



**HAL**  
open science

# Étude de la réalisation de dispositif d'étanchéité complet par traitement in situ des matériaux : performances et retour d'expérience

Lucile Saussaye, Gaëtan Potié, Véronique Berche, Dimitri Mercadier, Raphaël Benot, Abdelwadoud Mehenni, Cédrine Alléon

## ► To cite this version:

Lucile Saussaye, Gaëtan Potié, Véronique Berche, Dimitri Mercadier, Raphaël Benot, et al.. Étude de la réalisation de dispositif d'étanchéité complet par traitement in situ des matériaux : performances et retour d'expérience. Colloque Dignes 2024, Inrae, Mar 2024, Aix-en-Provence, France. 10.5281/zenodo.10625550 . hal-04536065

**HAL Id: hal-04536065**

**<https://hal.science/hal-04536065>**

Submitted on 7 Apr 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Étude de la réalisation de dispositif d'étanchéité complet par traitement in situ des matériaux : performances et retour d'expérience

## *Construction of a complete sealing system using in situ treatment of materials: design of a monitoring system*

**L. Saussaye<sup>1</sup>, G. Potié<sup>2</sup>, V. Berche<sup>2</sup>, D. Mercadier<sup>3</sup>, R. Benot<sup>4</sup>, A. Mehenni<sup>5</sup>, C. Alléon<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Cerema, équipe de recherche ENDSUM, Blois, France, [lucile.saussaye@cerema.fr](mailto:lucile.saussaye@cerema.fr)

<sup>2</sup> Société du Canal Seine-Nord Europe, Compiègne, France, [gaetan.potie@scsne.fr](mailto:gaetan.potie@scsne.fr)

<sup>3</sup> Cerema, Rouen, France, [dimitri.mercadier@cerema.fr](mailto:dimitri.mercadier@cerema.fr)

<sup>4</sup> Cerema, St-Brieuc, France, [raphael.benot@cerema.fr](mailto:raphael.benot@cerema.fr)

<sup>5</sup> Bouygues Travaux Publics, Gyancourt, France, [a.mehenni@bouygues-construction.com](mailto:a.mehenni@bouygues-construction.com)

<sup>6</sup> ISL, Lille, France, [alleon.isl.fr](mailto:alleon.isl.fr)

### Résumé

Dans le cadre des études de conception du Canal Seine-Nord-Europe, la Société du Canal Seine-Nord Europe (SCSNE) envisage la possibilité de réemployer les sols présents dans la trace du canal, limons et craies, traités avec des argiles et/ou de la chaux vive et/ou des liants hydrauliques, pour constituer un dispositif d'étanchéité complet (DEC), associant une couche d'étanchéité et une couche de protection. Ce type de dispositif pourrait aisément être transposé et appliqué au cas des digues de protection contre les inondations, bien que celles-ci ne soient pas en charge en permanence.

La SCSNE a ainsi confié la réalisation de planches d'essais en limon et en craie traités au groupement d'entreprise Bouygues Travaux Publics, ISL Ingénierie, Razel-Bec, en collaboration avec Ramery Travaux Publics et Unisol, afin de vérifier la faisabilité d'un tel dispositif, à la fois en termes d'exécution, de perméabilité et d'érodabilité, à court et à long termes (durabilité). Ces planches d'essais ont été réalisées en septembre-octobre 2020. Un bassin a également été créé à l'aide de digues de ceinture en sols traités afin de pouvoir mettre en charge hydrauliquement le DEC (hauteur d'eau de 1 m). Les performances du DEC ont été contrôlé tout au long de sa réalisation puis 1 an après son immersion. Les résultats obtenus sur le DEC en limons traités sont présentés dans cet article.

L'Université Gustave Eiffel et le Cerema ont complété la démarche en associant un contrôle non destructif à long terme de l'homogénéité et de l'étanchéité du DEC et des remblais de ceinture du bassin par une instrumentation et l'érodabilité de limons traités à la chaux et au liant hydraulique par des essais d'érosion de type Mobile Jets Erosion Test (MoJET), afin de capitaliser des informations sur le comportement des planches d'essais en sols traités réalisées à long terme et de définir des méthodes adaptées au contrôle des propriétés du DEC. L'instrumentation est constituée de sondes mesurant la température, la teneur en eau volumique et la succion des matériaux ainsi que de lignes électriques mesurant leur résistivité électrique. L'un des objectifs recherchés est de détecter le front de propagation de l'eau dans les couches du DEC. Une station météorologique permet d'évaluer l'évolution des paramètres enregistrés par rapport aux variations des conditions

météorologiques. Quelques résultats de ce suivi complémentaire sur le DEC en limons traités sont également présentés dans cet article. De nouvelles expérimentations sont programmées en 2023 afin de dégrader le DEC et de vérifier si l'instrumentation en place permet de détecter les défauts générés.

