

CONCEPTION, RÉALISATION ET RETOUR D'EXPERIENCE DES TRAVAUX D'ÉCRAN ÉTANCHE SUR LES DIGUES DE LOIRE

DESIGN, EXECUTION AND FEEDBACK OF WATERPROOF SCREEN WORK ON LOIRE DIKES IN AUTHION'S VAL (MAINE-ET-LOIRE & INDRE-ET-LOIRE)

Auguste KABORE¹, Alexandre VALENZIANO²

¹ Antea Group, Métier Infrastructures, Olivet, France

² Antea Group, Métier Infrastructures, Olivet, France

RÉSUMÉ – Le système d'endiguement du val d'Authion, situé en rive droite de la Loire, sur les départements d'Indre-et-Loire et du Maine-et-Loire ont fait l'objet de travaux d'écran étanche entre 2021 et 2024 sur un linéaire cumulé de 17 km. L'objectif de cet article est de présenter le retour d'expérience du Maître d'œuvre sur les phases conception et réalisation des travaux.

ABSTRACT – The Authion valley embankment system, located on the right bank of the Loire in the Indre-et-Loire and Maine-et-Loire county, will undergo waterproofing works between 2021 and 2024 over a total length of 17 km. The aim of this article is to present the project manager's feedback on the design and execution phases of the works.

1. Introduction

La levée du val d'Authion est localisée sur la rive droite de la Loire dans les départements d'Indre-et-Loire et de Maine-et-Loire. Ce système d'endiguement (classe C) représente un enjeu considérable avec près de 58 400 habitants et 19 900 salariés.

Pour y remédier, la DREAL Centre-Val de Loire a confié à Antea Group une mission de maîtrise d'œuvre sur le système d'endiguement du val d'Authion dans les départements de l'Indre-et-Loire et du Maine-et-Loire afin de réaliser les opérations préconisées dans le cadre du projet global de fiabilisation, rédigé en 2016 par le bureau d'études et de travaux d'Orléans de la DREAL Centre - Val de Loire. Le budget prévisionnel alloué aux travaux est de 31,4 millions d'euros TTC.

Cet article a pour but de présenter les modalités de conception et de réalisation des écrans étanches par tranchée mixée, les avantages et inconvénients de cette méthodologie ainsi qu'un retour d'expérience sur les travaux menés dans le val d'Authion en 2021 et 2024.

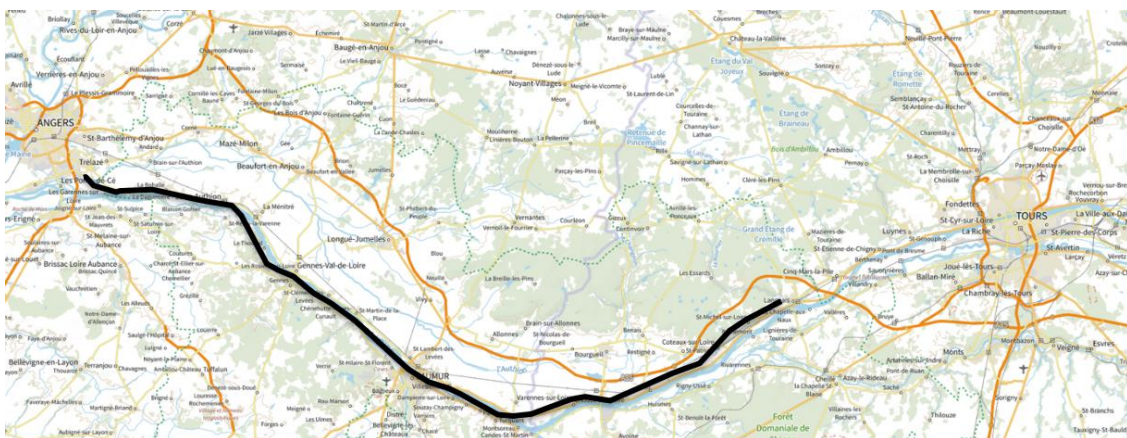


Figure 1. Localisation du Val d'Authion

2. Les techniques de confortement pour le traitement de l'étanchéité des digues et choix de la technique de renforcement d'écran étanche par tranchée mixée

La perméabilité des remblais et de leur fondation et la maîtrise des écoulements associés constituent des éléments importants de la conception et de la pérennité des ouvrages.

