

Digues résistantes en sol traité à la chaux : les apports du projet DigueELITE et les conséquences sur la conception

DigueELITE project: lessons learned from the project and impact on the design of dikes with lime treated soils

N. Nerincx¹, S. Bonelli², G. Herrier³, P. Tachker⁴, D. Puiatti⁵, F. Cornacchioli⁶, S. Nicaise², D. Lesueur³

¹ ISL, Lille, nerincx@isl.fr

² Irstea, Aix-en-Provence, stephane.bonelli@irstea.fr

³ Lhoist R&D, Nivelles (Belgique), gontran.herrier@lhoist.com

⁴ EDF-CIH, Le Bourget du Lac, pierre.tachker@edf.fr

⁵ DPST Consulting, Villemomble, daniel.puiatti@dpst-consulting.com

⁶ Arcor Technologies, Meyreuil, fcornacchioli@arcortechnologies.com

Résumé

Le traitement des sols à la chaux est couramment utilisé pour l'amélioration et la stabilisation des sols limoneux et argileux, dans le cadre de la construction d'infrastructures. L'intérêt de cette technique dans le cadre des ouvrages hydrauliques en terre est croissant. En effet, il a été montré lors de programmes de recherche que le matériau sol-chaux pouvait efficacement remplir une série de fonctions pertinentes pour les ouvrages hydrauliques : stabilité, faible niveau de perméabilité, résistance à l'érosion interne et de surface. Des expérimentations à l'échelle du laboratoire et sur des réalisations en vraie grandeur, ainsi que des retours d'expérience à travers le monde, ont appuyé ces constats.

Récemment, dans le cadre du projet de R&D DigueELITE, la résistance à la surverse d'une digue en sol traité à la chaux le long de la rivière Vidourle (Gard, France) a pu être quantifiée, à l'aide d'un dispositif d'essai de surverse in situ innovant, issu du projet. Les résultats montrent une résistance à l'érosion par surverse du sol-chaux 5 à 10 fois plus élevée que le même sol non traité, le contraste le plus important étant mesuré aux points sensibles de la digue (crête et pied de talus).

Après un bref rappel des propriétés conférées au sol par le traitement à la chaux, l'article présente :

- Les résultats des essais de surverse sur l'ouvrage démonstrateur du Vidourle et leur interprétation
- Les impacts des résultats du projet DigueELITE sur la conception des digues et des petits barrages en remblai
- Une analyse économique
- Le bilan du projet DigueELITE et les perspectives à court et moyen terme.

Mots-Clés

DigueELITE, Digue, ouvrage hydraulique, chaux, sol traité

Abstract

Nowadays, lime-treatment of silty and clayey soils is frequently used to build linear transportation infrastructures.

Use of this technology in the context of hydraulic structures is gaining strong interest. It has indeed been demonstrated, thanks to former R&D works, that lime-treated soils can successfully fulfill a series of relevant functions as far as dams and levees are concerned : slope stability, low permeability, resistance to surface and internal erosion. Lab experiments and full-scale field measurements, completed by a careful review of existing infrastructures worldwide, substantiate this statement.

As part of the recent DigueELITE R&D project, the overflow resistance of a levee made with a lime-treated soil has been measured on a structure built on the Vidourle river (France). One of the outcomes of the project was the development of a measuring device for in-situ evaluation of surface erosion, together with the corresponding test protocols and subsequent analysis. With this set-up, it was possible to demonstrate that the lime-treated soil was 5 to 10 times more resistant to overtopping than the same untreated soil, with a maximum improvement in the most sensitive zones (crest and toe).

After a brief recall of the impact of lime-treatment on relevant soil properties, this article presents:

- The results of the overflow trials on the full scale levees, and their interpretation,
- The consequences of the findings of the DigueELITE project in terms of levee and small dam design, including cost analysis,
- The overall project conclusions and further mid- and long-term perspectives.

Key words

Levee, embankment, dike, lime, soil treatment

Introduction

Le traitement des sols à la chaux dans le cadre des ouvrages hydrauliques est le centre du projet de recherche et développement DigueELITE. Plusieurs publications antérieures émanant du projet DigueELITE ont explicité le domaine de validité du traitement des sols à la chaux ainsi que les connaissances acquises et validées préalablement au projet DigueELITE.