### Mots-clés

étanchéité, protection, sols traités, bentonite, liant hydraulique

### Abstract

As part of the design studies for the Seine-North Europe Canal, the Seine-North Europe Canal Society (SCSNE) is considering the possibility to reuse the soils present in the canal's footprint, silt and chalk, treated with clay and/or quicklime and/or hydraulic binders, to form a complete sealing system, combining a sealing layer and a protection layer. This type of device could easily be transposed and applied to flood protection dikes, although they are not permanently loaded.

SCSNE assigned to the Bouygues Travaux Publics, ISL Ingénierie and Razel-Bec consortium, in collaboration with Ramery Travaux Publics and Unisol, to lead large-scale trial in treated silt and chalk, in order to verify the feasibility of such a system, both in terms of execution, permeability and erodibility, in the short and long terms (durability). These tests were carried out in September-October 2020. A basin was also created using treated soil embankments to apply a hydraulic load to the complete sealing system (1 m water head). The system performance was monitored throughout its construction and 1 year after immersion. The results obtained with treated silts are presented in this article.

The Gustave Eiffel University and Cerema completed the process by combining long-term non-destructive testing of the homogeneity and sealing of the complete sealing system and the basin's surrounding embankments with instrumentation and the erodibility of lime and hydraulic binder treated silts with Mobile Jets Erosion Test (MoJET), in order to capitalize on the long-term behavior of the treated soils and define suitable methods for monitoring system properties. The instrumentation consists of probes measuring temperature, volumetric water content and material suction, as well as electrical lines measuring electrical resistivity. One of the objectives is to detect the water propagation front in the complete sealing system layers. A meteorological station is used to evaluate the evolution of recorded parameters in relation to variations in metrological conditions. Some of the results of this additional monitoring of the treated silts are also presented in this article. New experiments are scheduled for 2023 to degrade the protection layer and check whether the in situ instrumentation is able of detecting the generated failures.

### Key Words

sealing, protection, treated soils, bentonite, hydraulic binder

## Introduction

Le Canal Seine-Nord Europe (CSNE) est le chaînon manquant permettant 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-Escaut.

La conception des dispositifs d'étanchéité prend en compte des enjeux exceptionnels tels que, par exemple :

- la maîtrise des pertes par infiltrations, lesquelles doivent rester en deçà d'une valeur de  $0,62 \text{ m}^3/\text{s}$  pour tout l'ouvrage ;
- la durée de vie attendue, qui doit être supérieure à 75 ans.

Des détails sur le projet sont disponibles sur le site internet du projet [1] ainsi que dans une autre communication de ce colloque [2].

La Société du Canal Seine-Nord Europe (SCSNE) a souhaité compléter les données d'entrée sur les dispositifs d'étanchéité en lançant un marché de prestation intellectuelle pour valider les couches d'étanchéités et de protection en matériaux naturels (in situ). L'objectif de ce marché est de proposer une ou des solutions de Dispositif d'Etanchéité Complet (DEC) à base de limons ou de craie, traités ou non à la bentonite, à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Ce type de dispositif est transposable aux digues de protection contre les inondations, sur le talus côté eau, afin de remplir une fonction d'étanchéité.

Le marché a été remporté par le groupement d'entreprise Bouygues Travaux Publics, ISL Ingénierie, Razel-Bec en collaboration avec Ramery Travaux Publics et Unisol et dont Bouygues Travaux Publics est mandataire. Le marché vise à vérifier les objectifs de conductivité hydraulique, d'érodabilité et de durabilité. Il permet également d'anticiper la réalisation de tel dispositif à l'échelle d'un grand projet linéaire comme le CSNE. L'Université Gustave Eiffel et le Cerema ont complété les essais effectués in situ et en laboratoire dans le cadre de ce marché en instrumentant les planches d'essais.

Le dispositif complet d'étanchéité (DEC) envisagé est constitué de deux couches distinctes, ayant des fonctionnalités différentes et complémentaires (Figure 1) :

- la couche d'étanchéité (CE) : la fonction principale de cette couche est de garantir l'étanchéité du complexe en respectant un critère de conductivité hydraulique inférieure à  $1.10^{-8} \text{ m/s}$  sur une épaisseur de 40 cm ;
- la 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. Schéma du dispositif d'étanchéité complet.

Le présent article cible les résultats obtenus sur la planche d'essais horizontale du DEC en limons traités, en se concentrant notamment sur le volet expérimental in situ et sur les résultats obtenus. L'ensemble des résultats présentés permet d'appréhender la mise en œuvre de ce type de dispositif d'étanchéité pour une digue de protection contre les inondations.

