

Durabilité des ouvrages hydrauliques en sol traité à la chaux : cas d'une digue construite en 2011

Durability of hydraulic structures in lime-treated soil: the case of a dike built in 2011

Lucile SAUSSAYE^{1*}, Federica BERTOLA², Sylvie NICAISE³, Christophe CHEVALIER⁴, Thibault COPPEE⁵

1 Cerema, Equipe de recherche ENDSUM, Blois, France

2 Lhoist, Nivelles, Belgique

3 INRAE, RECOVER, Aix-Marseille Univ, Aix-en-Provence, France

4 Univ. Gustave Eiffel, GERS/SRO, Marne-la-Vallée, France

5 SNCF Réseau, Division Patrimoine Géotechnique et Risques Naturels, Saint-Denis, France

**lucile.saussaye@cerema.fr*

RESUME : Le traitement des sols à la chaux est une méthode reconnue, sûre et rentable qui permet de réutiliser les sols dans la construction d'infrastructures de transport. Cette technique offre des avantages notables, tels que la réduction des déchets mis en décharge et la facilitation de la mise en œuvre de sols se trouvant à l'état hydrique humide. Cependant, malgré une longue expérience, l'application du traitement à la chaux dans les ouvrages hydrauliques reste peu développée.

Les ouvrages hydrauliques présentent des performances spécifiques qui vont au-delà de celles des remblais traditionnels, notamment une faible perméabilité pour empêcher les infiltrations d'eau au sein de la structure et une résistance à l'érosion interne et externe. Les avantages du traitement à la chaux dans la construction d'ouvrages hydrauliques, pour obtenir ces performances, ont été démontrés grâce à plusieurs projets à grande échelle menés au cours des quinze dernières années.

Néanmoins, les inquiétudes concernant la durabilité continuent de limiter le recours au traitement à la chaux pour les ouvrages hydrauliques. En effet, la technique de traitement ayant été développée au cours des années 60, il existe peu d'informations des conséquences d'une exposition prolongée aux intempéries d'un ouvrage en sol fin traité à la chaux sur l'évolution de ses performances, notamment vis-à-vis de sollicitations hydrauliques.

Cet article présente les résultats de différentes campagnes d'essais menées sur une digue en sol limoneux traité à la chaux construite en France en 2011. Il présente la conception et la construction de la digue, puis analyse les résultats de plusieurs campagnes d'essais afin d'identifier les effets des conditions d'exposition sur le sol traité à la chaux et la structure dans son ensemble. Ces effets sont notamment évalués en termes de carbonatation du sol traité à la chaux, qui influence les propriétés de la couche superficielle de l'ouvrage.

ABSTRACT: Soil treatment with lime is a recognised, safe, and cost-effective method that enable the soil reuse in the construction of transport infrastructures. This technique offers notable benefits, such as reducing landfill waste and facilitating the use of soils in a moist hydric state. However, despite extensive experience, the application of lime treatment in hydraulic structures remains underdeveloped.

Hydraulic structures have specific requirements beyond those of traditional embankments, including low permeability to prevent seepage into the structure and resistance to internal and external erosion. The advantages of using lime treatment in the construction of hydraulic structures to achieve these performances have been demonstrated in a number of full-scale projects carried out over the last fifteen years.

Nevertheless, concerns about durability still hinder the adoption of lime treatment for hydraulic structures. Indeed, as the treatment technique was developed in the 1960s, there is little information on the consequences of prolonged exposure of a lime-treated fine soil structure to the elements on the evolution of its performance, particularly with regard to hydraulic stresses.

This paper presents the results of various monitoring campaigns conducted on a lime-treated silty soil dike built in France in 2011. It describes the design and construction of the dike and then analyses the results of several test campaigns in order to identify the effects of exposure conditions on the lime-treated soil and the overall structure. These effects are assessed in terms of the carbonation of the lime-treated soil, which influences the properties of the surface layer of the structure.

Mots-clés : traitement à la chaux ; sol limoneux ; digue ; durabilité ; carbonatation.

1 INTRODUCTION

Le traitement à la chaux des sols constitue une technique bien maîtrisée, fiable et économiquement avantageuse, permettant de valoriser des sols de faible qualité mécanique dans la construction d'infrastructures de transport telles que les routes, les autoroutes, les voies ferrées ou les plateformes aéroportuaires (Little, 1995). En limitant les volumes de matériaux envoyés en décharge et en réduisant les délais de construction, cette technique offre des avantages notables. Cependant, malgré une grande expérience du traitement à la chaux dans les travaux de terrassement, son application dans les ouvrages hydrauliques reste relativement peu développée.

Les ouvrages hydrauliques exigent non seulement les caractéristiques classiques de maniabilité et de stabilité requises pour les remblais, mais également des performances additionnelles spécifiques. Celles-ci comprennent l'étanchéité (faible perméabilité pour empêcher les infiltrations et les écoulements), la résistance à l'érosion interne (telle que l'érosion de conduit, l'érosion de contact, la suffusion et l'érosion régressive), la protection de la surface (résistance à l'érosion externe) et la capacité à résister à des débits élevés (Sharp et al., 2013).