Nous renvoyons donc le lecteur à ces publications, en particulier [1] et [2] qui décrivent les spécificités du traitement des sols dans le cadre des ouvrages hydrauliques, détaillent les principaux résultats de laboratoire rappelés succinctement ci-après, exposent les fonctions du composant sol-chaux également rappelées ci-après, et précisent ces éléments à travers quelques retours d'expérience existants.

Après un bref rappel de quelques notions de base liées aux sols traités dans les ouvrages hydrauliques et une présentation succincte de l'ouvrage démonstrateur au cœur de la démarche DigueELITE, l'accent est porté dans l'article sur les enseignements suivants du projet :

- Les résultats des essais de surverse
- Les enseignements en termes de processus de conception et réalisation
- Les conséquences des performances mécaniques et hydrauliques des sols traités à la chaux sur la conception des ouvrages et les impacts sur l'économie des projets
- Une extension aux petits barrages en remblai, dont les ouvrages écrêteurs de crue
- Les enseignements relatifs aux notions de durabilité et d'environnement
- Les perspectives suite au projet DigueELITE

Fonctions du sol traité dans un ouvrage hydraulique ; rappel des performances

Fonctions du sol traité

Les publications [1] et [2] précisent les fonctions que peut remplir un composant en sol traité à la chaux et les paramètres à étudier pour vérifier l'aptitude du composant à remplir ces fonctions. Celles-ci sont :

1. Maniabilité – mise en œuvre de sols humides
2. Stabilité
3. Étanchéité – maintien du niveau de perméabilité après traitement
4. Résistance à l'érosion interne
5. Résistance à l'érosion de surface (déversement sous faible charge/faible vitesse)
6. Évacuation – résistance aux écoulements sous forte charge/forte vitesse

Pour un projet donné, le concepteur peut donc avoir recours au traitement de sols à la chaux pour remplir une ou plusieurs de ces fonctions.

Les paramètres relatifs aux fonctions 1 à 4 sont étudiés en

laboratoire ; quelques illustrations sont données ci-après.

La fonction 5 – résistance à l'érosion de surface – est le cœur du projet DigueELITE. En effet, garantir la résistance à l'érosion de surface du composant sol-chaux permet de concevoir des digues résistantes à la surverse.

Performances du composant sol-chaux

Une rapide revue des performances démontrées au laboratoire est proposée.

1. Maniabilité : les effets du traitement à la chaux sont largement décrits dans le Guide du Traitement des Sols (GTS [2]), qui en précise par ailleurs les domaines d'application.
2. Stabilité : de nombreux essais en laboratoire décrivent l'évolution des performances mécaniques des sols traités à la chaux avec le temps, en particulier la résistance à la compression simple (R_c) ainsi que la cohésion et l'angle de frottement (c' , ϕ')

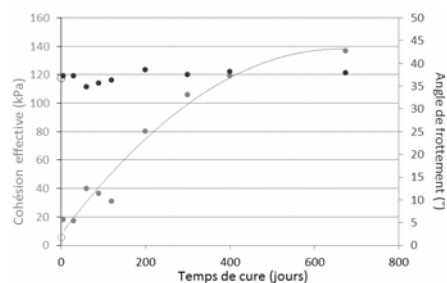


FIGURE 1 : COHESION EFFECTIVE ET ANGLE DE FROTTEMENT D'UN SOL (ARGILE LIMONEUSE) TRAITE A 3 % DE CHAUX [3]

3. Perméabilité : la publication [4] décrit les modalités permettant de maintenir un niveau de perméabilité identique avant et après traitement, à savoir mise en œuvre du côté humide de l'Optimum Proctor associée à un compactage par pétrissage (compacteur à pieds dameurs). Des perméabilités de l'ordre de 10^{-9} m/s ont ainsi été obtenues en vraie grandeur pour des limons traités à la chaux [5].

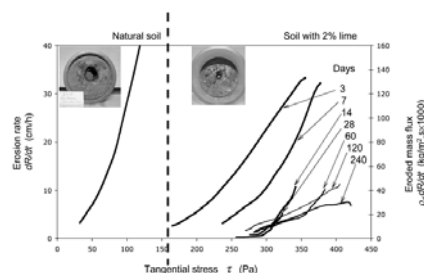


FIGURE 2 : COURBES D'EROSION (ESSAI HET - HOLE EROSION TEST) D'UN LIMON ARGILEUX SANS TRAITEMENT ET TRAITE A 2 % DE CHAUX, APRES DIFFERENTES DUREES DE CURE [6]

4. Résistance à l'érosion interne : la publication [7]

notamment détaille les effets du traitement de sols à la chaux sur la résistance à l'érosion interne (érosion de conduite) mesurée par l'essai Hole Erosion Test.

