

LIMONS DU PROJET CANAL SEINE-NORD EUROPE : EVALUATION DES TRAITEMENTS POUR UN EMPLOI EN ETANCHEITE

SILTS FROM THE CANAL SEINE-NORD EUROPE PROJECT: ASSESSMENT OF SOIL TREATMENTS FOR USE IN WATERTIGHTNESS

Abdelwadoud MEHENNI¹, Luc DEROO², Lucile SAUSSAYE³, Fabien SZYMKIEWICZ⁴, Gaëtan POTIE⁵, Véronique BERCHE⁵

¹ Bouygues Travaux Publics, France

² ISL Ingénierie, France

³ Cerema Normandie-Centre, Equipe Recherche ENDSUM, France

⁴ Université Gustave Eiffel, Laboratoire Sols Roches Ouvrages géotechniques, France

⁵ Société du Canal Seine-Nord Europe, France

RÉSUMÉ – Cette étude met en évidence la faisabilité d'un dispositif d'étanchéité complet (DEC) en sols traités pour le futur CSNE. Les études en laboratoire ont permis de définir des formulations de traitement permettant de répondre aux critères hydraulique, mécanique et d'érodabilité de chaque couche. Les planches expérimentales ont démontré la faisabilité in situ du DEC moyennant un contrôle rigoureux à chaque étape de réalisation.

ABSTRACT – This study highlights the feasibility of a watertightness structure made of treated soils for the future Seine-Nord Europe Canal (CSNE). Laboratory studies were conducted to define a specific treatment that meet the required hydraulic, mechanical and erodibility performances of each layer. The large-scale trial showed the in-situ feasibility of this structure through rigorous control at each stage of construction.

1. Introduction

Le Canal Seine-Nord Europe (CSNE) permet de relier le bassin de la Seine au Nord de la France et aux réseaux de canaux belges et hollandais dans le cadre du réseau Seine-Escault. Long de 107 km, il permettra d'accueillir des bateaux de 4000 tonnes d'une longueur allant jusqu'à 185 m. Les travaux devraient débuter en 2022.

La conception du CSNE doit répondre aux forts enjeux environnementaux liés : i) à la préservation des ressources en eaux à travers la limitation des pertes par infiltrations, lesquelles doivent rester en deçà d'une valeur de 0,62 m³/s pour l'ouvrage ; ii) à une valorisation maximale des déblais excédentaires, estimés à 75 millions de m³.

L'absence de retour d'expérience récent sur des canaux navigués de telle ampleur a conduit la société du CSNE à compléter les données d'entrée sur les dispositifs d'étanchéité complets (DEC) en sols traités en lançant un marché de prestation intellectuelle pour valider la faisabilité de couches d'étanchéité et de protection en matériaux naturels présents au droit du tracé du canal. Les études réalisées visent à vérifier les objectifs de perméabilité, d'érodabilité et de durabilité du dispositif et à anticiper la réalisation d'un tel dispositif à l'échelle d'un grand projet linéaire comme le CSNE.

Le DEC envisagé est constitué de deux couches distinctes, à fonctionnalités différentes et complémentaires (Figure 1) :

- **Couche d'étanchéité (CE)** : la fonction principale de cette couche est de garantir l'étanchéité du complexe en respectant un critère de perméabilité inférieure à $1 \cdot 10^{-8}$ m/s sur une épaisseur de 40 cm.
- **Couche de protection (CP)** : cette couche joue un rôle de protection mécanique vis-à-vis des sollicitations extérieures (actions mécaniques ou hydrauliques, érosion, batillage, jet d'hélice, impact d'ancre) afin d'assurer le maintien de la couche d'étanchéité et de garantir sa pérennité.

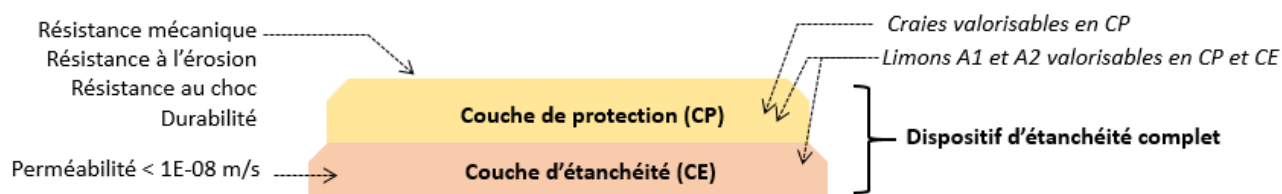


Figure 1. Illustration du dispositif d'étanchéité complet (DEC).