L'étanchéification des digues se traduit par un ensemble d'opérations consistant à limiter les écoulements internes à ces ouvrages et de ce fait limiter les risques liés à l'érosion interne dans le remblai ou sa fondation. Les techniques couramment utilisées pour le traitement de l'étanchéité sont entre autres : palplanches, paroi au coulis, mise en place d'un écran étanche par la technique trancheuse/malaxeuse, le Jet Grouting et l'injection (liste non exhaustive).

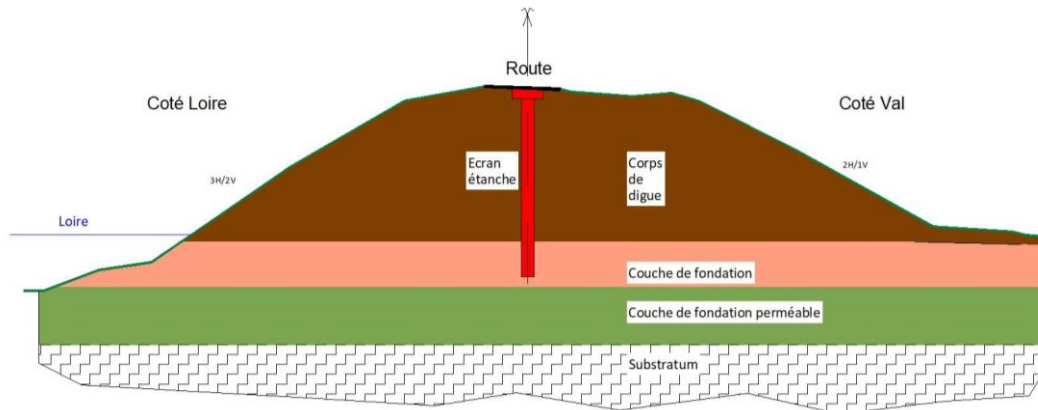


Figure 1. Coupe type des travaux (Source : DREAL)

Le tableau suivant présente les enjeux majeurs liés aux techniques pour le traitement de l'étanchéité des digues.

Tableau 1. Enjeux liés aux techniques de traitement de l'étanchéité des digues

Technique confortement	de	Enjeux majeurs
Palplanches		Vibrations / Bruit Risque de refus prématuré
Tranchée mixée		Formulation Si tranchée mixée par voie humide, nécessité d'une centrale à coulis Profondeur maximum de 9,5 m
Paroi au coulis		Gestion des matériaux de déblais Nécessité d'une centrale à coulis
Jet Grouting		Formulation Gestion des spoils (rejets de forage constitués de coulis de ciment, du sol en place et de l'eau) Nécessité d'une centrale à coulis Maillage
Injection		Formulation Nécessité d'une centrale à coulis Maillage

La technique de confortement par tranchée mixée a été retenue dans le cadre des travaux de fiabilisation du val d'Authion de par son impact limité sur les avoisinants et l'absence de déblais.

3. Les problématiques traitées par les travaux d'étanchéité

Les travaux d'étanchéité sur les digues de protection contre les inondations ont pour objectif de limiter considérablement le risque d'érosion interne dans l'ouvrage.

L'érosion interne est un ensemble de phénomènes complexes ayant comme dénominateur commun le départ de particules entraînées par l'eau circulant dans le milieu. Elle se décompose en une succession de différentes phases pouvant s'interrompre à n'importe quel moment, ce qui aura pour effet de stopper le processus d'érosion. La figure suivante présente l'ensemble des mécanismes analysés, au nombre de quatre mécanismes principaux.