Présentation succincte de l'ouvrage démonstrateur

Dans le cadre du projet DigueELITE, un ouvrage démonstrateur a été réalisé le long du Vidourle (Gard), sous maîtrise d'ouvrage EPTB Vidourle.

L'objectif premier de l'ouvrage démonstrateur est de déployer l'essai de surverse, permettant de quantifier la résistance d'un ouvrage en terre (sol traité ou non) à cette sollicitation. Cet essai, développé dans le cadre du programme DigueELITE, est détaillé ci-après et dans l'article [8]. L'ouvrage expérimental a donc été spécifiquement conçu pour la réalisation de cet essai, avec notamment une zone en sol traité et une zone en sol non traité, afin de comparer les performances des deux sols.

L'ouvrage expérimental permet également de valider les procédés de fabrication et de mise en œuvre d'un ouvrage hydraulique en sol traité, qui diffèrent des méthodes traditionnelles de traitement appliquées dans d'autres types d'infrastructures. Un soin tout particulier a été porté au compactage, d'une part par la mise en œuvre de surlargeurs (méthode excédentaire permettant d'assurer un compactage optimal y compris des talus), et d'autre part par un plan de contrôle approfondi.

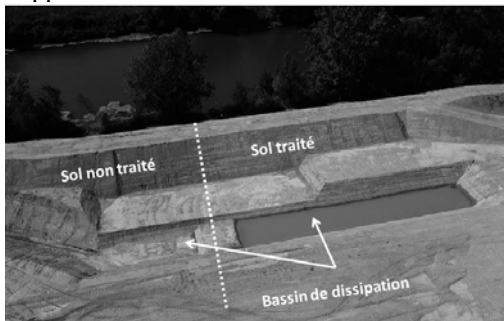


FIGURE 3 : VUE AERIENNE DE L'OUVRAGE DEMONSTRATEUR APRES REALISATION

Enseignements du projet DigueELITE

Processus de conception et réalisation

Les conditions de réalisation de l'ouvrage expérimental ont toutes été maîtrisées grâce à l'effort important porté par la maîtrise d'œuvre à tous les stades (préparation, spécifications, méthodologies, suivi de chantier, contrôles). La présence permanente de la maîtrise d'œuvre sur le chantier du Vidourle a permis d'atteindre un haut niveau de qualité, tant pour le sol traité que pour le sol non traité. Mais de telles dispositions ne pourraient être répétées dans le cadre de chantiers courants. Il convient donc de mettre en place une série d'actions permettant aux entreprises d'acquérir et de maîtriser les

connaissances et la technicité suffisantes pour réussir la construction d'ouvrages hydrauliques de faible hauteur en sol traité à la chaux. L'apport de la maîtrise d'œuvre représente aussi un point clé dans la réussite de tels ouvrages, et un accompagnement et une surveillance lors de la réalisation des travaux sont indispensables.

Dans cette démarche de maîtrise de la réalisation, les points d'attention suivants issus du retour d'expérience DigueELITE peuvent être retenus :

1. Concevoir l'ouvrage en tenant compte des performances du sol traité à la chaux : déterminer précisément les sollicitations auxquelles fera face l'ouvrage ; déterminer les fonctionnalités qui pourront être reprises par le composant sol-chaux ; déterminer les moyens à mettre en œuvre pour justifier le recours à ces fonctionnalités ; documenter le recours au sol traité à la chaux en tant que barrière de sécurité vis-à-vis des mécanismes de rupture identifiés ; comparer les solutions techniques courantes avec les solutions en sol traité à la chaux d'un point de vue technique, économique, de planification et environnemental.
2. Entreprendre une bonne reconnaissance des sols en place, état hydrique et quantité disponible,
3. Mener suffisamment en amont, et idéalement dès la phase étude, une étude de laboratoire sur l'aptitude au traitement des sols et les conditions de réalisation, validant le dosage en chaux et la performance attendue en lien avec les fonctionnalités recherchées,
4. Établir un dossier de spécifications clair et précis comprenant notamment le contexte et les objectifs recherchés ; les conditions d'extraction, de terrassement et de mise en dépôt provisoire des ressources en matériaux, la méthodologie de traitement de sol à utiliser, la description des épreuves à réaliser au préalable et les facteurs contrôlés, les opérations de contrôle à mener pendant la construction de l'ouvrage,
5. Exiger une réponse technique détaillée de la part des entreprises soumissionnaires (expériences antérieures, moyens proposés, plan d'assurance qualité) et s'assurer de leurs compétences en traitement de sol,
6. Sensibiliser l'entreprise aux risques de malfaçons et aux conséquences encourues,
7. Assurer une présence proportionnée du maître d'œuvre pendant l'exécution des travaux,
8. Définir un plan de contrôle adapté à la taille et à l'enjeu de l'ouvrage.