L'obtention d'une perméabilité inférieure à 1.10^{-8} m/s semble un objectif atteignable pour des matériaux fins humides. Plusieurs études montrent que le compactage du côté humide de l'optimum Proctor normal (OPN) permet d'obtenir la perméabilité la plus faible (e.g., Mitchell et al., 1965 ; Daoud, 1996). Les travaux menés par Mehenni (2015) montrent que les Limons des Plateaux atteignent une perméabilité de l'ordre 1.10^{-9} m/s lorsqu'ils sont compactés par compactage dynamique du côté humide de l'OPN. Par ailleurs, plusieurs études ont aussi montré le rôle du mode de compactage et de l'énergie employée sur l'évolution de la perméabilité (e.g., Mitchell et al., 1965 ; Daoud, 1996 ; Mehenni, 2015). Les résultats de ces études s'accordent sur le fait que le compactage par pétrissage permet d'obtenir la perméabilité la plus faible et que l'augmentation de l'énergie de compactage employée permet de réduire davantage la perméabilité. In situ, une augmentation excessive de l'énergie de compactage peut conduire à un phénomène de feuilletage qui est défavorable en terme de perméabilité.

L'obtention de performances mécaniques et de résistance à l'érosion des sols passe par un traitement à la chaux et/ou aux liant hydrauliques. Le gain des résistances mécaniques lié au traitement n'est plus à démontrer et les pratiques usuelles nationales sont bien détaillées dans le guide GTS (LCPC-SETRA, 2000). Concernant la résistance à l'érosion, plusieurs études récentes montrent une augmentation importante de la résistance à l'érosion des sols après traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (Charles et al. 2013 ; Mehenni et al., 2016 ; Nerincx et al. 2017), en laboratoire et in situ. A dosage équivalent, l'ajout de liant hydraulique permet une augmentation plus importante de la résistance à l'érosion que l'ajout de chaux vive. De plus, l'augmentation du dosage du produit de traitement permet un gain plus important de résistance à l'érosion et une durabilité accrue dans le temps (Mehenni et al., 2015).

Le DEC illustré dans la Figure 1 a déjà été testé in situ sur des ouvrages pilotes (Mehenni et al., 2015). Les résultats in situ sont cohérents avec les résultats en laboratoire. Ces études ont aussi mis en lumière les facteurs importants liés à la durabilité de ces dispositifs. Cependant, des travaux complémentaires restent nécessaires pour confirmer ces résultats et adapter les conditions de mise en œuvre à l'échelle du CSNE.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Ressources disponibles

Sur une grande partie de son tracé, le CSNE s'inscrit dans les limons loessiques des plateaux (LP). Ces limons sont présents sur une profondeur variable, avec une moyenne de 5 à 8 m (données géologiques globales). Le substratum crayeux sous-jacent aux LP est constitué d'une craie d'âge campanien, très pure (88 à 95 % de CaCO_3). Ces deux matériaux constituent donc des ressources naturelles à fort potentiel de valorisation.

Le site sélectionné est localisé sur une parcelle à Cizancourt (60), située sur le tracé du CSNE. Des prélèvements ont été réalisés au préalable pour identifier les limons en place (Tableau 1). La craie utilisée est issue du site de Mazancourt (60), à proximité immédiate du tracé du futur canal.

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques des matériaux.

Nature	GTR	Couleur	Dmax (mm)	0/80 μ m (%)	VBS (g/100 g de sol sec)	IP (-)	W _{OPN} (%)	ρ_{dOPN} (t/m ³)
Limons argileux	A2	Brun	5 [3-9]	93	3,2	9	15,1	1,81
Limons silteux	A1	Beige	6 [2-19]	96	1,6	Non mesurable	14,8	1,76
Craie	R12	Blanche	> 50**	40*	/	/	23,5*	1,59*

* Ces paramètres dépendent du processus de concassage/malaxage sur site ou en laboratoire.

** Valeur in situ avant traitement ; en laboratoire : étude réalisée sur matériaux écrêtés Dmax = 35 mm.

2.2. Stratégie d'étude

Le principal objectif de cette étude est de définir les formulations de traitement adéquates pour chacune des couches constituant le DEC et de s'assurer de l'obtention des critères requis à l'échelle de l'ouvrage.

Une étude complète en laboratoire a été réalisée au préalable pour définir les conditions de mise en œuvre (teneur en eau, densité et mode de compactage...) ainsi que les modalités de traitement (dosage et nature de traitement, effet du prétraitement à la chaux...). Seuls les principaux résultats sont mentionnés dans cet article. Afin de valider les résultats obtenus en laboratoire, plusieurs planches expérimentales ont été réalisées. Sur la base des résultats in situ, deux ouvrages pilotes ont ensuite été réalisés (bassins de rétention d'eau) et font actuellement l'objet d'un suivi de leur évolution dans le temps. Le présent article se focalise sur la réalisation et les résultats des planches expérimentales.

2.3. Etude en laboratoire : définition des formulations de traitement

L'objet principal de l'étude en laboratoire est de définir les modalités permettant d'atteindre les différents critères visés pour chaque couche et d'orienter le choix des modalités à tester in situ. Ainsi, plusieurs facteurs ont été examinés et seules les configurations les plus pertinentes ont été retenues pour les planches expérimentales.

Le sol a été préparé à la teneur en eau souhaitée. Ensuite, le produit de traitement a été mélangé avec le sol par un malaxage mécanique. Le sol traité à la chaux a été conservé pendant 1 h dans des sacs hermétiques avant compactage. Le sol traité au liant hydraulique a été compacté directement après malaxage, de même que le sol traité par produits argileux. Les courbes de compactage ont été déterminées pour chaque modalité.