Au cours des 15 dernières années, de nombreuses études et projets à grande échelle ont pourtant démontré les bénéfices de l'utilisation de sols traités à la chaux pour la réalisation d'ouvrages hydrauliques (Bertola et al., 2025). Le traitement à la chaux facilite l'utilisation de matériaux disponibles localement, simplifie les sections transversales types des ouvrages hydrauliques et améliore les propriétés mécaniques et la résistance à l'érosion, tout en réduisant les coûts et le besoin de transport de matériaux. Malgré ces avantages, des interrogations subsistent quant à la durabilité du traitement à long terme, ce qui freine encore son adoption généralisée dans ce domaine.

Étant donné qu'il s'agit d'une pratique relativement récente pour les ouvrages hydrauliques, les données disponibles sur son comportement à long terme restent limitées, en particulier concernant sa résistance aux intempéries et sa capacité à maintenir les performances fonctionnelles requises. Il est donc essentiel de démontrer que ces ouvrages, lorsqu'ils sont réalisés avec des sols traités à la chaux, présentent non seulement une efficacité immédiate mais également une durabilité et une robustesse satisfaisantes sur le long terme.

Cet article partage les enseignements tirés de la construction et du suivi de la digue expérimentale DOFEAS-Lhoist. Il décrit l'ouvrage, les propriétés mesurées lors de sa mise en œuvre et durant l'année suivant sa construction, ainsi que les résultats des

campagnes de suivi à long terme. Cet ouvrage s'apparente à une digue sèche, n'ayant pas été soumis à une charge hydraulique. Une attention particulière est portée à l'évolution de la carbonatation du sol traité à la chaux au cours du temps et à l'influence de ce phénomène sur la résistance à l'érosion externe, paramètre clé de la conception des ouvrages de protection contre les inondations et contre les submersions.

2 DIGUES EXPERIMENTALES

En septembre 2011, deux digues expérimentales ont été édifiées au Centre d'Études et de Recherche (CER), à Rouen, dans le cadre du projet DOFEAS (Digues et Ouvrages Fluviaux : Erosion, Affouillements, Séismes). Elles ont été construites à partir d'un limon d'origine belge. Ce matériau, sol fin de faible plasticité, est classé F1 selon la norme EN 16907-2. L'une des digues a été construite avec ce limon traité avec 2,5% de chaux vive (de type CL90Q conformément à la norme EN 459-1), tandis que l'autre, construite avec le même sol non traité, a servi de structure de référence. Les deux ouvrages ont été construits dans des conditions sèches, sans exposition à des sollicitations hydrauliques spécifiques autres que celles de l'environnement.

La digue en limon traité à la chaux (Figure 1 et Figure 2) présente un profil transversal asymétrique, avec un talus de pente 3H/2V (orienté sud-est) et un talus de pente 2H/1V (orienté nord-ouest). Elle mesure 21 m de long au sommet et 28,2 m à la base, avec des largeurs respectives de 4 m et 10,3 m, et une hauteur totale de 1,80 m. Sa construction a été réalisée en six couches de 30 cm d'épaisseur. La digue en limon non traité présentait le même profil asymétrique mais des dimensions plus réduites : 10 m de longueur, 2 m de largeur en crête et 0,9 m de hauteur, obtenue par la mise en œuvre de trois couches de 30 cm d'épaisseur.

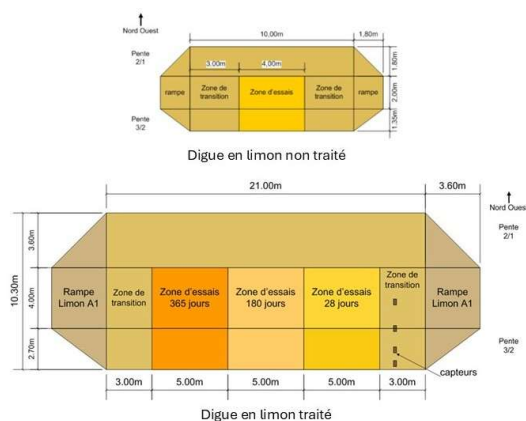


Figure 1. Géométrie des digues



Figure 2. Vue d'ensemble des digues, prise en 2011, après leur construction (traitée à la chaux à gauche et non traitée à droite)

L'objectif du projet était d'évaluer le potentiel du traitement à la chaux appliqué aux sols fins pour la construction d'ouvrages hydrauliques (tels que les digues et les canaux) et de valider les résultats obtenus en laboratoire en vraie grandeur. Les principaux points d'attention portaient sur l'homogénéité du traitement et sur la perméabilité du matériau traité puis compacté. Pour atteindre ces objectifs, des conditions de mise en œuvre spécifiques ont été retenues :

- Le traitement à la chaux a été effectué au moyen d'une centrale de malaxage mobile, choisie pour garantir un dosage précis en chaux et en eau.
- Le compactage a été effectué du côté humide de la teneur en eau optimale (w_{OPN}) à l'aide d'un compacteur à pieds dameurs (compactage par pétrissage).