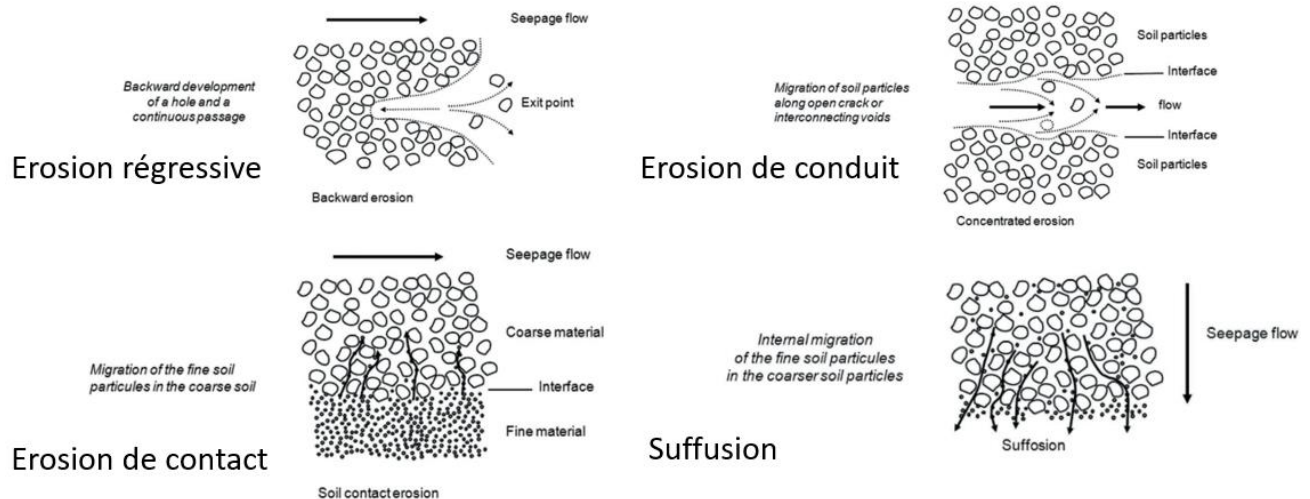


Figure 2. Présentation des différents modes d'érosion interne (extrait de « The International Levee Handbook »)

4. Études de conception de l'écran étanche par tranchée mixée

De manière générale, l'écran étanche est au minimum dimensionné en considérant un ancrage dans les formations d'assise de l'ordre de 1,5 m, en essayant si possible à l'ancrer dans une formation relativement peu perméable, soit une perméabilité de 10^{-7} m/s (si elle existe).

Il convient d'éviter de réaliser des écrans étanches trop profonds sur des linéaires importants afin de ne pas bloquer les échanges nappe / cours d'eau.

4.1. Investigations et essais en laboratoire nécessaires pour les études de conception

Pour les études de conception de confortement des digues par écran étanche, des investigations géotechniques et géophysiques ainsi que des essais en laboratoire sont nécessaires pour la caractérisation des ensembles lithologiques au sein des ouvrages hydrauliques.

La formulation de l'écran peut avoir un impact financier significatif sur le projet. Etant généralement de 180 kg/m³ de CEM III, elle peut monter jusqu'à environ 250 kg/m³ et nécessiter l'ajout de chaux pour « neutraliser » la matière organique. Au-delà, il est pertinent de changer de technique de confortement au profit de palplanche ou de paroi au coulis. Il est donc important d'apprécier ce paramètre dès la conception.

Tableau 2. Investigations in-situ pour les études de conception d'écran étanche

Investigations géotechniques in-situ	Nature
Sondage carotté avec d'échantillons intacts pour les essais en laboratoire	<ul style="list-style-type: none"> - Description lithologique et prélèvements d'échantillons intacts pour les essais en laboratoire - Réalisation des essais de perméabilité dans les horizons
Sondage semi-destructif à la tarière	<ul style="list-style-type: none"> - Description lithologique des formations rencontrées
Essai au pénétromètre statique lourd jusqu'au refus avec mesure de pression interstitielle (CPTu)	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure de pression interstitielle (CPTu) - La production d'un profil continu de paramètres de sols sur toute la hauteur d'investigation
Test d'essais de perméabilité	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluer la perméabilité des matériaux constitutifs de la digue (corps de digue + couche d'assise)