### Conception du dispositif d'étanchéité complet en limons traités

#### *Définition de la formulation et des modalités de mise en œuvre des couches d'étanchéité et de protection*

L'objectif visé lors de la conception des planches d'essais était de déterminer les formulations de traitement adéquates pour chacune des couches constituant le DEC et leurs modalités de mise en œuvre afin de s'assurer de l'obtention des critères requis à l'échelle de l'ouvrage. Pour répondre à cet objectif, la stratégie adoptée est de mener, dans un premier temps, une étude de traitement de sols complète en laboratoire, puis, dans un second temps, afin de valider les résultats obtenus en laboratoire, de réaliser plusieurs planches expérimentales et des ouvrages pilotes (bassins de rétention d'eau). Ces planches ont fait l'objet d'un suivi attentif lors de leur exécution puis à différentes échéances afin d'évaluer leur évolution dans le temps.

Les travaux de terrassement liés au canal et à ses ouvrages connexes s'inscrivent dans le contexte géologique des limons lœssiques des plateaux (LP) et des craies du Campanien. Les limons sont présents sur une profondeur variable, avec une moyenne de 5 à 8 m. Ces matériaux limoneux sont soit légèrement argileux en surface (classe GTR A2) soit plus limoneux en profondeur (classe GTR A1).

Suite aux essais en laboratoire [3-7], pour la couche d'étanchéité, un traitement du limon A1 à la bentonite calcique est retenu. Pour la couche de protection, un traitement du limon A1 à la chaux et au liant hydraulique routier (LHR), de type ROC AS, est retenu.

#### *Instrumentation du DEC en limons traités*

Afin de réaliser le suivi de l'étanchéité du DEC en limons traités, il a été convenu d'installer au mur et au toit de la couche d'étanchéité :

- une sonde TDR afin de mesurer la teneur en eau volumique et la température (points rouges sur la Figure 3, Figure 2) ;
- une sonde de succion afin de mesurer la tension de l'eau dans les matériaux en place (points rouges sur la Figure 3, Figure 4).

De plus, à l'interface entre le sol support, en limon traité à la chaux, et la couche d'étanchéité, il a été mis en place une ligne électrique de 14 m de longueur (point vert sur la Figure 3). La ligne est équipée de 21 électrodes (capteurs électriques) espacés de 70 cm reliées par un câble (flûte) électrique (Figure 5, Figure 6).

Enfin, une station météorologique, constituée d'un thermomètre, d'un pluviomètre et d'un anémomètre a été mise en place sur le site, afin d'interpréter les mesures des capteurs au regard des variations de l'environnement auquel est soumis le DEC.

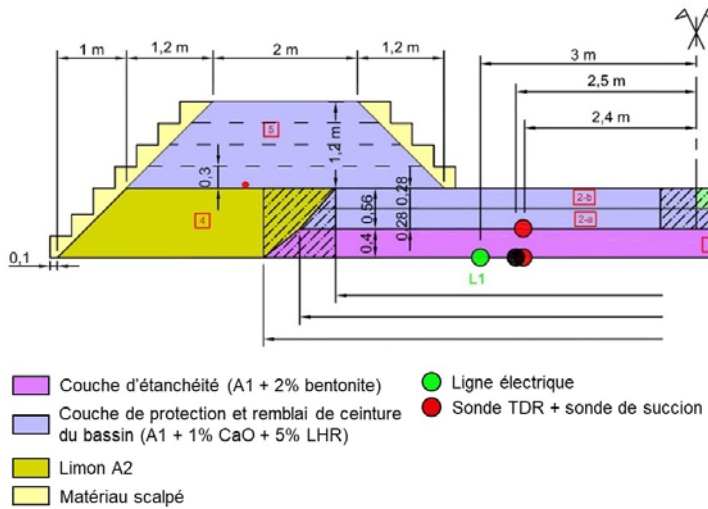


FIGURE 3. Schéma de l'instrumentation.



FIGURE 2. Sonde de teneur en eau volumique et de température trime Pico 64 de IMKO.



FIGURE 4. Sonde de succion 253 de Campbell Scientific.



FIGURE 5. Ligne électrique.



FIGURE 6. Électrode - boucle de connexion.

Dans le cas présent, la ligne électrique n'a pas d'électrode (piquets), mais des boucles de connexion. Les flûtes sont enterrées dans le sol et les contacts se font tous les 70 cm au niveau des boucles de connexion (Figure 5, Figure 6). Du fait de cette configuration, les lignes de courant se situent autour des flûtes et la mesure concerne un volume (« cylindre ») autour des flûtes d'environ 2,8 m de rayon.

Les représentations des mesures de résistivités obtenues se basent sur une inversion pour un modèle « 2D » avec la mesure à partir de la surface. Dans le cas présent, la ligne est placée dans le DEC dans un contexte « 3D ». L'inversion est tout de même réalisée pour permettre une comparaison des profils de mesures dans le temps, en fonction des phases de remplissage et de vidange.