Il appartiendra à la maîtrise d'œuvre de dimensionner ces différentes actions proposées, de les réaliser ou de les mettre en place pour tout ou partie suivant le cas de chantier rencontré, et en particulier suivant la fonction de l'ouvrage recherchée.

Comme dans le cas du chantier du Vidourle, pour les ouvrages dont la fonction principale est d'être résistante au phénomène d'érosion de surface, ou d'érosion interne ainsi qu'à la surverse, la teneur en eau à la mise en œuvre ainsi que le dosage en chaux du sol traité doivent être maîtrisés, dans les conditions opérationnelles de chantier. Toutes les opérations, depuis l'extraction du sol naturel, sa mise éventuelle en dépôt provisoire, son traitement, sa mise en œuvre finale, doivent permettre d'obtenir et de conserver en permanence cet objectif.

Une attention particulière est à porter aux zones exigeant un travail plus précis (zones d'accès difficile, redans, épaulements, etc.) qui, si elles sont négligées, peuvent présenter des points faibles qui seront propices à l'apparition d'irrégularités localisées pouvant initier des désordres plus importants.

Déroulement de l'essai de surverse

L'IRSTEA a développé un simulateur de surverse in situ, à échelle 1 [8]. La procédure suivie s'appuie sur les recommandations de la norme américaine ASTM-D6460. Ce dispositif consiste à réaliser un écoulement continu dans deux canaux : l'un pour le sol non-traité et l'autre pour le sol traité à la chaux. Chaque canal fait 61 cm de large, et couvre la crête, le talus aval (de longueur 6,30 m et de pente 3H/2V pour l'ouvrage DigueELITE), et la plate-forme aval.

Une campagne d'essai consiste à réaliser une série d'écoulements de 30 min à débit constant, et à mesurer à chaque fois l'érosion apparue pendant ce laps de temps. Le débit initial de 95 l/s/mL est graduellement augmenté pour atteindre 570 l/s/mL (le débit est rapporté au mètre linéaire de largeur ; voir [8] pour plus de détails).

Dans le cadre de l'ouvrage DigueELITE, pour un débit proche ou dépassant les 600 l/s/mL, la lame d'eau en crête est d'environ 30 cm et correspond à une lame déversante de 48 cm, et la vitesse en pied de talus dépasse 5 m/s.

L'essai a été déployé une première fois en avril 2016, soit 9 mois après la construction de l'ouvrage, sur une durée totale d'écoulement de 4h30 par type de sol (traité et non traité). Il a été déployé une nouvelle fois en juin 2017, soit 22 mois après la construction de l'ouvrage, sur une durée totale de 17h d'écoulement par type de sol.

À noter également que le SYMADREM a déployé l'essai de surverse sur ses propres plots d'essais en sol traité en mai 2018, 9 mois environ après la construction des plots.

Résultats de l'essai de surverse

Différents dispositifs de mesure de l'érosion ont été appliqués lors des essais de surverse sur l'ouvrage du Vidourle : un scanner laser 3D avec prise de mesure à la fin de chaque palier, soit 9 prises de mesure par type de sol pour 4h30 d'essais ; des mesures manuelles à la réglette, également à l'issue de chaque palier pendant la phase d'augmentation du débit, puis à la fin des 17h d'essais (campagne 2017).

La Figure 4 permet de comparer les profondeurs d'érosion sur le sol traité et non traité. Les commentaires suivants peuvent être faits, basés sur les essais 2017, mais également valable pour la campagne d'essais 2016 :