Pour les essais de perméabilité, des modalités de compactage statique (double pistonnage) et dynamique (mini dame Proctor) ont été testées. Les éprouvettes destinées aux essais mécaniques et aux essais d'érosion ont été compactées statiquement par double pistonnage afin d'atteindre les différentes densités visées. Par ailleurs, différents temps de cure (Tableau 2) ont été testés dans le cas du traitement à la chaux et au liant hydraulique.

Tableau 2. Modalités et produits de traitements utilisés pour l'étude en laboratoire.

Fonction	Facteurs	Domaine de variabilité	Paramètre étudié
Couche d'étanchéité	Densité	95 et 98 % ρ_{dOPN} *	1) Conductivité hydraulique k (mesure à charge constante en cellule triaxiale)
	Teneur en eau	W _{OPN} et W _{OPN} + 1%*	
	Produit	bentonite** ou kaolinite avec/sans prétraitement CaO	
	Dosage	2 et 4 %	
Couche de protection	Teneur en eau	W _{OPN}	1) Résistance à la traction indirecte et module (R_{tb} ; E_{tb}) 2) Résistance à la compression simple (R_c) 3) Résistance à l'érosion JET (Jet Erosion Test) (INRAE, 2019). 4) Conductivité hydraulique k
	Compacité	95 et 98 % ρ_{dOPN}	
	Produit	Limon : Roc AS® Craie : Roc SC® avec/sans prétraitement CaO	
	Dosage	4, 5 et 6 %	
	Temps de cure	7, 14, 28, 90 et 360 jours	

* Les valeurs ρ_{dOPN} et W_{OPN} ont été mesurées pour chaque modalité de traitement.

** il s'agit d'une bentonite calcique naturelle.

2.4. Etude in situ : réalisation des planches expérimentales et des ouvrages pilotes

2.4.1. Planches expérimentales

Plusieurs planches expérimentales ont été réalisées (Tableau 3). Ces planches ont été réalisées progressivement et successivement afin d'adapter les modalités de mise en œuvre en fonction des résultats obtenus sur les planches précédentes.

Tableau 3. Modalités de traitement des planches expérimentales.

Planches	Nature	Disposition	Dimensions	Fonction	Prétraitement	Traitement
Planche 1	Limon A2	Horizontale	5 m x 30 m	Etanchéité	1 % CaO	2 % bentonite
Planche 2	Limon A2	Horizontale	5 m x 30 m	Etanchéité	Sans chaux	2 % bentonite
Planche 3	Limon A1	Horizontale	5 m x 30 m	Etanchéité	1 % CaO	2 % bentonite
Planche 4	Limon A1	Horizontale	10 m x 40 m	Etanchéité	Sans chaux	2 % bentonite
Planche 5	Limon A1	Horizontale	5 m x 40 m	Protection	1 % CaO	5 % Roc AS ®
Planche 6	Craie R12	Horizontale	5 m x 40 m	Protection	Sans chaux	5 % Roc SC ®
Planche 7-1	Limon A1	Talus 2/1	10 m x 10 m	Etanchéité	Sans chaux	2 % bentonite
Planche 7-2	Limon A1	Talus 2/1	10 m x 10 m	Protection	1 % CaO	5 % Roc AS ®

2.4.2. Bassins pilotes

À la suite de la réalisation des planches expérimentales, deux bassins de rétention d'eau ont été réalisés. Les résultats présentés ici se focalisent sur le bassin n°1 dont la coupe transversale est illustrée dans la Figure 2. Pour cet ouvrage pilote, le fond du bassin est constitué comme suit : i) une couche d'étanchéité en fond du bassin (limon A1 + 2 % bentonite) ; ii) : une couche de protection en limon sur la moitié de la largeur (limon A1 + 1 % CaO + 5 % Roc AS ®) ; iii) : une couche de protection en craie sur la moitié restante (craie R21 + 5 % Roc SC ®). Les digues du bassin sont constituées aussi à partir de limon (limon A1 + 1 % CaO + 5 % Roc AS ®), l'objectif étant de créer un bassin de rétention d'eau afin de mettre en immersion le DEC et de suivre son évolution dans le temps (Figure 3).

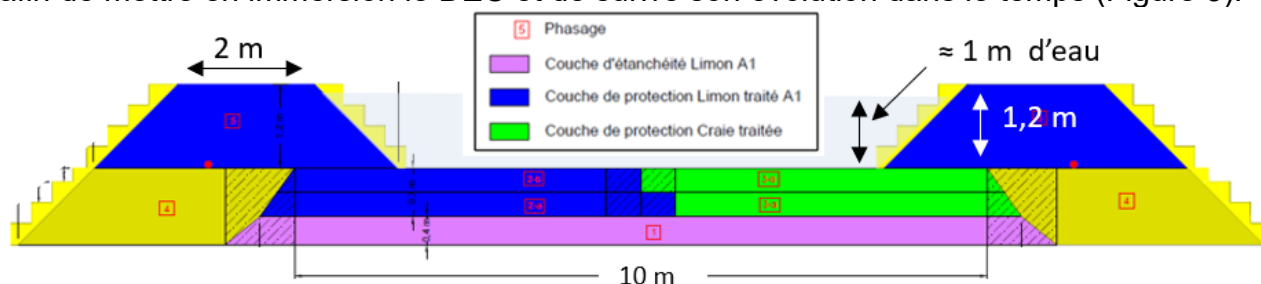


Figure 2. Coupe transversale du bassin n°1.