La combinaison des capteurs constituant l'instrumentation a pour objectif de détecter le front de propagation de l'eau présente dans le DEC lors de sa mise en charge (bassin rempli avec 1 m d'eau). En effet, le passage de l'eau à travers le DEC pourrait ainsi se traduire par une augmentation de la teneur en eau volumique selon le degré de saturation de la couche d'étanchéité,

une diminution de la température, sous réserve d'un contraste entre les couches du DEC et l'eau, et/ou par une augmentation de conductivité électrique. Ainsi, de manière indirecte, l'instrumentation permet d'évaluer la perméabilité du DEC.

### Réalisation du dispositif d'étanchéité complet en limons traités in situ

#### *Caractéristiques de mise en œuvre du DEC*

La couche d'étanchéité (correspondant à la planche P4) est constituée de limon A1 traité avec 2 % de bentonite sur une épaisseur de 37 cm. Elle a été mise en œuvre avec 1 passe de compacteur VP5 et 3 passes de compacteur V5.

Elle a été compactée à une teneur en eau de 16,4 %, proche de  $w_{OPN}+1\%$  (côté humide de la teneur en eau à l'optimum Proctor normal), et à 99 %  $\rho_{dOPN}$  (masse volumique sèche à l'optimum Proctor normal), soit une masse volumique sèche de 1,70 t/m<sup>3</sup>.

Elle présente une perméabilité de l'ordre de  $1.10^{-10}$  m/s, respectant ainsi le seuil de  $1.10^{-8}$  m/s sur une épaisseur équivalente de 40 cm.

La couche de protection (correspondant à la planche P5) est constituée de limon traité à 1 % de chaux vive et 5 % de LHR, en deux couches. La couche inférieure, de 32 cm d'épaisseur, a été mise en œuvre avec 4 passes de compacteur V5. La couche supérieure, de 26 cm d'épaisseur, a été mise en place avec 3 passes de compacteurs VP5 et 1 passe de compacteur V5.

Elles ont été compactées à  $w = 16,5$  %, proche de  $w_{OPN}$ , et à 99 et 96 %  $\rho_{dOPN}$  respectivement, soit 1,70 et 1,65 t/m<sup>3</sup>.

Les mesures de déflexion ont été réalisées après 7 jours de cure et donnent une valeur de 1,08 mm.

Les mesures au pénétromètre Panda, réalisés après 7 jours de cure, ont montré un refus systématique. Le choix a été orienté par la suite à des essais de type pénétromètre dynamique lourd (mouton de 64 kg suivant la norme NF P94-063). Les résultats montrent de fortes résistances en pointe avec des valeurs variant entre 20 et 100 MPa.

Plusieurs essais d'érodabilité de type Jet Erosion Test (JET) ont également été réalisés sur la couche de protection. La limite de mesure du dispositif JET a été atteinte sans pouvoir provoquer l'érosion des matériaux. Les conditions de réalisation des essais ont permis d'estimer une contrainte critique minimale d'environ 200 Pa, caractérisant ainsi l'état initial non érodable des matériaux des couches de protection en limon traité à la chaux et au LHR.

Pour plus de précisions sur la réalisation des planches d'essais et sur les résultats obtenus lors de l'exécution des planches d'essais, les auteurs recommandent de consulter les communications et de publications existantes [3-7].

#### *Gestion des spécificités de réalisation du DEC : enseignements des planches d'essais*

Au-delà de la détermination des caractéristiques hydromécaniques in situ des couches du dispositif d'étanchéité complet, la réalisation des planches expérimentales a été l'occasion de proposer des solutions pour la gestion des problématiques de mise en œuvre rencontrées lors de la réalisation des planches expérimentales. Il a par exemple été constaté la nécessité d'anticiper les besoins en eau pour l'hydratation des produits de traitement, pour un sol présentant un état hydrique initial très sec, mis en œuvre dans des conditions météorologiques évaporantes. L'assèchement a un effet préjudiciable car il change l'état du matériau traité pendant le compactage et peut conduire à un

écart important par rapport aux paramètres d'état visés, donc par rapport aux performances hydromécaniques attendues. 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, en adaptant les matériels à chaque étape (arroseuse enfouisseuse, injection sous cloche du malaxeur ou rampe d'arrosage déportée).

Au contraire, lorsque la teneur en eau du sol traité est supérieure à  $w_{OPN}$ , un matelassage et/ou un feuilletage lié à un compactage intense du matériau est observé. 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 type de matériau mis en œuvre.