Le remblai non traité a été compacté dans les mêmes conditions afin de servir de référence.

La qualité de la construction a été suivie au travers de contrôles systématiques portant notamment sur la teneur en eau, la densité et l'épaisseur des couches compactées. A l'issue du compactage, les teneurs en eau moyennes mesurées étaient de 19,4% pour le remblai en limon traité à la chaux et de 17,0% pour le remblai en limon non traité. Les détails relatifs à la construction sont présentés par Makki-Szymkiewicz et al. (2015).

3 RESULTATS DES CAMPAGNES DE SUIVI PRECEDENTES

Après la construction des digues, plusieurs campagnes expérimentales approfondies ont été conduites sur plusieurs années afin d'évaluer les performances mécaniques et hydrauliques, ainsi que leur évolution sous l'effet des conditions environnementales d'un climat océanique.

Les premières investigations, réalisées un mois, six mois et un an après la construction (Charles et al., 2012 ; Charles et al., 2015 ; Makki-Szymkiewicz et al., 2015) ont mis en évidence plusieurs éléments clés :

- La perméabilité du sol traité à la chaux s'est révélée similaire à celle du sol non traité (environ 1.10^{-9} m/s) et s'est maintenue au cours du temps. Cette faible perméabilité est attribuée aux conditions de mise en œuvre, en particulier le compactage par pétrissage, du côté humide de w_{OPN} .
- Le traitement à la chaux a considérablement amélioré la cohésion du sol et sa stabilité globale, comme l'ont confirmé les mesures des propriétés mécaniques.
- Les essais menés 28 jours après la construction, essais d'érosion de conduit (Hole Erosion Test HET) et essais d'érosion par jets mobiles (Mobile Jets Erosion Test MoJET), ont montré une augmentation nette de la résistance à l'érosion interne et à l'érosion de surface grâce au traitement.
- Après un an, il a été constaté que la présence d'une couche de terre végétale offrait une protection efficace contre la dégradation environnementale, les niveaux d'érosion étant inférieurs à ceux observés après 28 jours.

En octobre 2018, après 7 ans d'exposition naturelle, une campagne de suivi complète a été menée pour évaluer les propriétés à long terme et l'homogénéité du sol traité. Des échantillons remaniés, meubles, ont été prélevés sur et dans les talus pour analyser leurs caractéristiques physico-chimiques et microstructurales, tandis que des blocs ont été extraits puis retaillés en laboratoire afin de déterminer les propriétés mécaniques et hydrauliques du matériau. En raison de la résistance mécanique élevée et du comportement fragile du sol traité, ainsi que de la présence de silex, introduits par inadvertance pendant la construction, il n'a pas été possible d'extraire des carottes intactes.

Avant les prélèvements, la terre végétale et la végétation ont été décapées, puis des tranchées de 60 cm de large ont été ouvertes dans les talus sans atteindre le cœur du remblai. Les échantillons ont été prélevés dans les deux heures suivant l'ouverture et conservés dans des sacs hermétiques jusqu'à leur analyse.

Les principales conclusions de cette campagne (Saussaye et al., 2020 ; Das et al., 2021) sont les suivantes :

- Des valeurs de pH supérieures à 11 ont été mesurées dans les tranchées, confirmant la persistance de l'effet de la chaux. Une baisse du pH entre 8 et 9 a été observée dans les 12 premiers centimètres, conséquence de l'exposition atmosphérique et du développement de la végétation.
- Les variations de teneur en eau étaient inférieures à 2% de la valeur mesurée lors de la construction, ce

indiquant une bonne capacité de rétention d'eau à long terme du sol traité à la chaux.

- Une résistance à la compression simple moyenne de 3,3 MPa a été mesurée sur des échantillons prélevés à des profondeurs de 0,30 et 0,75 m perpendiculairement à la surface.

Lors de la campagne de 2018, le remblai non traité a été démantelé, ce qui a empêché toute acquisition de données supplémentaires le concernant.

Enfin, un an après l'ouverture des tranchées, en 2019, de nouveaux prélèvements ont été réalisés afin d'étudier la progression du front de carbonatation dans l'ouvrage. La profondeur de carbonatation mesurée était de 4,2 cm, ce qui suggère un ralentissement de sa progression avec le temps. Des changements microstructuraux ont également été observés (Das et al., 2022 ; Saussaye et al., 2024).

4 CAMPAGNE DE SUIVI 2025

En février 2025, une nouvelle campagne de suivi a été menée afin d'obtenir des données complémentaires sur l'évolution des performances du remblai traité à la chaux, après environ 14 ans d'exposition aux conditions environnementales (Figure 3).