Figure 3. A gauche : bassin en cours de réalisation. A droite : bassin en cours de remplissage.

2.4.3. Procédure de réalisation et de contrôle

L'un des objectifs principaux des planches expérimentales est de définir les protocoles de traitement, de mise en œuvre et de contrôle afin de garantir l'obtention des critères requis pour chaque couche. Plusieurs étapes ont été nécessaires afin de garantir la mise en œuvre d'un matériau homogène, avec le bon dosage de produit de traitement et à la bonne teneur en eau. Ces étapes (Figure 4) sont résumées brièvement ainsi :

- a) Identification affinée des matériaux des gisements avec un contrôle rigoureux de la teneur en eau du stock à différentes périodes ;
- b) Mise en place de processus d'extraction permettant un tri, une mise en stock et une homogénéisation optimale des matériaux ;
- c) Gestion de la teneur en eau avant, durant et après le processus de traitement avec une adaptation des moyens d'incorporation d'eau à chaque étape (traitement à l'eau) ;
- d) Contrôle des dosages des produits de traitement à la bêche avec, si besoin, un ajout en plusieurs phases ;
- e) Suivi de la mouture des matériaux traités et adaptation des méthodes et des moyens de malaxage (nombre de passes du pulvimixeur, concassage initial de la craie...) ;
- f) Adaptation des moyens et des modalités de compactage en fonction de la nature des matériaux (type de compacteur, nombre de passes, amplitude de vibration...) ;
- g) Définition des méthodes de suivi et de contrôle à toutes les étapes de réalisation.



Figure 4. Quelques étapes de réalisation des planches.

A titre d'exemple, la mise en place des matériaux a été conduite moyennant deux paramètres : i) le suivi de l'évolution de la densité au gamma densimètre. ii) le suivi visuel de l'évolution de l'état de surface du matériau compacté. Il s'agit de mesurer l'évolution de la densité après chaque passe de compacteur (mesure en surface et en profondeur) tout en observant le comportement du matériau lors du compactage (Figure 5). L'obtention du pic de densité et l'apparition du feuilleteage et/ou du matelassage ont été systématiquement quantifiés pour chaque modalité dans le but de définir le nombre de passes à ne pas dépasser par la suite et d'éviter le feuilleteage sur les planches finales. Ces deux facteurs ont ensuite été pris en considération pour définir le type de compacteur et le nombre de passes à respecter pour une modalité de traitement.

2.4.4. Campagne d'essais in situ

Au-delà des essais de contrôle nécessaires à la mise en œuvre des planches (teneur en eau, identification, densité, portance, déflexion...), les essais suivants ont été réalisés après la mise en place et 1 an après immersion :

- Couche d'étanchéité : perméabilité à l'infiltromètre simple anneau fermé ;
- Couche de protection : perméabilité à l'infiltromètre simple anneau fermé, mesures au pénétromètre dynamique lourd (mouton de 64 kg-NF P94-063) et essai d'érosion JET.



Figure 5. A gauche : suivi de l'évolution de l'état de surface avec le nombre de passes. A droite : réalisation de différents paliers pour la mesure de densité en profondeur.

3. Résultats des essais en laboratoire

3.1. Couche d'étanchéité

Les résultats des essais de perméabilité en laboratoire sont indiqués dans la Figure 6. Avec un mode de compactage statique et une densité de 95% la perméabilité dépasse légèrement le seuil de 1.10^{-8} m/s pour les deux limons A1 et A2. Avec une densité supérieure à 95 % de p_{dOPN} , la perméabilité passe sous le seuil 1.10^{-8} m/s même avec un compactage statique.

Pour les deux limons et les différents traitements, le seuil de 1.10^{-8} m/s est atteint pour une densité minimale de 95 % p_{dOPN} et un compactage dynamique du côté humide de l'OPN ($w_{OPN} + 1$ %). Par ailleurs, le compactage dynamique permet d'atteindre des perméabilités de l'ordre de 1.10^{-9} m/s, même sans l'ajout d'un produit argileux.

Ainsi, pour des modalités de mise en place identiques (à savoir : mode de compactage, teneur en eau et densité) l'ajout du produit de traitement permet une réduction de la perméabilité de moins d'un ordre de grandeur.