Enfin, après la réalisation des planches d'essais pour la couche d'étanchéité, restées exposées à leur environnement, sans protection, des fissures de retrait (dessiccation) sont apparues. Cela reflète la nécessité de protéger ces couches immédiatement après leur mise en place afin de maintenir leur état hydrique. Plusieurs techniques de protection peuvent être employées : mise en place d'un enduit de cure, arrosage de surface pour le maintien de l'humidité, mise en place immédiate des couches suivantes... Les planches protégées n'ont présenté aucune fissure lors de leur mise en œuvre puis lors de leur observation après 1 an d'immersion, au sein de fouilles réalisées à la pelle mécanique.

### Évolution des matériaux du DEC en limons traités après la mise en eau du bassin

#### *Performances mécaniques et hydrauliques du DEC après 1 an d'immersion*

Suite à leur exécution, les planches d'essais ont été entourées par un remblai de ceinture en limon traité à 1 % Ca O + 5% LHR, afin de constituer un bassin. Environ 1 mois après sa réalisation, le dispositif d'étanchéité complet, constitué de la couche d'étanchéité et de la couche de protection en limon traité, a été mis en charge avec un niveau d'eau d'environ 1 m dans le bassin. L'objectif est alors d'observer l'évolution des caractéristiques hydromécaniques et de résistance à l'érosion de la couche de protection après 1 an d'immersion.

Le niveau d'eau a fait l'objet d'un suivi régulier et un remplissage a été effectué lorsque le niveau d'eau a été jugé trop bas (perte par évapotranspiration sur une longue période).

Un an après la mise en eau, une vidange du bassin est opérée et une nouvelle campagne de mesures in situ est réalisée, ciblée sur la couche de protection. L'examen visuel du fond du bassin montre l'absence de dégradation des matériaux, qui sont restés intacts sous l'enduit de cure.

Des fouilles en gradins sont réalisées afin d'accéder aux couches à différentes profondeurs. La difficulté de réalisation des fouilles indique une bonne performance mécanique de la couche de protection.

Le dispositif de mesure JET (Figure 7a) a été amélioré afin d'appliquer des contraintes hydrauliques plus élevées sur les matériaux de la couche de protection. Chaque planche a fait l'objet de 4 essais JET. Malgré cette optimisation, les matériaux traités restent non érodables sous une vitesse de jet d'environ 20 m/s sur tous les essais réalisés. En absence d'érosion, la contrainte critique a été estimée à 2000 Pa minimum. Le limon traité reste donc non érodables après un an d'immersion.

La perméabilité de la couche de protection (Figure 7b) a été utilisée comme indicateur de durabilité. Les résultats des mesures de perméabilité sur la couche d'étanchéité et la couche de protection récapitulés dans le Tableau 1 montrent que les valeurs mesurées sont satisfaisantes après



1 an d'immersion vis-à-vis du critère de conductivité hydraulique inférieure à  $1.10^{-8}$  m/s sur une épaisseur de 40 cm recherché (pour la couche d'étanchéité, même ordre de grandeur que les valeurs issues des mesures initiales, avant immersion).

TABLEAU 1. Évolution de la perméabilité des couches du DEC.

Couche	Étanchéité Limon A1 + 2% bentonite		Protection Limon A1 + 1% CaO + 5% LHR
	Contrôle d'exécution	Après 1 an d'immersion	Après 1 an d'immersion
Mesure 1 (m/s)	$7,2.10^{-10}$	$< 9,9.10^{-9}$	$< 4,6.10^{-8}$
Mesure 2 (m/s)	$9,1.10^{-10}$	$< 8,2.10^{-9}$	$< 1,0.10^{-8}$
Mesure 3 (m/s)	$3,5.10^{-10}$	$< 1,1.10^{-9}$	$< 1,0.10^{-8}$
Mesure 4 (m/s)	-	$< 2,0.10^{-9}$	$< 6,3.10^{-10}$
Perméabilité moyenne k (m/s)	$6,6.10^{-10}$	$< 5,3.10^{-9}$	$< 1,7.10^{-8}$
Écart-type (m/s)	$2,9.10^{-10}$	$4,4.10^{-9}$	$2,0.10^{-8}$

Les sondages au pénétromètre dynamique lourd confirment un refus systématique à une profondeur inférieure à 50 cm. Aucun sondage n'a pu traverser la totalité de la couche et atteindre la couche d'étanchéité.

Afin d'examiner la tenue aux chocs de la couche de protection, deux essais particuliers ont été réalisés. Le premier essai concerne la chute d'une ancre de 800 kg depuis une hauteur d'environ 4 m, sur la couche de protection, en absence d'eau (Figure 7c). Ces conditions d'essai constituent un cas extrême et très défavorable car, en conditions réelles, la présence d'une colonne de 5 m d'eau apporte un amortissement considérable à l'ancre lors de sa chute. Malgré ces conditions très pénalisantes, les matériaux ont montré une excellente tenue aux chocs de l'ancre, avec une profondeur d'impact de 4 à 6 cm maximum.