Tableau 3. Essais en laboratoire pour les études de conception d'écran étanche

Essais en laboratoire	Nature
Série d'indentification GTR	<ul style="list-style-type: none"> - Teneur en eau pondérale W - Analyse granulométrique par tamisage - Valeur au bleu du sol (VBS) - Masse volumique des sols fins <ul style="list-style-type: none"> - Limite d'Atterberg - Analyse granulométrique par sédimentométrie <ul style="list-style-type: none"> - Classification des sols (GTR) - Matière organique
Caractérisation mécanique des formations	<ul style="list-style-type: none"> - Essai triaxial consolidé non drainé avec mesure de la pression interstitielle (CU + u) - Essai triaxial consolidé drainé (CD)
Essai de résistance d'un sol à l'érosion interne (HET)	Cet essai permet de déterminer la résistance du sol à l'érosion concentré
Formulation	<ul style="list-style-type: none"> - RC à 28 jours sur dosage CEM III à 180 kg/m³ - Perméabilité à 28 jours sur dosage CEM II à 180 kg/m³

4.2. Analyse de l'érosion interne

L'analyse de l'érosion interne s'est faite via une étude qualitative à partir des critères issus de la littérature, listée dans les références bibliographiques.

Suffusion : La suffusion a été appréhendée sur la base de quatre critères granulométriques, à savoir : le critère de Terzaghi, le critère de Kenney et Lau, le critère de Burenkova, et le critère de Wan et Fell. Les sols possédant les critères suivants ont été considérés comme non suffusifs :

- soit un indice de plasticité supérieur à 7,
- soit un pourcentage d'argile (passant à 2 µm) supérieur à 10 %,
- soit un pourcentage de fines (passant à 80 µm) supérieur à 40 %.

Erosion régressive : Le risque d'érosion régressive a été évalué selon deux approches :

- Evaluation d'un gradient hydraulique d'ensemble selon le critère de LANE.
- Modélisation des gradients hydrauliques en pied de digue via le logiciel Seep/w. Les calculs de stabilité ont été menés en régime permanent, et en régime transitoire en considérant un limnigramme « modifié » avec un niveau de crue maintenu pendant

15 jours. Ces 15 jours s'inscrivent dans la démarche appliquée habituellement par la DREAL Centre – Val de Loire pour dimensionner les écrans étanches (critère de « non-contournement » de l'écran sous 15 jours). Une majoration de 22 cm du niveau d'eau maximum a été également considérée (incertitude de la modélisation hydraulique de la crue). Cette approche en transitoire se veut conservatrice par rapport à la durée des crues de la Loire sans pour autant considérer une approche en régime permanent, très préjudiciable pour des digues fluviales qui ne sont pas soumises à une charge permanente (contrairement aux digues de canaux par exemple).

Écoulement concentré (ou Erosion de conduit) : Deux conditions sont nécessaires à l'érosion par écoulements concentrés. La première est l'initiation, qui requiert la présence d'un conduit qui peut être : une interface entre deux couches de matériaux moins bien compactées, une fissure liée à un tassement différentiel, à la dessiccation, une racine d'arbre, un terrier d'animal fouisseur.

La seconde condition porte sur la progression du phénomène : le trou doit « tenir », c'est-à-dire que l'érosion par écoulements concentrés se développe au sein de matériaux cohésifs ou fins (cohésion par capillarité).

L'analyse de ce risque a été réalisée par analyse des essais HET, dans le cadre de ce projet.

Erosion de contact : Le risque d'érosion de contact n'a été considéré que si la vitesse au sein de la couche grossière est supérieure à 1 cm/s. D'après les différentes publications, dans un sol fin, sous le critère 1 cm/s, le risque d'érosion de contact est nul.

Compte tenu de l'enveloppe budgétaire limitée disponible pour cette opération une priorisation des secteurs à traiter par écran étanche a été établie. Les secteurs où les calculs montrent une instabilité en régime permanent et en régime transitoire sont ceux pour lesquels la priorité donnée est la plus élevée. A l'inverse, les secteurs où les calculs montrent une instabilité uniquement en régime permanent sont ceux pour lesquels la priorité donnée est la plus faible.