Figure 3. Vue du remblai traité à la chaux prise en 2025

4.1 Matériels et méthodes

4.1.1 Evaluation de la carbonatation du limon traité à la chaux

En février 2025, les échantillons ont été prélevés dans les deux talus de la digue, au sein de 6 tranchées ouvertes entre 2018 et 2020 (Figure 4). Pour chaque tranchée, plusieurs points d'échantillonnage ont été définis, la profondeur pouvant atteindre 35 cm perpendiculairement à la paroi.

La teneur en eau de chaque échantillon a été déterminée par séchage à l'étuve à 105°C pendant 24h. Après séchage, le taux de carbonatation a été déterminé par analyse thermogravimétrique (ATG), réalisée à l'aide d'un instrument NAVAS TGA-2000, avec une rampe d'augmentation de température de 5°C/min, de la température ambiante à 950°C. La perte

de masse mesurée entre 600 et 950°C correspond à la décomposition du carbonate de calcium (CaCO_3), qu'il soit naturellement présent dans le limon non traité, $\text{CO}_2(\text{nat})$, ou formé par la carbonatation de la chaux vive utilisée dans le traitement, $\text{CO}_2(\text{tr})$. Le taux de carbonatation a été calculé selon l'équation 1 :

$$\text{Taux de carbonatation} = \frac{(\text{CO}_2(\text{tr}) - \text{CO}_2(\text{nat})) \times 1,27}{\text{CaO}_{\text{tot}}} \times 100 \quad (1)$$

Cette équation permet de convertir la masse de CO_2 dégagée en masse équivalente d'oxyde de calcium (via le facteur 1,27), puis de la rapporter à la masse totale de chaux vive utilisée pour le traitement (CaO_{tot}).

Enfin, le pH a été mesuré sur les échantillons remaniés avec un rapport liquide/solide (L/S) de 4, suivant un protocole analogue à celui utilisé pour la détermination du point de fixation de la chaux selon la norme ASTM D6276-19.

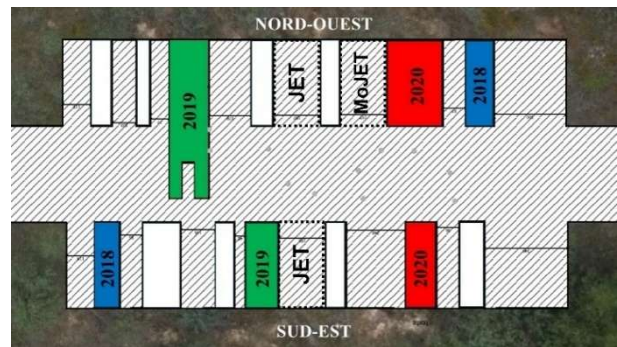


Figure 4. Schéma de l'échantillonnage et localisation des essais d'érosion

4.1.2 Essais Mobile Jets Erosion Test (MoJET)

L'appareillage pour la réalisation des essais MoJET est présenté schématiquement à la Figure 5a. La partie mécanique active, appelée érodeur, est celle élaborée par Hénensal et Duchatel (1990). La partie supérieure de l'érodeur, par laquelle transite le fluide utilisé, est équipée de 6 gicleurs, de 0,5 mm de diamètre, portés par un bras mobile. Au cours de l'essai, l'érodeur est relié à un dispositif d'alimentation en eau sous pression à débit contrôlé. Le bras est mis en rotation à vitesse constante dans une chambre circulaire de diamètre 15,2 cm. L'érodeur projette les six jets d'eau perpendiculairement au sol dont on veut mesurer l'érodabilité. L'appareil est aussi équipé d'un bac récupérateur pour collecter l'effluent pendant l'essai et évaluer les masses de matériau érodée en laboratoire. L'essai est peu invasif pour la surface testée (Figure 5b).

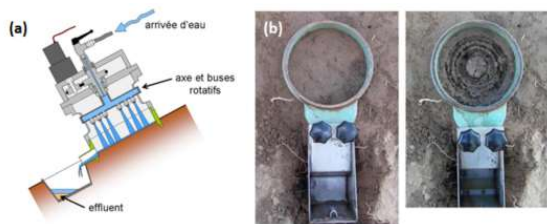


Figure 5. (a) Schéma de l'érodeur (b) Photos du sol testé avant et après essai MoJET

Le limon traité à la chaux est soumis à l'action des jets avec les paramètres d'essai suivants :

- débit d'eau constant d'environ 600 mL/min
- durée de l'essai de 12 minutes avec recueils intermédiaires des effluents chargés à 1, 2, 4, 6, 8, 10 et 12 min
- à 5 reprises, en différents points descendus entre 0 et 10 cm de profondeur sur le talus nord-ouest (Figure 4).

Des essais ont également été réalisés sur le talus sud-est. Cependant, la surface du talus à cet endroit a été remaniée par l'excavation des tranchées qui encadrent la zone d'essais.

L'essai permet de définir :

- la masse de sol érodée en fonction du temps
- le taux moyen d'érosion en fonction du temps (masse moyenne érodée par pas de temps).