Le second essai consiste à traîner l'ancre sur la couche de protection avec une vitesse d'environ 4 km/h, en l'absence d'eau. À nouveau, cette configuration est très pénalisante car en situation réelle, l'ancre serait traînée sous eau, avec un effet d'amortissement évident. La couche de protection en limon traité n'a quasiment pas été dégradée lors de l'essai.

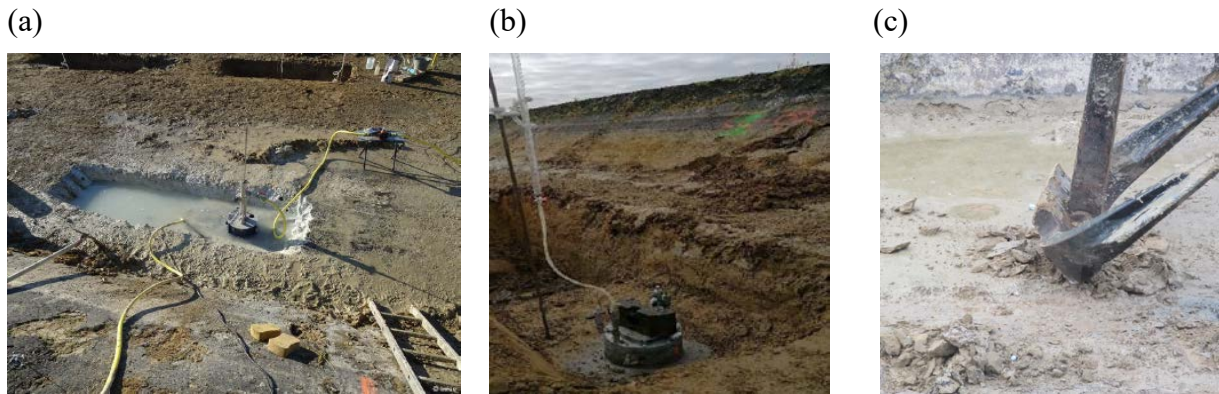


FIGURE 7. Performances après 1 an d’immersion par (a) essai JET, (b) perméabilité in situ et (c) chute d’ancre.

*Suivi de la teneur en eau volumique et de la température dans le temps*

L’enregistrement des données des capteurs à l’aide d’une centrale d’acquisition Campbell Scientific CR1000X a démarré en début d’année 2021, la pose d’un boîtier d’alimentation, le câblage et la programmation de la centrale ayant été réalisés par le Centre d’Expérimentation et de Recherche (CER) de Rouen (Cerema). Ces enregistrements, effectués avec un pas d’acquisition de 2 h, montrent l’évolution de la teneur en eau volumique (Figure 8), de la succion (Figure 9) et de la température en fonction du temps (Figure 10). Il est constaté la perte de la mesure teneur en eau volumique du capteur situé en surface de la couche d’étanchéité, sous la couche de protection, ainsi que la perte de données momentanée liée à un problème d’alimentation résolu par la suite.

La teneur en eau volumique et la succion, si elles se distinguent entre le fond et la surface de la couche d’étanchéité, sont relativement stables. La première est proche de  $w_{sat}$  quel que soit le niveau d’eau ; la seconde tend à augmenter lorsque la charge diminue. La teneur en eau est moindre au fond de la couche d’étanchéité et la succion est plus élevée qu’en surface, ce qui traduit probablement des interactions avec le sol support de la couche d’étanchéité au fond de la couche (influencées par la température extérieure) et avec la couche de protection et l’eau du bassin en surface. Des variations de succion en surface de la couche d’étanchéité sont constatées depuis juillet 2022, date depuis laquelle le bassin est vide. L’ensemble de ces informations indiquent que le matériau de la couche d’étanchéité subit des variations volumiques dans le domaine saturé, sans risque de dégradation par fissuration en l’état actuel.

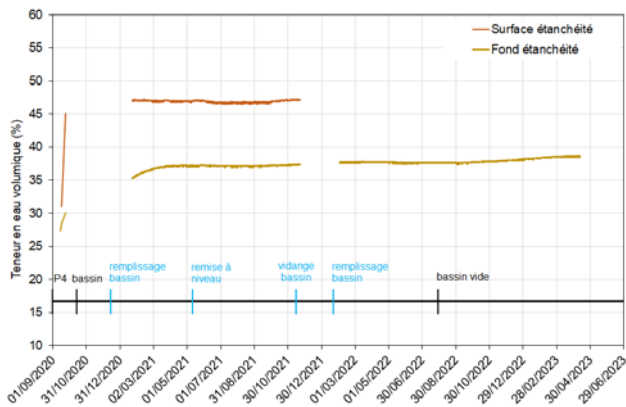


FIGURE 8. Évolution de la teneur en eau volumique du matériau en fonction du temps.

