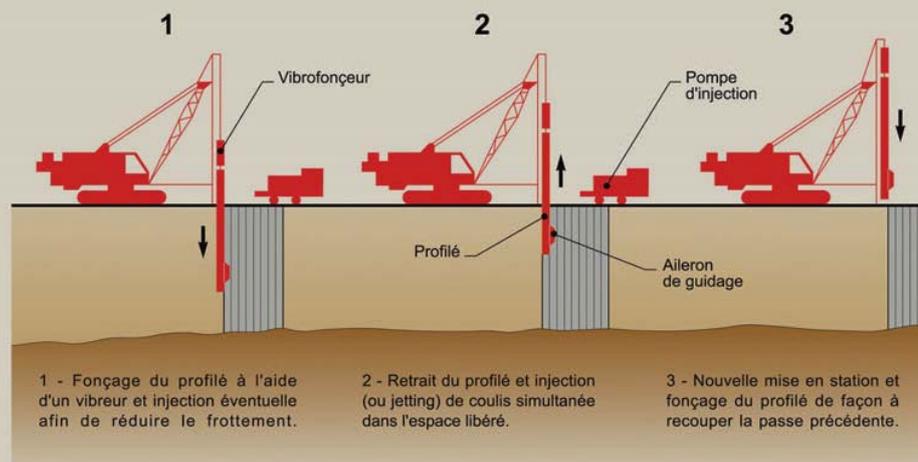
→ Le jet grouting : le procédé jet grouting consiste à déstructurer un sol en profondeur à l'aide d'un jet haute pression (classiquement de 20 à 40 MPa) dans un forage et à mélanger le sol érodé avec un coulis autodurcissant pour former des colonnes, panneaux et autres structures dans le terrain. Il est caractérisé par une substitution plus ou moins importante du sol en place, dépendant de la nature du sol, de la technique utilisée, et de l'objectif à atteindre (figure 8).

TRENCHMIX® : DESCRIPTION ET EXEMPLES D'APPLICATION

Le Trenchmix® est un procédé d'amélioration des sols en place, conçu par Soletanche Bachy, dont l'utilisation en France a été validée par l'intermédiaire d'un cahier des charges techniques. Ce cahier des charges est approuvé par le Bureau Veritas depuis 2009.

Ce procédé permet de réaliser dans le terrain des inclusions semi-rigides, constituées d'éléments de sol traité en place par l'incorporation d'un liant.

RÉALISATION D'UN ÉCRAN MINCE



3 © DR

3- Réalisation d'un écran mince.

4- Réalisation d'un écran mince sur les digues du Rhin.

5a & 5b- Réalisation d'une barrette en Geomix®.

3- Execution of a thin barrier.

4- Execution of a thin barrier on the dykes of the Rhine.

5a & 5b- Execution of a supporting wall unit in Geomix®.

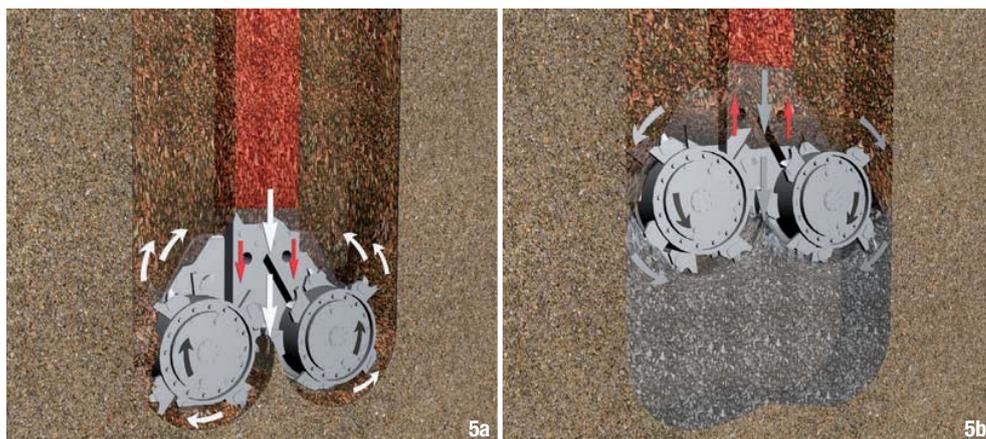


4 © DR

Le matériau constituant ces inclusions présente des caractéristiques géomécaniques améliorées, à la fois en termes de résistance, de déformabilité et de perméabilité. Le procédé utilise une trancheuse sur chenilles dont la

lame a été spécialement adaptée pour le découpage et le malaxage du sol *in situ*.