4.1.3 Essai Jet Erosion Test (JET)

Le JET est un essai d'érosion de jet immergé avec points d'arrêt. L'appareillage in situ est constitué d'une cuve qui est foncée dans le sol à tester, perpendiculairement à la surface. Le montage de l'appareillage est effectué pour que le jet sous pression soit appliqué perpendiculairement à la surface du matériau testé (Figure 6).

La surface de sol est soumise à un écoulement de jet impactant immergé. Si la contrainte exercée par le fluide sur le matériau est suffisamment importante, le matériau s'érode.

Des mesures de profondeur d'affouillement sont réalisées tout au long de l'essai. Avant et après essai, la surface est scannée au moyen d'un LiDAR.

Les essais ont été menés selon la norme ASTM D5852, avec un mode opératoire adapté au contexte des sols traités.

Le limon traité à la chaux est soumis à l'action du jet avec les paramètres d'essai suivants :

- à pression donc à contrainte hydraulique contrôlée
- durée de l'essai de 5 à 30 min, le temps étant adapté afin d'obtenir une courbe d'érosion satisfaisante
- à 5 reprises sur le talus nord-ouest, en différents points descendus entre 0 et 12 cm de profondeur (Figure 4)

- à 3 reprises sur le talus sud-ouest, en différents points descendus entre 0 et 8 cm de profondeur (Figure 4)



Figure 6. Réalisation d'un essai JET sur le talus nord-ouest

L'essai permet de définir :

- la contrainte critique $\tau_{c,JET}$ (Pa) correspondant au seuil à partir duquel l'érosion est initiée : plus $\tau_{c,JET}$ est élevé, plus le matériau est résistant à l'érosion
- le coefficient d'érosion de Hanson $k_{d,JET}$ ($\text{cm}^3/(\text{s.N})$) correspondant à la cinétique d'érosion : plus $k_{d,JET}$ est élevé, moins le matériau est résistant à l'érosion.

4.2 Résultats

4.2.1 Carbonatation du sol traité à la chaux

La Figure 7 présente l'évolution de la teneur en eau, du pH et du taux de carbonatation en fonction de la profondeur d'échantillonnage.

Une forte dispersion de la teneur en eau est observée dans la couche superficielle (Figure 7a), comprise entre 17 à 32% dans les premiers centimètres, indépendamment de la date d'ouverture des tranchées (correspondant à une durée d'exposition sol-atmosphère comprise entre 5 et 7 ans). Lorsque la profondeur d'échantillonnage augmente, les valeurs sont moins dispersées et se stabilisent entre 15 et 17% au-delà de 10 cm, soit une diminution de l'ordre de 3% en moyenne par rapport à la teneur en eau de 19,4% lors de la construction. Pour comparaison, une stabilisation similaire avait été observée à 12 cm de profondeur après 7 ans d'exposition entre 2011 et 2018 (Das et al., 2021).

Une tendance comparable est relevée pour les valeurs de pH (Figure 7b) : dans les 5 premiers centimètres, les valeurs varient entre 8,5 et 11, tandis qu'elles se stabilisent rapidement autour de 11,5 à des profondeurs plus importantes.

Il est généralement admis qu'un pH de 10 constitue le seuil en dessous duquel la quantité de CaO disponible ne permet plus le déroulement des réactions pouzzolaniques, en raison du lessivage, de la

carbonatation ou de la consommation de CaO par les réactions pouzzolaniques elles-mêmes (Little, 1995).

Ainsi, les résultats de la Figure 7 suggèrent qu'il n'y a eu que peu ou pas de dégradation du sol traité par carbonatation et/ou le lessivage de la chaux vive au-delà de 10 cm de profondeur. Dans les 10 premiers centimètres, les réactions pouzzolaniques sont vraisemblablement arrivées à leur terme, tandis qu'elles se poursuivent plus en profondeur.

Il est connu que les sols traités à la chaux développent une certaine résistance à l'eau, qui peut diminuer avec le temps sous l'effet de la carbonatation. La Figure 7 montre également que la teneur en eau diminue tandis que le pH augmente lorsque la profondeur dans le talus augmente. Les valeurs de teneurs en eau sont supérieures à 20%, donc supérieures à la teneur en eau de construction, lorsque les valeurs de pH sont inférieures à 9, ce qui suggère qu'il existe une relation étroite entre la sensibilité à l'eau et la persistance du traitement à la chaux.

Toutefois, il faut souligner que la dispersion apparente des valeurs de teneur en eau et de pH observée en surface est en partie liée à la représentation des données en fonction d'une profondeur moyenne, les prélèvements n'ayant pas nécessairement été effectués à des profondeurs comparables et un nombre plus limité d'échantillons ayant été prélevés au-delà de 15 cm de profondeur.

De plus, l'échantillon présentant une teneur en eau de 33% est le seul provenant d'un raclage de la surface de la tranchée.

