

REALISATION DE DISPOSITIF D'ETANCHEITE COMPLET PAR TRAITEMENT IN SITU DE LIMON ET DE CRAIE

CONSTRUCTION OF A COMPLETE SEALING SYSTEM USING IN SITU TREATMENT OF SILTY SOIL AND CHALK

Lucile SAUSSAYE¹, Gaëtan POTIE², Véronique BERCHE², Dimitri MERCADIER³, Raphaël BENOT⁴, Abdelwadoud MEHENNI⁵, Cédrine ALLEON⁶

¹ Cerema, équipe de recherche ENDSUM, Blois, France

² Société du Canal Seine-Nord Europe, Compiègne, France

³ Cerema, Centre d'Expérimentation et de Recherche (CER), Rouen, France

⁴ Cerema, St-Brieuc, France

⁵ Bouygues Travaux Publics, Gyancourt, France

⁶ ISL Ingénierie, Lille, France

RESUME - 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 limons et les craies présents dans la trace du canal pour constituer un dispositif d'étanchéité complet (DEC). L'article présente la mise en œuvre du DEC en limon et craie traités, compacté horizontalement, et les résultats de son suivi à court et à long termes.

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 silty soil and chalk present in the canal's footprint to form a complete sealing system. This article describes the implementation of the complete sealing system with silty soil and chalk, horizontally compacted, and the results of short- and long-terms monitoring results.

1. Introduction

Le Canal Seine-Nord Europe (CSNE), d'un linéaire de 107 km, 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-Escault.

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 m³/s pour tout l'ouvrage ;
- un mouvement des terres de 75 millions de m³ de déblais et de 45 millions de m³ de remblais ;
- 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 (<https://www.canal-seine-nord-europe.fr>) ainsi que dans de précédentes communications (Berche et al., 2024 ; Mehenni et Potié, 2021, 2022).

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 et de mise en œuvre de planches d'essais pour étudier la pertinence de travailler avec des couches d'étanchéités et de protection en matériaux naturels (in situ), au regard de la disponibilité de ces matériaux sur la trace du canal. 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.

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 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} 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, battillage, 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 constitué par une couche d'étanchéité constituée à base de limon et par une couche de protection constituée à base de craie, en se concentrant notamment sur le volet expérimental in situ et sur les résultats obtenus.

2. Conception du dispositif d'étanchéité complet en limons traités

2.1. 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 confirmer 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 exhaustif selon un protocole prédéfini lors de leur exécution puis à différentes échéances afin d'évaluer leur évolution dans le temps et de comparer les performances des différentes planches d'essai.

Les travaux de terrassement liés au canal et à ses ouvrages connexes s'inscrivent dans le contexte géologique des limons loessiques 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 rencontrés soit sous un faciès légèrement argileux sur 1 à 2 m en surface (classe GTR A2) ou sous un faciès limoneux en profondeur (classe GTR A1) et de façon plus abondante.

La craie employée est pure (88 à 95% de CaCO_3), de densité moyenne ($\rho_d = 1,6 \text{ t/m}^3$) (classe GTR R12). La craie utilisée a été concassée à 35 mm.

Suite aux essais en laboratoire (Mehenni et al., 2022a, 2022b, 2022c, Mehenni et Potié, 2021, 2022), pour la couche d'étanchéité, et aux planches d'essais, permettant de tester différentes natures et différents dosages de produits de traitement, un traitement du limon A1 avec 2% de bentonite calcique est retenu, constituant la formulation la plus performante parmi les modalités expérimentées. Pour la couche de protection, un traitement de la craie R12 avec 5% LHR de type ROC SC est retenu selon la même démarche.

La réalisation des planches d'essais a permis de démontrer la possibilité de valoriser le limon A1 disponible, malgré sa granulométrie serrée et des teneurs en eau particulièrement faibles rencontrées, sous conditions météorologiques évaporantes (température élevée et vent), contraignant la mise en œuvre et le compactage.