Un fluide peut être incorporé au mélange à tout moment à l'aide de plusieurs buses d'injection disposées





© DR 6



7

sur la lame. Il est possible de déplacer l'ensemble verticalement dans le sol selon une course de plusieurs mètres, ce qui permet ainsi de faire varier la profondeur traitée sans changer de longueur d'outillage (figure 9).

Le dispositif s'accompagne d'un écran de contrôle où l'opérateur peut vérifier en temps réel les divers paramètres de malaxage : volumes incorporés, indice de malaxage, profondeur et verticalité de la lame, vitesse de déplacement de la machine.

L'incorporation du liant hydraulique peut être réalisée par voie sèche ou par voie humide :

→ En méthode sèche, comme indiqué sur la figure 10, le liant est mis en place dans une pré-tranchée sous forme

6- Écran en Geomix® à Viège en Suisse.

7- Écran en Geomix® à Mielec en Pologne.

8- Réalisation du jet grouting.

6- Geomix® barrier at Viège in Switzerland.

7- Geomix® barrier at Mielec in Poland.

8- Execution of jet grouting.

pulvérulente, puis est incorporé au sol par malaxage *in situ* ;

→ En méthode humide, la pré-tranchée sert uniquement à contrôler le foisonnement du mélange sol-liant. Un coulis (mélange d'eau et de liant) est préparé à la demande dans une unité de fabrication, puis pompé jusqu'à la machine où il est injecté le long de la lame pendant le malaxage.

Le procédé Trenchmix® est adapté au traitement d'une large gamme de sols, allant des sables et graviers jusqu'aux argiles plastiques. Une gamme classique de paramètres opératoires est donnée ci-après :

→ Largeur de la tranchée : 400 à 500 mm ;

→ Ciment incorporé : 150 à 300 kg

par m³ de terrain naturel ;

→ Vitesse de la lame : jusqu'à 4 m/s ;

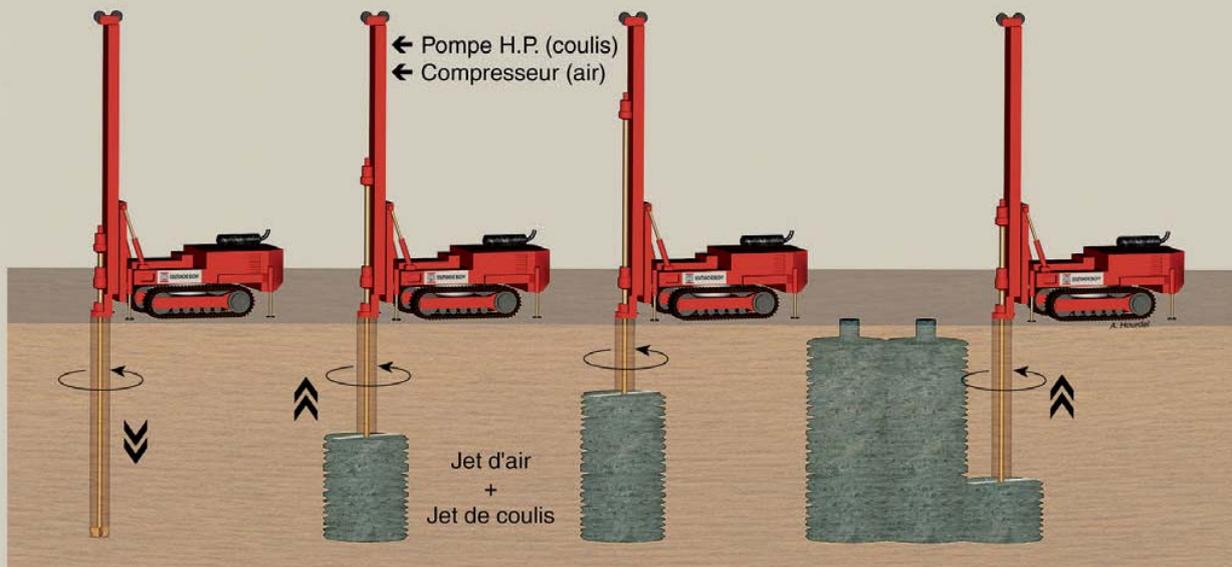
→ Profondeur : de 2,5 m à 10 m.

À condition que l'indice de malaxage soit respecté, le matériau sol-liant obtenu par le procédé Trenchmix® est sensiblement homogène sur toute la hauteur du traitement.

Les tranchées ainsi formées peuvent être utilisées pour construire des soutènements provisoires de moyenne profondeur ou pour améliorer les caractéristiques des sols en place.