Enfin, le taux de carbonatation de la CaO est présenté à la Figure 7c. Le calcul de ce taux de carbonatation repose sur l'hypothèse qu'il n'y a aucune perte de chaux par lessivage. Dans la couche superficielle, 60% de la chaux ajoutée semble être carbonatée dans la couche superficielle, tandis qu'à partir 10 cm de profondeur, ce taux diminue rapidement pour atteindre des valeurs inférieures ou égales à 20%.

Bien que ces résultats soient cohérents avec les mesures de pH, il n'est pas possible d'associer de manière univoque la carbonatation de la chaux observée dans la couche plus profonde au seul processus post-construction. En effet, en l'absence de mesure effectuée au moment du compactage, la part de carbonatation ayant eu lieu pendant la mise en œuvre et la maturation du matériau ne peut pas être distinguée de celle survenue ultérieurement (Kleib et al., 2024). De plus, la quantification de la teneur en carbonates par ATG ne permet pas de déterminer si la fraction non carbonatée de la chaux est encore disponible pour les réactions pouzzolaniques, ni en quelle quantité.

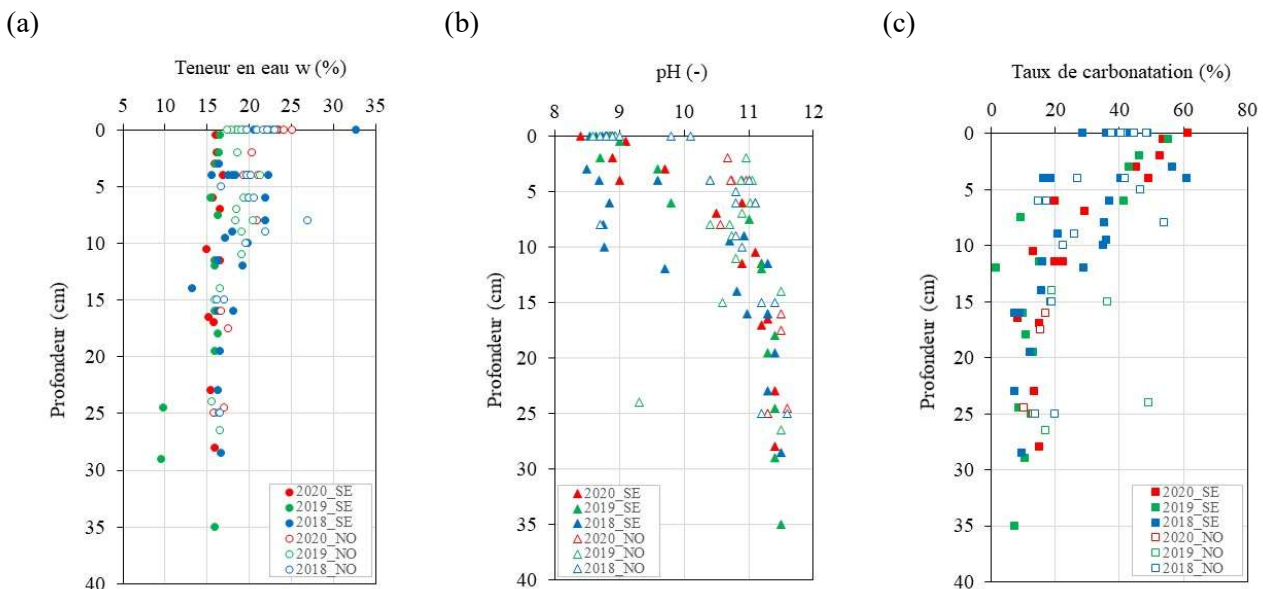


Figure 7. Evolution de (a) la teneur en eau, (b) du pH et (c) du taux de carbonatation en fonction de la profondeur d'échantillonnage

4.2.2 Erosion externe par MoJET

La Figure 8 présente l'évolution de la masse de matériau érodée et du taux moyen d'érosion en fonction du temps. Les essais d'érosion MoJET sur le

talus nord-ouest de la digue indiquent que l'érodabilité de surface (à 0 cm ; 60 g de matériau érodé en 12 min) est limitée par rapport à l'essai à 1 cm de profondeur, malgré le peu de végétation présente (strate bryolichenique). Pour les essais réalisés à 1 cm de

profondeur, l'érodabilité est relativement élevée (140 g de matériau érodé en 12 min) ; elle est plus modérée à 3,5 et 7 cm de profondeur (85 à 100 g de matériau érodé en 12 min) ; elle est faible à 10 cm de profondeur (20 g de matériau érodé en 12 min). Lors de la mise en place de l'érodeur à cette dernière profondeur, le matériau est apparu mécaniquement plus résistant.

Ces résultats indiquent que la couche de sol carbonatée est moins résistante à l'érosion externe. A partir de 10 cm, le limon traité à la chaux conserve une résistance à l'érosion élevée après 14 ans d'exposition sol-atmosphère.