3. Réalisation du dispositif d'étanchéité complet en limon et craie traités in situ

3.1. Mise en œuvre

La couche d'étanchéité est constituée de limon A1 traité avec 2% de bentonite sur une épaisseur de 37 cm. Après plusieurs essais, elle a été mise en œuvre avec 1 passes 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% ρ_{dOPN} (masse volumique sèche à l'optimum Proctor normal), soit une masse volumique sèche de $1,70 \text{ t/m}^3$. Ces conditions de mise en œuvre ont imposé un « prétraitement » à l'eau avant intégration des liants du fait de l'état hydrique particulièrement faible des stocks.

La couche de protection est constituée de craie traitée avec 5% de LHR, en deux couches. Ces 2 couches, de 25 et 36 cm d'épaisseur, ont été mises en œuvre, chacune, avec 5 passes de compacteur V5. Elles ont été compactées à $w = 23,5\%$, soit $w_{OPN} + 0,5\%$, et à 100% ρ_{dOPN} respectivement, soit $1,58 \text{ t/m}^3$. Elle est protégée par un enduit de cure gravillonné.

Suite à leur exécution, les planches d'essais ont été entourées par un remblai de ceinture en limon traité avec 1% CaO + 5% LHR, afin de constituer un bassin (Figure 2). Environ 1 mois après sa réalisation, le dispositif d'étanchéité complet, constitué de la couche d'étanchéité en limon traité avec 2% de bentonite et de la couche de protection en craie traitée avec 5% de LHR, a été mis en charge avec un niveau d'eau d'environ 1 m dans le bassin.

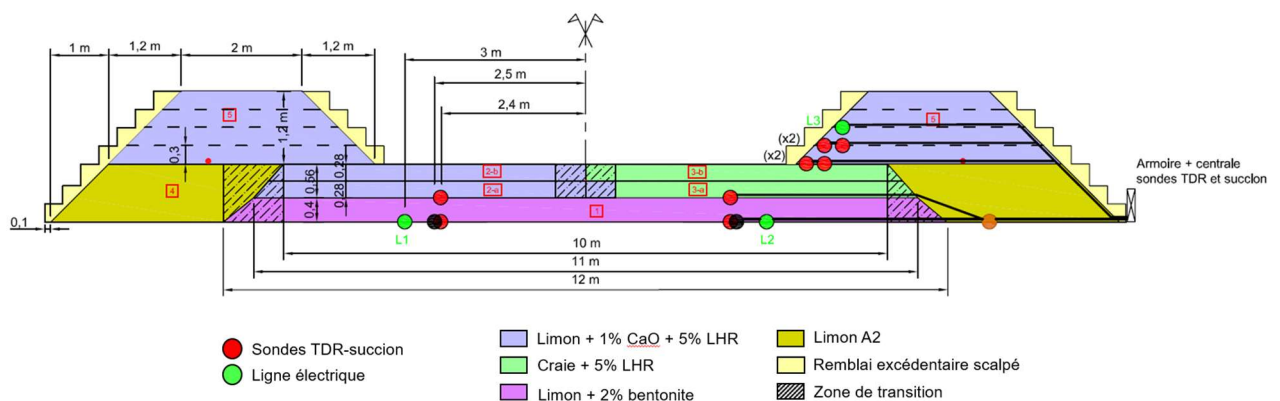


Figure 2. Coupe du bassin et schéma d'instrumentation des planches d'essais.

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 (pertes par évapotranspiration sur une longue période, par infiltration dans remblai de ceinture du bassin voire au travers de DEC).

3.2. Contrôle de performances à la mise en œuvre

Après traitement, la couche d'étanchéité présente une perméabilité au laboratoire de l'ordre de 1.10^{-10} m/s, respectant ainsi le seuil imposé de 1.10^{-8} m/s sur une épaisseur équivalente de 40 cm.