Le traitement réalisé étant forcément continu, le procédé Trenchmix® s'avère très bien adapté à la réalisation d'écrans d'étanchéité, en particulier sur des digues, comme montré dans les exemples suivants. ▷

RÉALISATION DU JET GROUTING



© DR

8

CONFORTEMENT DE DIGUE SUR LE RHIN

Ces travaux ont été récemment menés par Soletanche Bachy sur une digue existante en Alsace, constituée d'un noyau en terre surmonté d'une recharge sablo-graveleuse en alluvions du Rhin.

Les travaux ont consisté à réaliser, depuis la crête de la digue, une tranchée de mélange sol-ciment par la méthode Trenchmix® dans le but de rehausser le noyau existant et de l'ancrer dans un horizon d'alluvions plus anciennes, représentant le terrain naturel.

La cinématique de la machine a permis de maintenir constante la profondeur d'ancrage en suivant le profil de la digue sur plusieurs kilomètres, selon une profondeur moyenne de 5 m.

Sur ce chantier, le procédé Trenchmix® a été appliqué selon la méthode sèche. Un ciment de laitier pulvérisé a été épandu dans une pré-excavation en crête de digue, puis a été mélangé au sol en place avec adjonction d'eau pompée à proximité dans le Rhin.

L'exécution des travaux s'est accompagnée de contrôles qualité réguliers permettant de vérifier l'homogénéité et les propriétés de l'écran d'étanchéité. Une perméabilité moyenne de 7.10^{-8} m/s a été obtenue *in situ*, ainsi qu'une résistance à la compression supérieure à 2 MPa à 28 jours (figure 11).

MISE EN SÉCURITÉ SUITE À UNE INONDATION EN POLOGNE

Ce second exemple a été réalisé en 2009-2010 par Soletanche Polska, filiale polonaise de Soletanche Bachy, sur des digues endommagées en raison d'une brusque montée des eaux d'un affluent de la rivière Wisla, à l'Est de la Pologne.

La circulation incontrôlée des eaux sous les digues avait provoqué l'apparition de plusieurs affouillements conduisant à une destruction partielle de l'ouvrage, avec pour conséquence l'inondation d'une zone de plusieurs kilomètres carrés.

Ces digues reposaient sur une couche de sables fins moyennement denses à denses, sur une profondeur de 5 à 16 m, qui présentaient par endroits des lentilles d'argile contenant parfois un peu de matière organique.

La principale circulation d'eau avait été identifiée dans une couche de sables très perméables ($K=10^{-2}$ à 10^{-4} m/s), située vers 4 m de profondeur.

Les travaux ont consisté à réaliser depuis le pied de la digue un écran

étanche continu sur plusieurs kilomètres sur une profondeur de 6 mètres. Les propriétés finales de l'écran ont été atteintes en incorporant le liant sous la forme d'un coulis préparé sur place (méthode humide), la quantité minimale à mélanger représentant 140 kg de ciment/m³ de sol traité.

Plusieurs types de contrôles ont été réalisés sur place, incluant la prise d'échantillons de mélanges frais en profondeur dans la tranchée et le dégagement de 2 zones de 4 m de longueur à des fins d'inspection visuelle (figure 12).

CONSTRUCTION D'UNE NOUVELLE DIGUE EN ANGLETERRE

Cet exemple, réalisé en 2010 en Angleterre par Bachy Soletanche Ltd, consistait à construire une digue destinée à protéger un village, ainsi qu'une voie ferrée en cas de débordement d'un plan d'eau. Sur ce site classé réserve naturelle ornithologique, les plus importants critères de choix étaient d'ordre environnemental : volume de déblais réduit, absence de perturbation de trafic ferroviaire et possibilité de mise en œuvre sur une plateforme étroite.



9- Outillage Trenchmix® sur le Rhin.

10- Trenchmix® par voie sèche.

11- Coupe des travaux - digue sur le Rhin.

9- Trenchmix® tool on the Rhine.