Le niveau de priorisation tient compte également, au-delà des résultats des calculs d'écoulement, des différents risques auxquels la levée peut être sensible (par exemple en sus du risque d'érosion régressive, risque de suffusion et / ou d'écoulement concentré), la présence d'anciennes brèches ou d'indices de désordres ainsi que les hétérogénéités identifiées au sein de l'ouvrage. Par ailleurs, la priorisation vise à traiter des linéaires cohérents et éviter un « mitage » des tronçons confortés ou non confortés.

De manière générale, le choix de la profondeur de fiche de l'écran se base sur le résultat des calculs réalisés en régime transitoire, d'une profondeur d'ancrage minimale de 1,5 m à 2 m, ainsi que de la nature des horizons présents en fondation d'ouvrage.

A noter que pour des travaux de mélange en place, la limite technique usuelle est de 9,5 m de profondeur.

Les caractéristiques requises de l'écran étanche à réaliser sont les suivantes :

- L'écran étanche devra avoir une épaisseur d'au moins 30 cm, notamment pour assurer sa pérennité en cas de tassements du sol ou de la digue pouvant entraîner des fissurations dans l'écran ;
- Son étanchéité : la perméabilité propre de l'écran quel que soit le site, devra être inférieure ou égale à $1 \cdot 10^{-8}$ m/s à 28 jours sur toute sa profondeur ;
- Sa résistance mécanique : l'écran devra avoir une résistance à la compression simple R_c minimum de 1,5 MPa à 28 jours en tout point de celui-ci.

4.3. Réseaux traversants

Les réseaux traversants représentent des points de faiblesse dans le système d'endiguement. Il convient donc de les intégrer au dispositif d'étanchéité créé. Ils doivent être intégrés au projet dès la conception.

Sont différenciés 2 types de réseaux :

- Les réseaux peu profonds (jusqu'à 1,5-2 m de profondeur) qui peuvent être intégrés au confortement par tranchée mixée à condition de réaliser un dévoiement le temps des travaux et une réservation dans l'écran ;
- Les réseaux profonds qui nécessitent de changer ponctuellement de technique. Il sera alors préféré la réalisation d'injection ou de Jet Grouting.

5. Réalisation des travaux d'écran étanche

5.1. Méthodologie

La technique principalement employée dans le cadre des travaux est la tranchée mixée par voie sèche. Cette technique fait l'objet d'un brevet par l'entreprise Soletanche Bachy. Elle présente l'avantage de ne nécessiter aucune centrale à coulis sur site, le liant étant épandu directement dans la tranchée sous sa forme pulvérulente. Un ajout d'eau au niveau de la lame pendant le malaxage, permet à la fois d'obtenir une bonne maniabilité à l'état frais du mélange, et de fournir un complément d'eau nécessaire à l'hydratation du liant.

Le phasage des travaux est présenté sur la figure suivante et détaillé ci-après :