Les mesures de déflexion de la couche de protection ont été réalisées après 7 jours de cure et donnent une valeur de 0,27 mm. Elles ont été comparées aux résistances à la traction indirecte (R_{it}) mesurées au laboratoire et ne semblent pas présenter de corrélation puisque des valeurs de R_{it} particulièrement élevées, de l'ordre de 0,3 MPa à j+20, ont été mesurées. La craie traitée avec 5% de LHR a cependant démontré une cinétique de cure très rapide, qui pourrait justifier de faibles déflexions à 7 jours.

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 ($\tau_c > 1,1$ kPa). Ainsi, les conditions de réalisation des essais ont permis de caractériser l'état initial non érodable des matériaux des couches de protection en craie traitée avec 5% de 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 (Mehenni et al., 2022a, 2022b, 2022c ; Mehenni et Potié, 2021, 2022).

3.3. Instrumentation du DEC en limon et craie traités

Afin de suivre l'étanchéité du DEC en limon et en craie traités, à long terme, il a été convenu d'installer, lors de l'exécution de planches d'essais, au mur et au toit de la couche d'étanchéité :

- un capteur TDR afin de mesurer la teneur en eau volumique et la température (points rouges sur la Figure 2, Figure 3) ;
- une sonde de succion afin de mesurer la tension de l'eau dans les matériaux en place (
- 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 2). 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. Capteur de teneur en eau volumique et de température trime Pico 64 de IMKO.

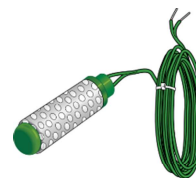


Figure 4. Capteur de succion 253 de Campbell Scientific.



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.

Le suivi par instrumentation se prolonge au-delà de 1 an d'immersion du DEC et jusqu'au démontage des planches d'essais au commencement des travaux du canal.

4. Evolution des matériaux du DEC après la mise en eau du bassin

4.1. Performances mécaniques et hydrauliques du DEC après 1 an d'immersion

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. La limite de mesure du dispositif JET a été atteinte encore une fois sans pouvoir provoquer l'érosion des matériaux ($\tau_c > 1,4$ à 1,6 kPa). La craie traitée avec 5% de LHR reste donc considérée non érodable après un an d'immersion.

La perméabilité de la couche de protection a également été utilisée comme indicateur de durabilité, bien qu'il ne s'agisse pas d'une performance attendue pour cette dernière. Elle a été mesurée par des essais de perméabilité in situ à l'infiltromètre simple anneau. En 2020, les valeurs sont de l'ordre de 1 à $2 \cdot 10^{-9}$ m/s. Les valeurs mesurées diminuent après 1 an d'immersion ($0,8$ à $0,2 \cdot 10^{-9}$ m/s). Cette diminution de perméabilité peut être attribuée à la production d'hydrates cimentaires et à la consolidation du matériau sous le poids de la colonne d'eau dans le bassin. Les valeurs restent très faibles et indiquent que la couche de protection constitue une deuxième barrière de sécurité pour l'étanchéité macroscopique du DEC.

Les sondages au pénétromètre dynamique lourd indiquent un refus systématique dans la couche de protection. Aucun n'essai n'a pu traverser la totalité de la couche et atteindre la couche d'étanchéité. Les résistances de pointe dynamiques q_d relevées atteignent des valeurs supérieures à 20 MPa sur l'ensemble des essais, ce qui correspond à des valeurs élevées et confirment la durabilité du matériau.

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 7b). 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 2 à 4 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. A 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 craie traitée n'a quasiment pas été dégradée lors de l'essai.

(a)



(b)



Figure 7. Performances après 1 an d'immersion par (a) essai JET et (b) chute d'ancre

4.2. 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 lié à un problème d'alimentation résolu par la suite.

La teneur en eau volumique, si elle se distingue entre le fond et la surface de la couche

d'étanchéité, est relativement stable. Elle est proche de w_{sat} quel que soit le niveau d'eau. La succion 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 au niveau de la couche d'étanchéité sont constatées depuis juillet 2022, date depuis laquelle le bassin est vide. Ces variations sont saisonnières.