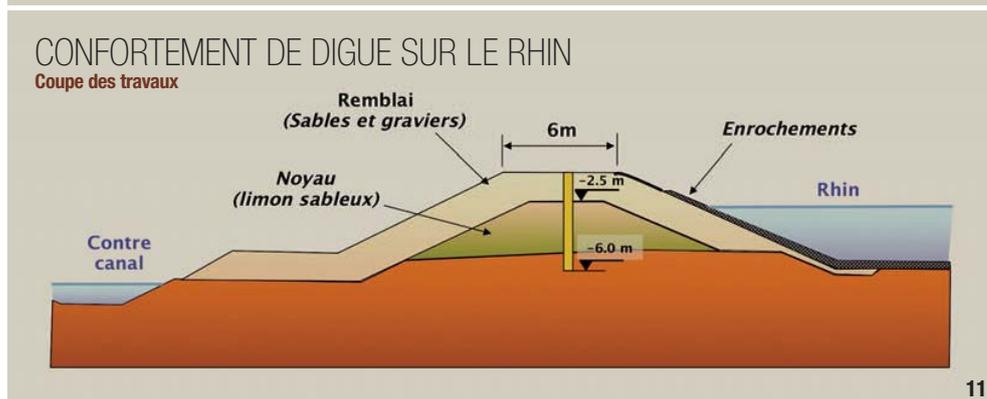
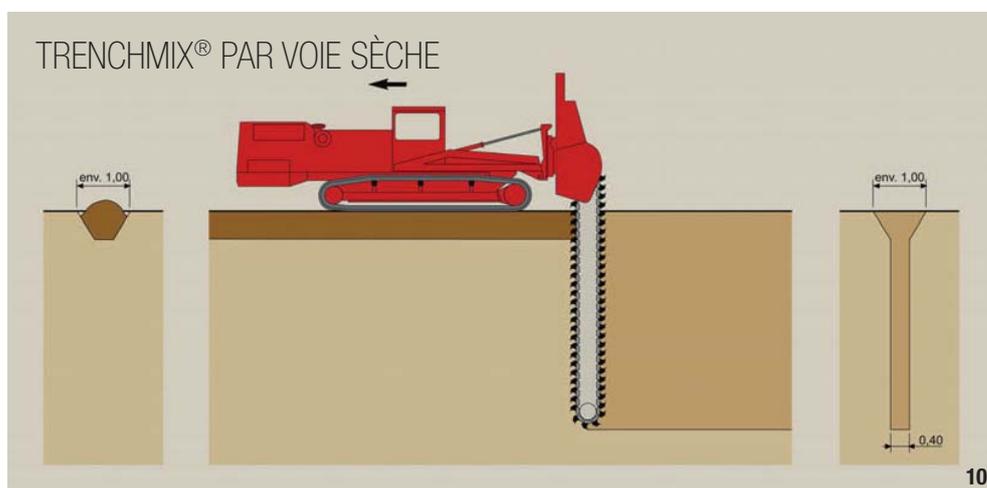
10- Trenchmix® by dry method.

11- Cross section of works - dyke on the Rhine.

Ainsi, deux écrans étanches ont été construits à 7 m de profondeur, de part et d'autre d'un pont et sur une longueur de 575 et 700 mètres.

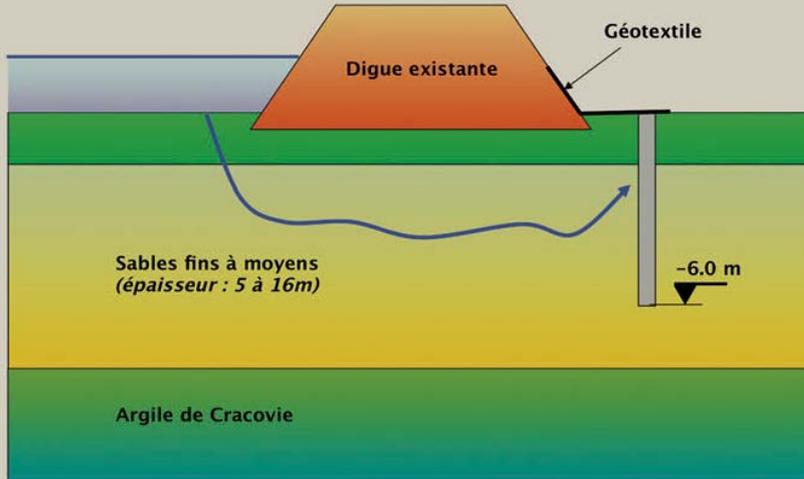
Les caractéristiques minimales demandées pour l'écran consistaient à atteindre une perméabilité de 10^{-8} m/s, ainsi qu'une résistance à la compression à 28 jours de 0,5 MPa.