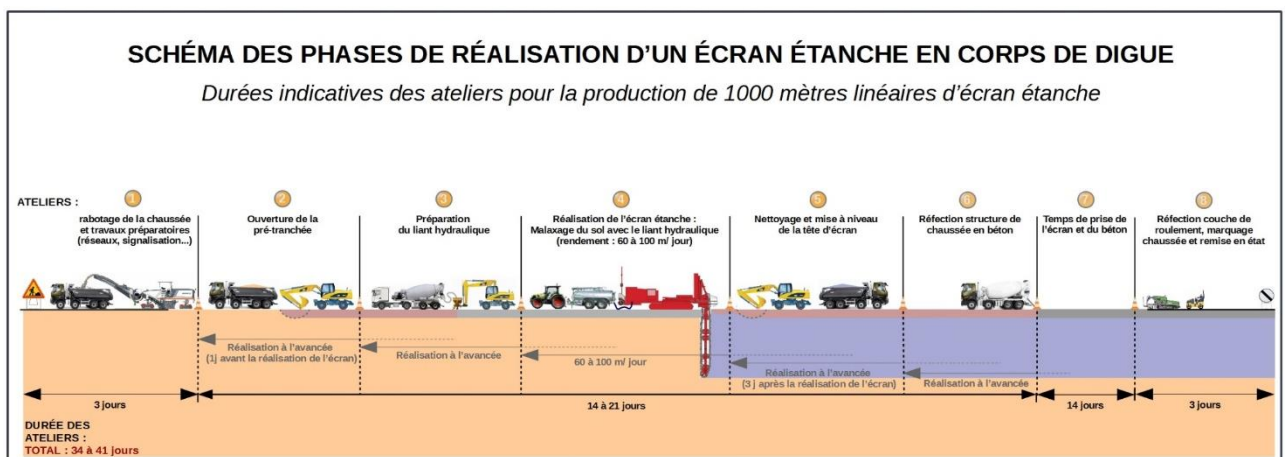


Figure 2. Phasage des travaux d'écran étanche par tranchée mixée (Source : Soletanche Bachy)

- Etape 1 : Rabotage de la chaussée
- Etape 2 : Ouverture de la pré-tranchée
- Etape 3 : Epandage du liant hydraulique
- Etape 4 : Réalisation de l'écran étanche - Malaxage du sol avec le liant hydraulique (rendement 60 à 100 m/jour)
- Etape 5 : Nettoyage et mise à niveau de la crête de l'écran
- Etape 6 : Réfection de la structure de chaussée en béton
- Etape 7 : Prise de l'écran et du béton
- Etape 8 : Réfection de la couche de roulement, marquage et remise en état.

La continuité de l'écran est assurée de la façon suivante lors de la reprise sur un écran réalisé lors de travaux antérieurs ainsi que la reprise sur l'écran réalisé après une interruption de travaux sur ce chantier (fin de journée, week-end, incident de chantier, ...). En cas d'interruption l'exécution de la tranchée sera reprise par un recouvrement respectant ces critères :

- Ecran existant d'une opération précédente ou interruption due à un incident de chantier : recouvrement de 5ml sur toute la profondeur de l'écran ;
- Ecran interrompu en fin de journée ou de semaine : recouvrement de 2 ml sur toute la profondeur de l'écran.

Des réservations sont réalisées dans l'écran au droit des réseaux traversants peu profonds. Des dispositifs de traversée étanches sont alors positionnés et coulés dans du béton non-essorable au moment de la réfection de la structure de chaussée.

5.2. Choix de la formulation

L'entreprise réalise lors de sa période de préparation une étude de formulation. Cette étude consiste à l'échantillonnage du linéaire à conforter par des sondages carottés. Les matériaux sont alors mélangés sur la hauteur prévisionnelle de l'écran étanche. Plusieurs dosages sont alors testés (en ciment CEM III et éventuellement chaux en fonction de la teneur en matière organique). Des essais de résistance à la compression et perméabilité en laboratoire sont alors réalisés à 7, 14 et 28j.

Une fois l'étude de formulation concluante, une planche d'essai est réalisée sur site afin de confirmer cette dernière. La planche d'essai est généralement réalisée au droit d'un délaissé, sur un linéaire de 40 m par formulation à tester.

Malgré les précautions prises en phase conception, il se peut que l'étude de formulation conclue localement à des problèmes de prise du mélange et nécessite des « surdosages » non compatibles avec la technique de tranchée mixée par voie sèche (dosage supérieur à 250 kg/m³). Il sera alors utilisé localement une technique différente : paroi au coulis ou palplanches par exemple.

5.3. Plan de contrôle

Compte tenu de la largeur limitée de l'écran, le contrôle par sondage carotté en fin de chantier est écarté. Il est préféré de réaliser le prélèvement des matériaux directement dans la tranchée de mélange frais.

Le plan de contrôle est le suivant :

- Résistance à la compression : Essais d'écrasement à 28 j tous les 100 m d'écran, à deux profondeurs ;
- Perméabilité : Essais de perméabilité à 28 j avec prélèvement tous les 100 m d'écran réalisés à une profondeur (dont 50 % des échantillons prélevés à titre conservatoire).
- Densité : Mesure journalière in-situ ou tous les 100 m.