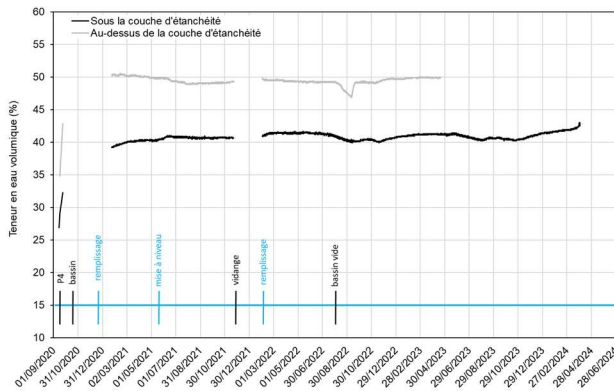


Figure 8. Evolution de la teneur en eau volumique du matériau en fonction du temps

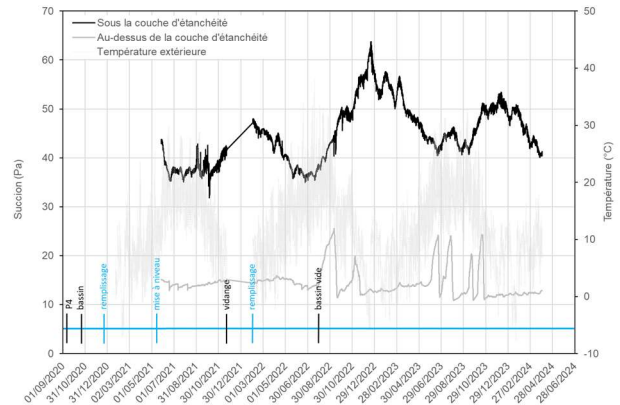


Figure 9. Evolution de la succion du matériau en fonction du temps et de la température

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. Ces variations sont également saisonnières.

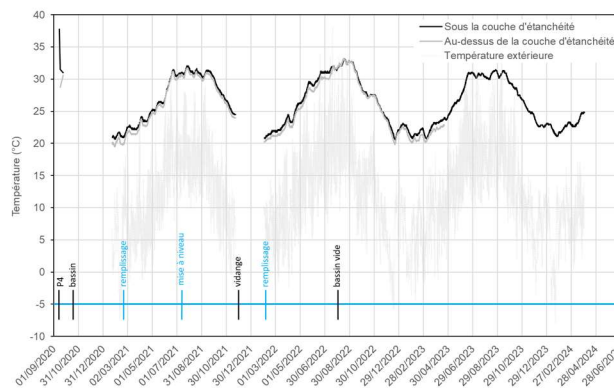


Figure 10. Evolution de la température dans le matériau et à l'extérieur du DEC en fonction du temps

Si la teneur en eau volumique est constante mais que le matériau de la couche d'étanchéité est sensible à la température, il peut être considéré que le matériau se rétracte lorsque la température augmente. Cela augmente sa masse volumique et diminue sa teneur en eau massique. En concentrant l'eau dans les pores, la succion diminue. Ainsi, ces observations confirmeraient un état du matériau traité compacté proche de la saturation, qui gonfle et dégonfle périodiquement, mais ne subit pour l'instant pas d'entrée d'air donc pas de risque de fissuration (donc de perte d'étanchéité).

4.3. Evolution 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'apport 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.