L'écran Trenchmix®, réalisé selon la méthode humide, traverse une couche de graviers sablo-limoneux perméable jusqu'à un horizon étanche d'argillite. Les paramètres opératoires ont été



MISE EN SÉCURITÉ SUITE À UNE INONDATION EN POLOGNE

Coupe des travaux



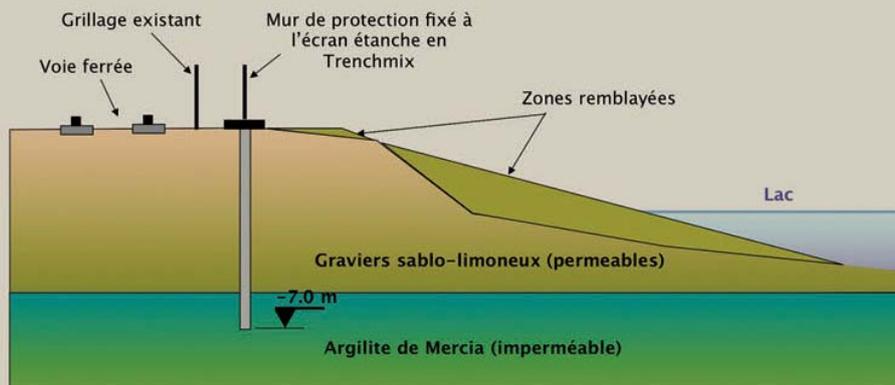
légèrement surévalués, de manière à contrecarrer l'effet d'inhibition de prise lié à la présence de lentilles de matière organique dans la couche de graviers sableux. Les contrôles sur éprouvettes confectionnées à partir d'échantillons de mélange frais ont permis de vérifier que l'objectif de perméabilité a bien été atteint. Ils ont montré une résistance à la compression moyenne proche de 3 MPa (figure 13). La technique du Trenchmix® a maintenant été utilisée sur plusieurs dizaines de chantiers en France, au Royaume-Uni, en Suisse et en Pologne. Elle s'avère particulièrement bien adaptée à la réalisation d'écrans d'étanchéité dans les digues. Son faible coût, sa rapidité d'exécution, sa sûreté (la paroi est continue) en font un procédé incontournable pour les parois de moins de 10 m.

Enfin, la faible largeur des digues rend souvent impossible le croisement des engins. La quasi-absence de déblais du Trenchmix® représente donc un atout supplémentaire. Atout qui, d'ailleurs, s'intègre parfaitement dans la politique développement durable de l'entreprise. □

12

CONSTRUCTION D'UNE NOUVELLE DIGUE EN ANGLETERRE

Coupe des travaux



12- Coupe des travaux - digue en Pologne.

13- Coupe des travaux - digue en Angleterre.

12- Cross section of works - dyke in Poland.

13- Cross section of works - dyke in England.

13

ABSTRACT

RENOVATION OF RIVER AND SEA DYKES: CONTROL OF INTERNAL EROSION BY PUTTING IN PLACE A CUTOFF WALL

STÉPHANE MONLEAU, SOLETANCHE BACHY - FABRICE MATTHIEU, SOLETANCHE BACHY

Four months after the Xynthia storm which left 53 dead, the French government announced the implementation of a "dyke plan" to strengthen the protection and warning systems. This plan provided for the reinforcement of 1200 kilometres of river and sea dykes. It also planned to emphasise prevention, through the identification of areas with a high risk of submersion. At present, major work has been accomplished on the identification of dykes and their classification in four categories according to the height of the structure and the population protected. Certain works are due to be carried out shortly. This article describes the various cutoff wall techniques which can be used to combat internal erosion in particular. The Trenchmix® technique, an application of soil mixing, will be described in detail with several examples. □

REHABILITACIÓN DE DIQUES FLUVIALES Y MARÍTIMOS: LUCHA CONTRA LA EROSIÓN INTERNA MEDIANTE LA CONSTRUCCIÓN DE UN MURO PANTALLA

STÉPHANE MONLEAU, SOLETANCHE BACHY - FABRICE MATTHIEU, SOLETANCHE BACHY

Cuatro meses después de la tempestad Xynthia que causó 53 muertos, el gobierno anunció la puesta en marcha de un "plan dique" para reforzar las protecciones y los sistemas de alerta. Este plan preveía el refuerzo de 1.200 kilómetros de diques fluviales y marítimos y hacer hincapié en la prevención, con la identificación de las zonas de alto riesgo de inundación. Ya se ha realizado un gran trabajo para la identificación de los diques y su clasificación en 4 categorías en función de la altura de la estructura y de la población protegida. Algunas obras deberían salir pronto a la luz. Este artículo tiene como finalidad describir las diferentes técnicas de muros pantalla que pueden construirse para luchar, en particular, contra la erosión interna. La técnica de Trenchmix®, aplicación del soil mixing, se describirá detalladamente a través de varios ejemplos. □