La profondeur de l'écran est contrôlée par profondimètre et sa position par relevé de géomètre. La largeur de l'écran est assurée par la largeur des « tuiles » de la chaîne de coupe de la machine.

Les graphiques ci-après présentent les résultats des essais de contrôle (résistance à la compression et perméabilité) réalisés dans le cadre de l'opération 1 à Varennes-sur-Loire. Ces derniers montrent que les objectifs du marché ont été atteints, à savoir, une résistance

à la compression à 28 j supérieure à 1,5 MPa et une perméabilité à 28 j inférieure à 10^{-8} m/s.

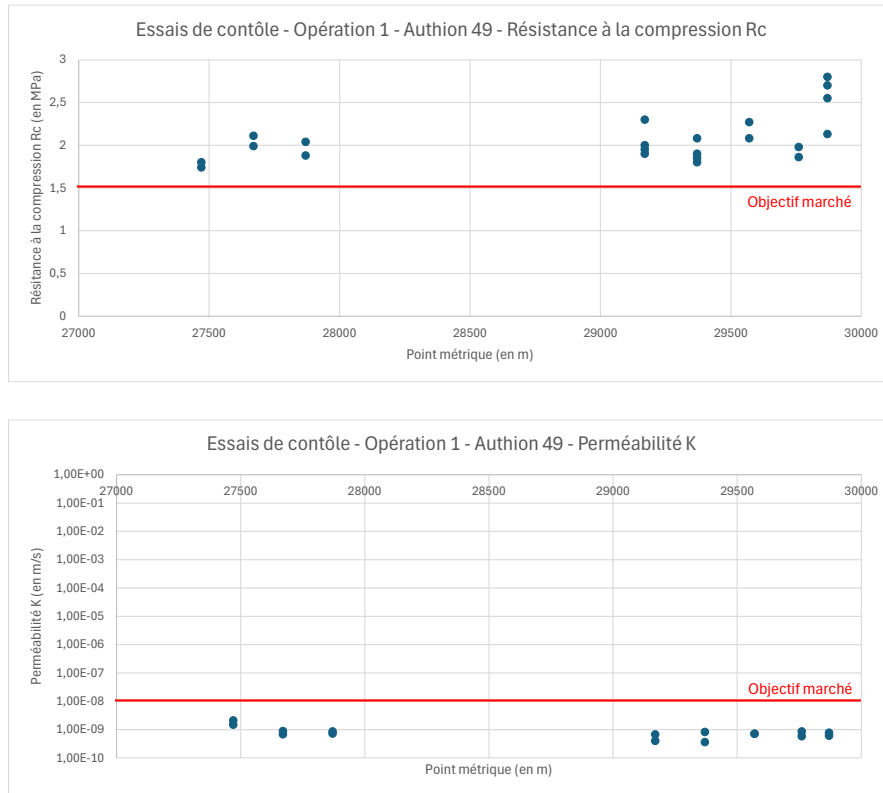


Figure 2. Résultat des essais de contrôle au niveau de l'opération 1 à Varennes-sur-Loire (49)

6. Conclusion

La technique de réalisation d'écrans étanches par mixée présente des avantages non négligeables (absence de déblais, vibrations limitées, absence de centrale à béton lorsque réalisé par voie sèche) facilitant son utilisation pour traiter des linéaires importants de digue de protection contre les inondations. Cette technique peut cependant présenter des limites qu'il est nécessaire de connaître pour les appréhender dès la phase conception :

- La profondeur, limitée à 9,5 m,
- Le traitement des réseaux profonds, nécessitant passer localement sur une autre technique de confortement ;
- La formulation, avec un dosage limitant (250 kg/m^3) et étant sensible aux perturbateurs de prise.

7. Références bibliographiques

- CFBR. (2015). Recommandations pour la justification des barrages et des digues en remblai ;
- Ciria. (2013). The International Levee Handbook ;
- DEROO L., FRYJ.J. Projet National Erinoh – Guide ingénierie – Volume 3
- POULAIN D., TOURMENT R. et al. (2018). Techniques for repairing levees, Vingt sixième congrès des grands barrages, Vienne.