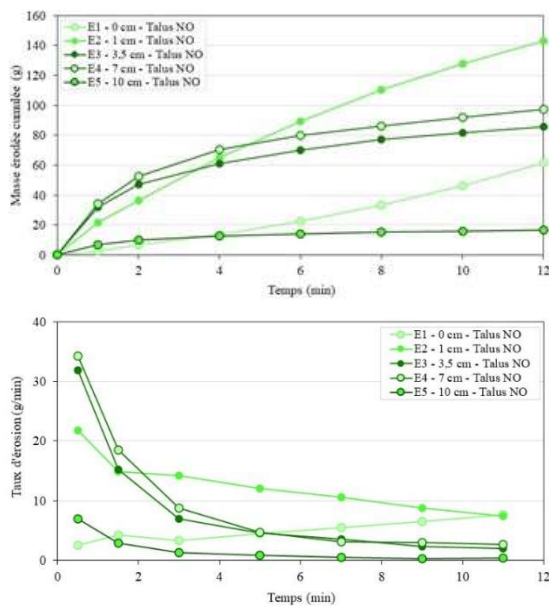


Figure 8. Erodabilité (MoJET) du limon traité à la chaux sur le talus nord-ouest de la digue : (a) masse érodée cumulée et (b) taux moyen d'érosion en fonction du temps.

4.2.3 Erosion externe par JET

La Figure 9 présente les résultats des essais JET en fonction de la profondeur de réalisation de l'essai : chaque point représente la moyenne de deux interprétations (selon la courbe d'érosion et la courbe d'affouillement), la barre d'erreur représentant l'étendue des valeurs. Il apparaît que la contrainte critique $\tau_{c,JET}$ augmente nettement avec la profondeur, l'essai réalisé à 9 cm de profondeur étant considéré comme non représentatif car probablement remanié en surface. La variation du coefficient d'érosion $k_{d,JET}$ en fonction de la profondeur montre la même tendance.

Le matériau est résistant à l'érosion à partir de 8 cm de profondeur, ce qui est cohérent avec les résultats précédents.

De plus, les observations réalisées pendant les essais en surface montrent que la végétation protège la surface : le processus d'érosion par l'impact du jet se fait par sous-cavage (Figure 10), tandis que la surface

reste relativement peu érodée. L'essai JET ne met pas en valeur ce rôle protecteur : les valeurs rencontrées en surface sont proches de celles attendues sur un limon non traité.

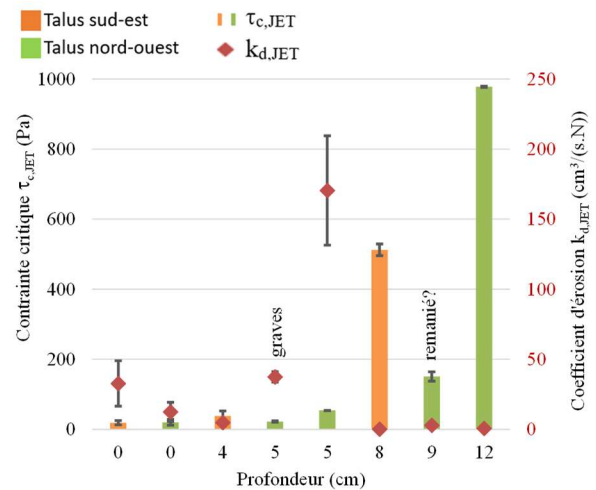


Figure 9. Erodabilité (JET) du limon traité à la chaux en fonction de la profondeur

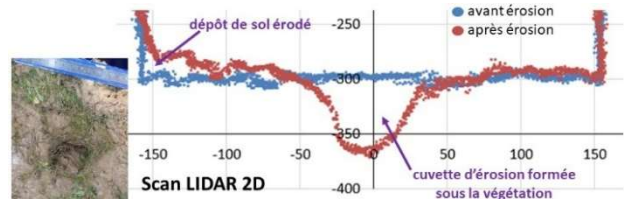


Figure 10. Erosion apparue sous la surface végétalisée

5 CONCLUSIONS

Les différentes campagnes de suivi permettent de formuler les conclusions suivantes :

- La carbonatation progresse relativement rapidement en surface, notamment dans les zones décappées ou directement exposées à l'air, mais le taux de carbonatation diminue rapidement avec la profondeur.
- La teneur en eau au sein du remblai, au-delà de 10 à 12 cm de profondeur, diminue selon une cinétique lente : -2 à -3% après 7 et 14 ans respectivement.
- 14 ans après la construction, le pH au cœur de l'ouvrage reste suffisamment élevé pour permettre le déroulement de réactions pouzzolaniques.
- Il est impossible de distinguer la carbonatation survenue pendant la construction de celle qui s'est produite au cours des années d'exposition sol-atmosphère, si la première n'a pas été évaluée dès le départ.
- Aucune différence significative n'a été observée entre les échantillons prélevés sur les deux talus,

indiquant que l'orientation et la pente n'ont probablement pas d'influence notable sur les conditions environnementales locales auxquelles le matériau est exposé.