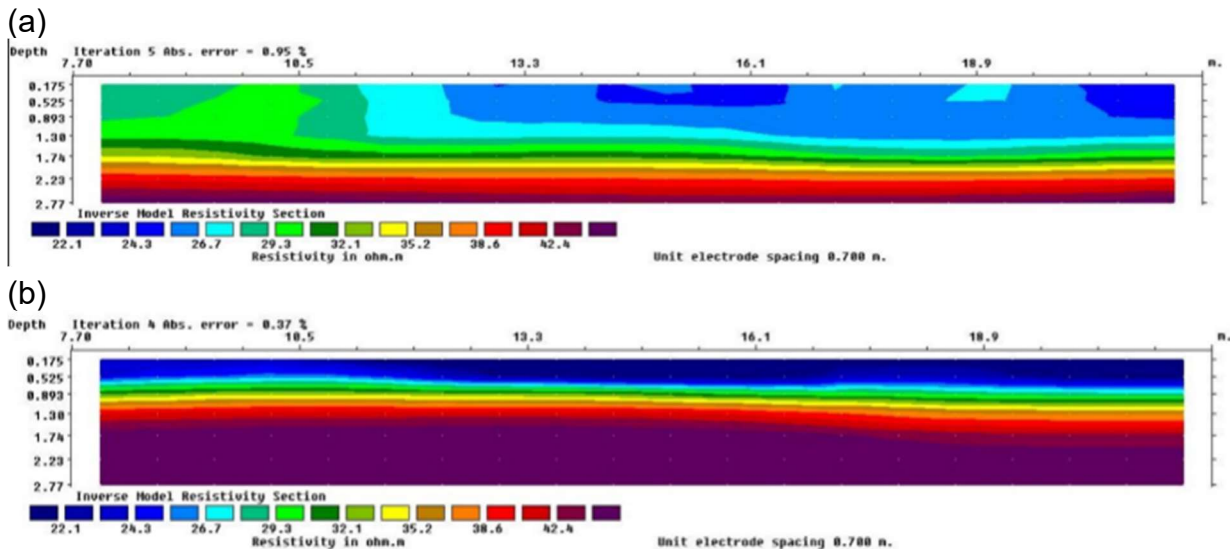


Figure 11. Profils TRE (a) du 13 janvier 2021 et (b) du 29 avril 2021.

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 février 2021 et février 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.

5. Conclusion

Après plusieurs essais, les travaux réalisés dans le cadre de cette étude montrent qu'il est possible d'atteindre les critères visés pour un dispositif d'étanchéité complet (DEC) constitué par une couche d'étanchéité par exemple en limon A1 traité avec 2% de bentonite et une couche de protection par exemple en craie traitée avec 5% de LHR. Ce type de dispositif d'étanchéité complet est donc apparu faisable et viable, même en conditions défavorables (ici : limons d'emprunt à granulométrie serrée comparativement aux caractéristiques attendues dans la région, teneur en eau des emprunts particulièrement faibles en contexte post-été chaud et sec et en canicule lors de la mise en œuvre).

Les résultats après 1 an d'immersion confirment le maintien des performances hydrauliques et mécaniques des matériaux vis-à-vis de leurs performances initiales, donc la pérennité du DEC. 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).

Le suivi à long terme des planches d'essais permettra de valider la tenue du DEC dans le temps. De nouveaux essais de perméabilité in situ sont envisagés à l'avenir, afin de vérifier l'étanchéité des couches du DEC.

De plus, il est important 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 garantir l'étanchéité d'un ouvrage hydraulique. A 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 pourrait altérer les performances d'étanchéité et de protection attendues en condition de mise en œuvre particulièrement asséchantes.

6. Références

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 Digues 2024, Aix-en-Provence, France, 27-29 mars 2024.

Mehenni A., Deroo L., Saussaye L., Szymkiewicz F., Potié G., Berche V. (2022a). Limons du projet Canal Seine-Nord Europe : évaluation des traitements pour un emploi en étanchéité. 11^{èmes} Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Lyon, France, juin 2022.

Mehenni A., Lavallée E., Deroo L., Potié G. (2022b). Seine-North Europe Canal: assessment of soil treatments for use in watertightness structures. 5th International Seminar on Earthworks in Europe, Prague, République Tchèque, 21-22 avril 2022.

Mehenni A., Lavallée E., Alléon C., Potié G. (2022c). Canal Seine-Nord Europe - Valorisation des sols traités en dispositif d'étanchéité complet. Revue Générale des Routes et de l'Aménagement (RGRA), 990.

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.

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.

Société du Canal Seine-Nord Europe (2023). Site internet <https://www.canal-seine-nord-europe.fr>