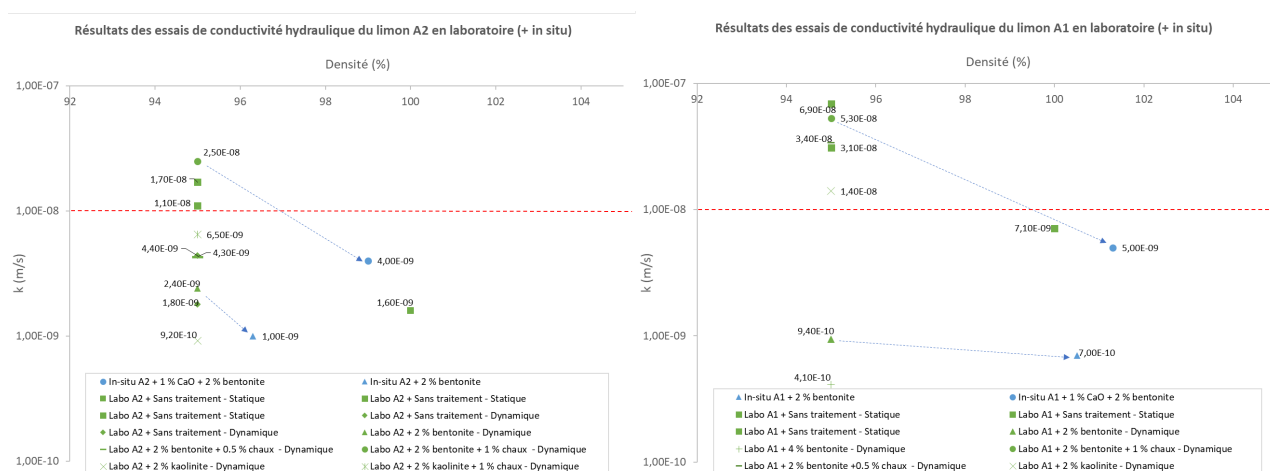


Figure 6. Résultats des essais de conductivité hydraulique en laboratoire sur les limons A1 et A2 (avec ajout des mesures in situ).

3.2. Couche de protection

Les résultats sur les formulations destinées à la couche de protection sont donnés dans le Tableau 4. Le limon A1 traité à la chaux vive et au liant hydraulique présente des résistances à la compression simple R_c de l'ordre de 3 MPa, une résistance à la traction indirecte R_{tb} variant de 0,33 à 0,51 MPa et des modules E_{tb} de l'ordre de 3500 à 5000 MPa à 90 jours de cure, selon le dosage en liant utilisé. Par ailleurs, l'ensemble des éprouvettes n'a présenté aucune érosion à la fin des JET, la contrainte critique τ_c étant estimée à 1200 Pa minimum.

La craie traitée au liant hydraulique présente des R_c variant de 1,57 à 2,37 MPa à 90 jours de cure, des R_{tb} variant de 0,35 à 0,43 MPa et des modules E_{tb} de 3820 à 4575 MPa à 90 jours de cure, selon le dosage du liant utilisé. A dosage équivalent, l'augmentation du taux de compactage permet une augmentation du couple (R_{tb} ; E_{tb}). Pour l'ensemble des modalités testées, aucune érosion n'a été observée à la fin des JET, la valeur de τ_c étant estimée à 1100 Pa minimum.

Tableau 4. Résultats des essais pour les formulations de la couche de protection en laboratoire.

Modalité	R_c (MPa)**	k (m/s)	R_{tb} ; E_{tb} (MPa) (90j)**	JET
A1 + 1 % CaO + 4 % liant, 95 % ρ_{dOPN}	2,97 (60j)	$1,1 \cdot 10^{-8}$	0,33 / 3469	Pas d'érosion*
A1 + 1 % CaO + 5 % liant, 95 % ρ_{dOPN}	3,30 (60j)	/	0,43 / 4456	Pas d'érosion*
A1 + 1 % CaO + 5 % liant, 98 % ρ_{dOPN}	3,47 (60j)	/	0,51 / 4934	Pas d'érosion*
A1 + 1 % CaO + 6 % liant, 95 % ρ_{dOPN}	/	/	0,51 / 4164	Pas d'érosion*
Craie + 4 % liant, 98% ρ_{dOPN}	1,57 (90j)	$9,3 \cdot 10^{-9}$	0,35 / 3820	Pas d'érosion*
Craie + 5 % liant, 98% ρ_{dOPN}	1,83 (90j)	/	0,36 / 4480	Pas d'érosion*
Craie + 5 % liant, 100% ρ_{dOPN}	/	/	0,43 / 4575	Pas d'érosion*
Craie + 5 % liant, 98% ρ_{dOPN}	2,37 (90j)	/	0,39 / 4367	Pas d'érosion*

* limite du dispositif atteinte, contrainte critique estimée > 1200 Pa minimum.