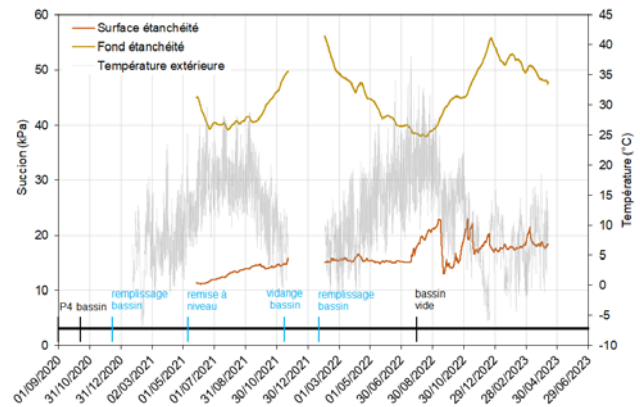


FIGURE 9. Évolution de la succion du matériau en fonction du temps et de la température.

La température des matériaux mesurée au niveau de la couche d'étanchéité est similaire au niveau du fond et de la surface de la couche. Cette température est influencée par les variations de la température extérieure.

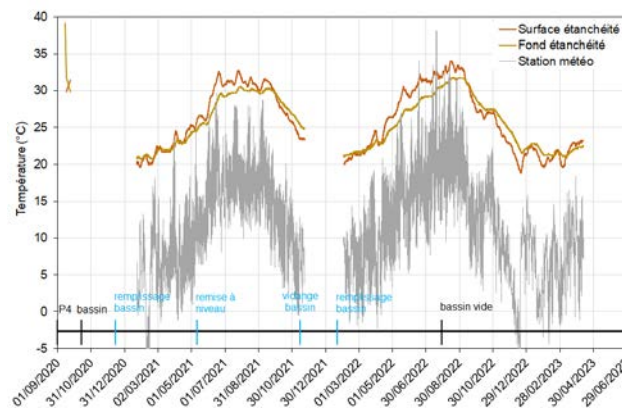


FIGURE 10. Évolution de la température dans le matériau et à l'extérieur du DEC en fonction du temps.

#### Évolution de la résistivité électrique dans le temps

Plusieurs protocoles de mesures ont été testés lors de la première intervention (le 19 décembre 2020, suite au remplissage du bassin). Les résistivités diminuent après la mise en eau du bassin (Figure 11a) et l'appoint d'eau. Il est ensuite constaté une augmentation des valeurs de résistivité (Figure 11b). Les résultats indiquent que les matériaux sont globalement homogènes le long du profil de mesure.

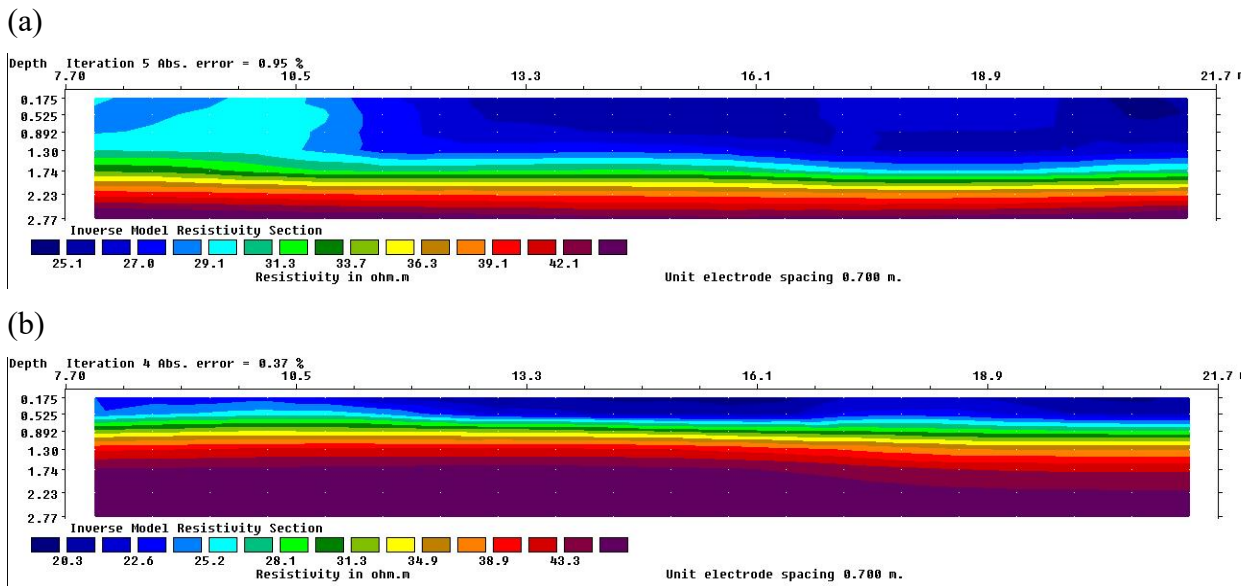


FIGURE 11. Profils TRE (a) du 13 janvier 2021 et (b) du 29 avril 2021.