- Les essais d'érosion MoJET menés sur le talus nord-ouest de la digue indiquent que l'érodabilité de surface (à 0 cm) est faible, malgré une végétation peu développée. Le développement de la végétation en surface semble donc participer à la résistance à l'érosion du matériau malgré sa carbonatation.
- La couche superficielle fortement carbonatée présente une résistance à l'érosion moindre que celle du limon traité à la chaux faiblement carbonatée.
- Le limon traité à la chaux faiblement carbonatée, au-delà de 8 cm de profondeur, conserve une résistance élevée à l'érosion après 14 ans d'exposition à l'air, ce qui constitue une propriété essentielle pour la conception d'une digue.

Ces observations seront complétées par de nouvelles informations issues des constatations faites in situ lors des essais, ainsi que par des analyses supplémentaires, incluant l'analyse microstructurale, l'étude de la croissance de la végétation naturelle, les essais au pénétromètre dynamique et au dilatomètre et l'évaluation des propriétés géomécaniques du limon traité à la chaux.

Certains essais, tels que les essais MoJET ou les essais de perméabilité in situ et en laboratoire, ayant été réalisés au cours du projet DOFEAS à 1 mois, 6 mois et 1 an, des comparaisons entre les résultats d'essais sont possibles et seront présentées lors de prochaines communications. Ces comparaisons et analyses des résultats d'essais porteront également sur l'influence de la saison de réalisation des essais sur les résultats obtenus.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les partenaires du projet pour le financement de l'ensemble de la campagne d'essais, les différents opérateurs sur site et le Centre d'expérimentation et de Recherche (Cerema) pour avoir mis à disposition ses matériels et ses équipements.

Par ailleurs, sous réserve de l'accord de l'ensemble des partenaires du projet, les résultats de ces essais pourront en partie être partagés avec les partenaires du projet Interreg NW Europe BONSAI, au sein du WP2 qui s'intéresse à l'érosion des sols naturels et des sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTM (2017). D5852 Standard Test Method for Erodibility Determination of Soil in the Field or in the Laboratory by the Jet Index Method.
- Bertola, F., Nicaise, S., Saussaye, L., Verelst, K., van Hemert, H. (2025). Lime treatment for hydraulic structures: benefits, challenges, and long-term performance. *Proceedings of the Fifth International Dam World Conference*, Lisbon, Portugal.
- Charles, I., Herrier, G., Chevalier, C., Durand, E. (2012). An experimental full-scale hydraulic earthen structure in lime treated soil. *Proceedings of the Sixth International Conference on Scour and Erosion*, Paris, France.
- Charles, I., Herrier, G., Chevalier, C., Durand, E., Puiatti, D., Fleureau, J.-M., Taibi, S., Bonelli, S., Fry, J.-J. (2015). A real experimental dike in lime-treated soil: evaluation of the methodology, mechanical and hydraulic performance. *Scour & Erosion – Cheng, Draper & An (Eds)*, Taylor & Francis Group, London, 978-1-138-02732-9
- CIRIA (2013). The International Levee Handbook. CIRIA, pp.1349, 978-0-86017-734-0. (hal-02598878)
- Das, G., Razakamanantsoa, A., Herrier, G., Saussaye, L., Lesueur, D., Deneele, D. (2021). Evaluation of the long-term effect of lime treatment on a silty seven years of atmospheric exposure: Mechanical, physicochemical, and microstructural studies. *Engineering Geology*, 281(6).
- Das, G., Razakamanantsoa, A., Saussaye, L., Losma, F., Deneele, D. (2022). Carbonation investigation on atmospherically exposed lime-treated silty soil. *Case Studies in Construction Materials*, 17.
- Henensal, P., Duchatel, F. (1990). L'érodimètre à jets mobiles. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 167:47-53.
- Kleib, J., Lesueur, D., Maherzi, W., Benzerzour, M. (2024). Carbonation of lime treated soil subjected to different curing conditions. *Transport Geotechnics* 44(2024) 101174.
- Little, D. (1995). Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. Published by Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque (Iowa).
- Makki-Szymkiewicz, L., Hibouche, A., Taibi, S., Herrier, G., Lesueur, D., Fleureau, J.-M. (2015). Evolution of the properties of lime-treated silty soil in a small experimental embankment. *Engineering Geology*, 191:8-22.
- Saussaye, L., Das, G., Razakamanantsoa, A., Rayssac, E., Deneele, D., Chevalier, C., Battist, L., Herrier, G., Lesueur, D., Poncelet, N., Jacqueline, D., Froumentin, M., Maisonnave, C., Durand, E., Ranaivomanana (2020). Digue Expérimentale du CER de Rouen en sol limoneux traité à la chaux et non traité : évaluation après 7 ans. *Proceedings of the Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Lyon, France.
- Saussaye, L., Razakamanantsoa, A., Deneele, D., Das, G. (2024). Study of carbonation in lime-treated silty soil after 1 year's exposure to air. *Proceedings of the JNGG*, Poitiers France.