** valeur moyenne sur trois éprouvettes.

4. Résultats des essais in situ

Les résultats des planches expérimentales d'étanchéité sont donnés dans le Tableau 5. Toutes les couches ont été compactées à une teneur en eau située du côté humide de l'OPN et à une densité moyenne minimale de 96,3 % ρ_{dOPN} . Dans ces conditions, k obtenue est de l'ordre de $1 \cdot 10^{-9}$ m/s pour les planches initiales P1 à P3. La planche finale P4, constituée du limon A1 traité avec 2 % de bentonite, présente une perméabilité de l'ordre de $1 \cdot 10^{-10}$ m/s respectant ainsi le seuil maximal de $1 \cdot 10^{-8}$ m/s sur une épaisseur de 40 cm.

Tableau 5. Résultats des essais de perméabilité in situ sur les couches d'étanchéité.

	Traitement	Epaisseur (cm)***	Densité** (% ρ_{dOPN})	w visée (%)	w obtenue (%)	k (m/s)*
P1	A2 + 1 % CaO + 2 % bentonite	35	99,0	19,1 + 1 à 2 %	21,2	$4,0 \cdot 10^{-9}$
P2	A2 + 2 % bentonite	42	96,3	15,7 + 1 à 2 %	16,4	$1,0 \cdot 10^{-9}$
P3	A1 + 1 % CaO + 2 % bentonite	36	101,3	18,5 + 1 à 2 %	≈ 18,5	$5,0 \cdot 10^{-9}$
P4	A1 + 2 % bentonite	37	100,5	15,2 + 1 à 2 %	16,4	$7,0 \cdot 10^{-10}$
P7-1	A1 + 2 % bentonite	≈ 40	100,4	15,2 + 1 à 2 %	16,8	/

* valeur moyenne arithmétique sur 4 à 5 essais.

** valeur moyenne arithmétique calculée par rapport à ρ_{dOPN} pour chaque modalité de traitement.

*** valeur moyenne arithmétique après recoupe.

Le Tableau 6 donne les résultats des essais réalisés sur les couches de protection in situ. Toutes les couches ont été compactées à une teneur en eau avoisinant w_{OPN} et à une densité moyenne minimale de 95,7 % ρ_{dOPN} . Les essais de portance donnent des valeurs immédiates EV2 de l'ordre de 42 MPa qui tendent ensuite à augmenter au cours du temps avec des valeurs maximales de 235 MPa après 7 jours de cure sur la planche P6. Les mesures de déflexion ont été réalisées après 7 jours de cure et donnent une valeur de

0,27 mm pour la craie traitée (P6) et 1,08 mm pour le limon traité (P5). Les JET en fond du bassin (P5 et P6) et sur les talus (P7 et digues du bassin n°1) n'ont montré aucune érosion (limite de mesure du dispositif JET). Les conditions de réalisation des essais ont permis d'estimer une contrainte critique minimale d'environ 200 Pa, caractérisant l'état initial non érodable des matériaux des couches de protection.

Tableau 6. Résultats des essais in situ sur la couche de protection.

	Modalité	Epaisseur (cm)	Densité*** (% ρ_{dOPN})	w (%)	EV2 (MPa)**	Déflexion (mm)**	JET
P5-1	A1 + 1 % chaux + 5 % liant	32	99,1	16,5	/	/	/
P5-2	A1 + 1 % chaux + 5 % liant	26	95,7	16,5	69 (3j)	1,08	Pas d'érosion
P6-1	Craie + 5 % liant	25	101,4	23,2	/	/	/
P6-2	Craie + 5 % liant	36	102,9	23,2	235 (7j)	0,27	Pas d'érosion
P7-2/1	A1 + 1 % chaux + 5 % liant	30	98,7	17,0	42(0j)*	/	/
P7-2/2	A1 + 1 % chaux + 5 % liant	30	96,7	17,0	44(0j)*	/	/
Digues	A1 + 1 % chaux + 5 % liant	Variable	97,2	18,4	97	/	Pas d'érosion

* valeur mesurée avec une mini plaque en partie inclinée du talus.

** valeur moyenne arithmétique mesurée sur 6 essais (incluant les minimas extrêmes).

*** valeur moyenne arithmétique calculée par rapport à ρ_{dOPN} pour chaque modalité de traitement.

Au-delà de la quantification des caractéristiques hydromécaniques des couches, la réalisation des planches expérimentales a été l'occasion de proposer des solutions pour la gestion des problématiques de mise en œuvre rencontrées in situ lors de la réalisation des planches expérimentales. Quelques problématiques sont listées ci-dessous et les solutions pour y remédier sont aussi indiquées, à titre d'exemple :

- La perte de teneur en eau liée à un état hydrique initial très sec, au processus l'hydratation des produits de traitement et/ou aux conditions météorologiques évaporantes. Un protocole de gestion de la teneur en eau a été élaboré afin de gérer la teneur en eau avant, durant et après la mise en œuvre. Les moyens d'incorporation d'eau ont été adaptés à chaque stade (arroseuse enfouisseuse, injection sous cloche du malaxeur ou rampe d'arrosage déportée) ;
- L'apparition de fissures de retrait (dessiccation) liées à la non-protection des couches. Ces fissures de surface ont été observées sur les planches initiales après avoir été laissées en place sans protection sous fortes températures. La solution proposée vise à protéger ces couches immédiatement après leur mise en place afin de maintenir l'état hydrique ;
- L'apparition du matelassage/feuilletage liée à un compactage intense d'un matériau présentant une teneur en eau supérieure à w_{OPN} . Ce phénomène mécanique bien connu a été géré par un suivi de l'évolution de l'état de surface après chaque passe de compacteur et par la détermination du nombre maximal de passes à ne pas dépasser pour chaque formulation.