Les profils de mesure de résistivité montrent une tranche de résistivité relativement stable en partie supérieure (zone en bleu de moins de 20 ohm.m) sur l'ensemble des relevés effectués entre fin 2020 et début 2022. Or, il n'y a pas d'arrivées d'eau sous le bassin (remontée de nappe). Cette partie supérieure plus conductrice est probablement influencée par les matériaux présents sous le bassin (limons traités à la chaux et limons naturels en place).

Des traitements des données géophysiques sont en cours pour tenir compte des variations du niveau d'eau dans le bassin et analyser les variations des valeurs de résistivité au cours du temps.

## Conclusion

Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude indiquent qu'il est possible d'atteindre les critères visés pour un dispositif d'étanchéité complet (DEC) constitué par de limons traités, que ce soit pour la couche d'étanchéité ou pour la couche de protection, qui remplissent des fonctions distinctes au sein du DEC. Ce type de DEC constitue une solution alternative à d'autres dispositifs d'étanchéité (géomembrane, parement en béton...) qui présente l'avantage de réutiliser le déblais d'excavation du canal et d'économiser les ressources. Il est envisageable dans le cas des digues de protection contre les inondations.

Les résultats après 1 an d'immersion montrent le maintien des performances hydrauliques et mécaniques des matériaux vis-à-vis des leurs performances initiales. Le suivi de la couche d'étanchéité par instrumentation permet de vérifier son homogénéité. Elle permet également de constater une faible évolution de sa teneur en eau, proche de la saturation, bien qu'elle soit affectée par les variations de l'environnement dans lequel elle se trouve (influence de la température extérieure sur les variations de succion en partie inférieure et en partie supérieure lorsque le bassin est vide, évolutions de la résistivité électrique).

Le suivi à long terme des planches d'essais permettra de valider la tenue du DEC dans le temps, donc sa pérennité.

De plus, il est important de garder à l'esprit que l'obtention des performances requises pour ce type de dispositif passe obligatoirement par la maîtrise des conditions de réalisation à chaque étape (identification des gisements de matériaux, réalisation de planches d'essais, contrôle continu durant toutes les étapes, respect des dispositions constructives...). Le DEC doit assurer l'étanchéité d'un ouvrage hydraulique, qu'il s'agisse d'une digue de canal ou d'une digue de protection contre les inondations. À titre d'exemple, il s'agit de mettre en place des moyens de protection immédiate contre le séchage et l'apparition de fissures de dessiccation qui altérerait les performances d'étanchéité et de protection attendues.

## Références

- [1] <https://www.canal-seine-nord-europe.fr>
- [2] Berche V., Bizien C., Murru O., Potié G. (2024). Comment s'assurer de la durabilité d'un ouvrage en terre quand on est maître d'ouvrage ?. Colloque Digue 2024, Aix-en-Provence, France, 27-29 mars 2024.
- [3] Mehenni A., Lavallée E., Alléon C., Potié G. (2022). Canal Seine-Nord Europe - Valorisation des sols traités en dispositif d'étanchéité complet. *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement (RGRA)*, 990.
- [4] Mehenni A., Deroo L., Saussaye L., Szymkiewicz F., Potié G., Berche V. (2022). Limons du projet Canal Seine-Nord Europe : évaluation des traitements pour un emploi en étanchéité. 11<sup>èmes</sup> Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Lyon, France, juin 2022.
- [5] Mehenni A., Lavallée E., Deroo L., Potié G. (2022). Seine-North Europe Canal: assessment of soil treatments for use in watertightness structures. 5<sup>th</sup> International Seminar on Earthworks in Europe, Prague, République Tchèque, 21-22 avril 2022.
- [6] Mehenni A., Potié G. (2022). Utilisation des sols traités pour l'étanchéité et la protection mécanique - Démarche de R&D et résultats obtenus dans le cadre des études du projet du Canal Seine-Nord Europe. Symposium CFBR, 17 janvier 2022, en visioconférence.
- [7] Mehenni A., Potié G. (2021). Ouvrages hydrauliques en sols traités – étude du réemploi des matériaux locaux pour l'étanchéité des biefs du Canal-Seine-Nord-Europe. JT CFMS Adaptation des ouvrages aux défis du changement climatique et du développement durable, Paris, France, 9 décembre 2021.