5. Comparaison des résultats en laboratoire et in situ

Pour les couches d'étanchéité : plusieurs formulations ont été étudiées et quelques formulations ont été testées en laboratoire et in situ. La perméabilité obtenue in situ est globalement majoritairement inférieure d'environ un ordre de grandeur à celle obtenue en laboratoire. Cette différence est attribuée à deux facteurs : la densité et le mode de compactage in situ, qui reste relativement difficile à reproduire au laboratoire. En effet, à densité équivalente, le pétrissage du matériau par l'action d'un compacteur à pieds dameurs affecte la microstructure du limon traité et induit donc une diminution de la perméabilité.

Pour les couches de protection : les résultats obtenus sur les limons traités in situ par des essais au pénétromètre dynamique (Figure 6) confirment les bonnes performances mécaniques du limon traité obtenues en laboratoire (Tableau 5). Des résultats similaires ont

été observés sur la craie traitée. Concernant la résistance à l'érosion des matériaux traités, les essais in situ confirment le caractère non érodable du limon traité et de la craie traitée.

6. Evolution des paramètres de sol dans le temps

Une campagne de mesures in situ a été réalisée après 1 an d'immersion. Des fouilles en gradins ont été réalisées afin d'accéder aux couches à différentes profondeurs.

L'examen visuel de l'état du bassin montre l'absence de dégradation de l'état de surface du fond du bassin. Sous l'enduit de cure gravillonné, les matériaux restent intacts. Par ailleurs, la réalisation des fouilles a été rendue très difficile par la dureté des matériaux, témoignant d'un bon comportement mécanique. Au-delà de ces constats qualitatifs, des essais au pénétromètre dynamique lourd ont été réalisés de façon identique à la campagne initiale. Les résultats illustrés dans la Figure 7 pour les digues en limons traités montrent une augmentation de la résistance mécanique en comparaison à la campagne de 2020 avec un refus systématique pour la totalité des essais à des profondeurs variables. Un comportement similaire a été observé sur la couche de protection en craie traitée.

Le dispositif de mesure JET a été amélioré entre la campagne de 2020 et 2021 afin d'appliquer des contraintes hydrauliques plus élevées sur les matériaux de la CP (Tableau 7). Malgré cette optimisation, les matériaux traités restent non érodables sous une vitesse de jet d'environ 20 m/s, avec une contrainte critique minimale estimée à 2000 Pa. Le limon et la craie traités restent donc non érodables après 1 an d'immersion.

Concernant les couches d'étanchéité, des mesures additionnelles ont été réalisées 1 an après et montrent des perméabilités inférieures à $5,2 \cdot 10^{-9}$ m/s. La perméabilité exacte n'a pas pu être mesurée car les essais ont été conduits sur des temps courts et avant d'atteindre l'asymptote d'injection. Les valeurs de perméabilité réelles sont donc inférieures aux valeurs indiquées dans le Tableau 7.

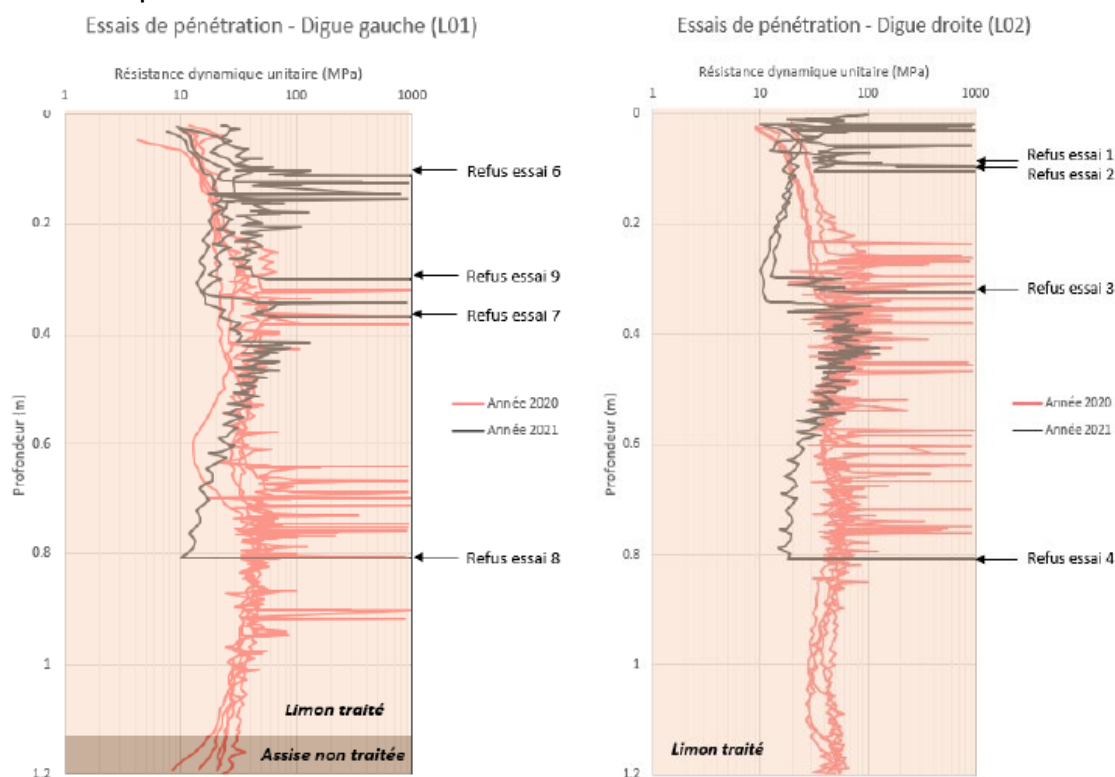


Figure 7. Comparaison des mesures de résistances de pointe dynamiques après 1 an d'immersion (essai au pénétromètre Sedidril Géotool © selon la norme NF P94-063).

Tableau 7. Evolution des caractéristiques après 1 an d'immersion

	Initiale		Après 1 an d'immersion	
	k (m/s)*	JET	k (m/s)*	JET
A1 +2 % bentonite	$\approx 7,0.10^{-10}$	/	$< 5,2.10^{-9}$	/
A1 + 1 % CaO + 5 % liant	$3,0.10^{-8}$	Pas d'érosion $\tau_c > 200$ Pa	$< 1,5.10^{-8}$	Pas d'érosion / $\tau_c > 2000$ Pa Vitesse d'impact ≈ 20 m/s
Craie + 5 % liant	$1,5.10^{-9}$	Pas d'érosion $\tau_c > 180$ Pa	$< 5,1.10^{-10}$	Pas d'érosion / $\tau_c > 1600$ Pa Vitesse d'impact ≈ 20 m/s

7. Conclusion

Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude montrent qu'il est possible d'aboutir à des formulations de traitement permettant de répondre aux critères requis pour chaque couche du DEC en sols traités. De plus, les planches expérimentales et les ouvrages pilotes ont permis de montrer que ces résultats sont atteignables, à l'échelle d'un ouvrage, même dans conditions météorologiques évaporantes et défavorables. Ce type de DEC est donc faisable et viable. Les résultats après 1 an d'immersion montrent la bonne tenue et la pérennité des performances hydrauliques et mécaniques initiales. Le suivi à long terme de l'état des planches permettra de valider la bonne tenue dans le temps des performances obtenues.

Néanmoins, l'obtention des performances requises pour un DEC en sols traités passe obligatoirement par la maîtrise des conditions de réalisation à chaque étape (identification des gisements, réalisation de planches d'essais, contrôle continu durant toutes les étapes, respect des dispositions constructives...). Par ailleurs, la mise en place d'un DEC en sols traités doit s'accompagner impérativement de dispositions constructives spécifiques à ce type de structure. A titre d'exemple, il s'agit de mettre en place des moyens de protection immédiate contre le séchage et l'apparition des fissures de dessiccation. A cela s'ajoute les dispositions constructives usuelles aux travaux de terrassement et de traitement de sols.

8. Références bibliographiques

- Charles I., Herrier G., Chevalier C., Durand E. (2013). La digue expérimentale du CER de Rouen : un ouvrage hydraulique en vraie grandeur en sol traité à la chaux. Digue Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions.
- Daoud, F. (1996). La perméabilité des sols fins compactés. Thèse de doctorat, INPL - France, 193 p.
- INRAE (2019) Mode opératoire du Jet Erosion Test. OHAX_PRT_520.
- LCPC–SETRA. 2000. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme (GTS).
- Mehenni, A. (2015). Comportement hydromécanique et érosion des sols fins traités, Thèse de doctorat, Université de Lorraine - France, 249 p.
- Mehenni A., Cuisinier O., Masrouri F., Le Borgne T., Lavallée E., Bonne S. (2015). The long term behaviour of hydro-mechanical treated-soil structures. Proceedings XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 2817–2822.
- Mehenni A., Cuisinier O., Masrouri F. (2016). Impact of lime, cement and clay treatments on the erodibility of soils. Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 28 (9).
- Mitchell, J.K., Hooper, D.R., & Campanella, R.G. (1965). Permeability of compacted clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 91, pp.41–65.
- Nerincx N., Bonelli S., Cornacchioli F., Fry J.J., Herrier G., Mercier F., Nicaise S., Puiatti D., Richard J.M., Tachker P. (2017). Tronçons de digue résistant à la surverse : quantification de la résistance à l'érosion interne et à l'érosion de surface dans le cadre du projet Digue ELITE Colloque CFBR-SHF, Hydraulique des barrages et des digues.