- Une couche superficielle est érodée dès le premier palier, malgré les débits faibles, et ce tant pour le sol traité que pour le sol non traité. Une explication réside dans le fait que l'ouvrage n'a pas été recouvert de terre végétale et a donc été soumis aux intempéries (ensoleillement, humidification / séchages, épisodes orageux violents dans la région...)
- Suite à cette première érosion (premier « lavage »), l'érosion progresse sur le sol non traité et très peu sur le sol traité
- Un profil en marche d'escalier est observé sur les deux sols
- Une quantification du volume érodé par interprétation des courbes présentées en Figure 4 indique un rapport de 1 à 3 entre le volume de sol érodé sur le sol traité et sur le sol non traité
- La profondeur d'érosion moyenne sur le sol non traité est majoritairement supérieure à 7 cm, et de façon significative également supérieure à 15 cm ; pour le sol traité, la profondeur d'érosion dépasse rarement 7 cm et exceptionnellement 15 cm
- Hormis la fosse en pied d'ouvrage, l'érosion principale pour le sol traité se situe en partie haute du talus ; il faut noter que la partie la plus érodée correspond à une couche qui n'a été recouverte qu'après une interruption prolongée (long week-end), ceci mettant l'accent sur le soin à apporter à la mise en œuvre et à la protection de l'ouvrage en cas d'interruption du chantier

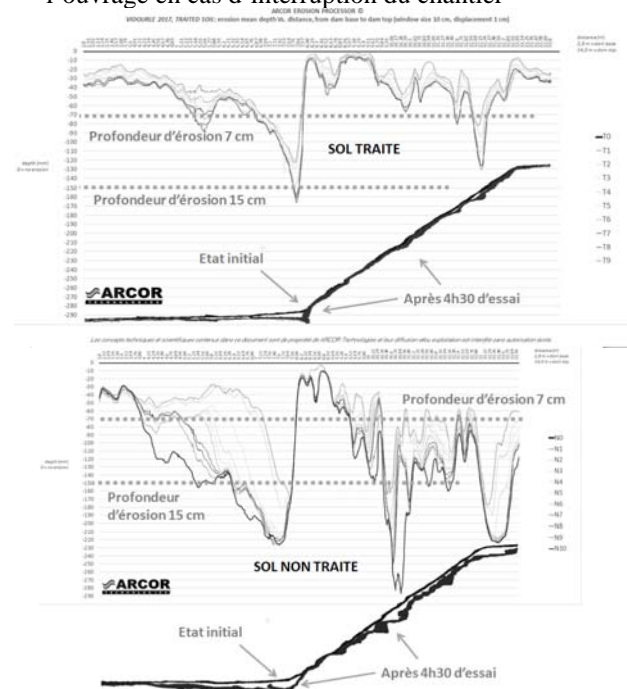


FIGURE 4 : RESULTATS DES ESSAIS DE SURVERSE, ACQUISITION SCANNER LASER 3D (ARCOR TECHNOLOGIES)

La Figure 5 montre la profondeur d'érosion maximale atteinte, mesurée ponctuellement (réglette) en crête, dans le talus et sur la plateforme aval lors des essais de 2017. Les conclusions principales de ces essais de longue durée (17h) sont, complémentaires aux observations après 4h30 d'écoulement sont :

- La profondeur maximale d'érosion est d'environ 250 mm pour le sol non traité, contre 130 mm environ pour le sol traité ;
- L'érosion s'approfondit d'environ +100 mm pour le sol non traité contre + 50 mm pour le sol traité, entre le premier (« premier lavage ») et le dernier palier ;

Une érosion supérieure à 100 mm est observée sur environ 12 % seulement du linéaire mesuré pour le sol traité, contre 85 % pour le sol non traité.

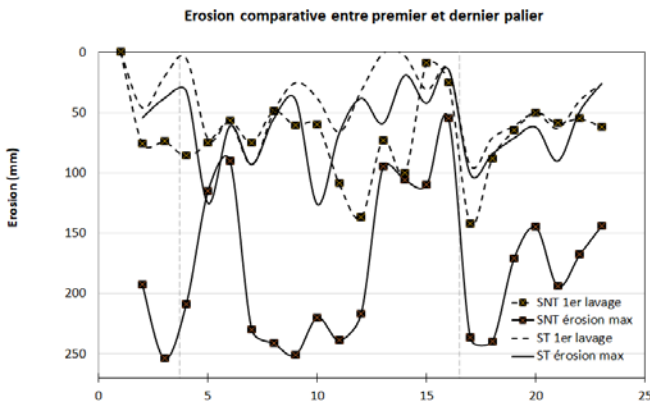


FIGURE 5 : MESURES DE LA PROFONDEUR D'ÉROSION EN DEBUT ET FIN D'ESSAI (2017, 17H D'ÉCOULEMENT) – SOL TRAITÉ (ST) ET SOL NON TRAITÉ (SNT)

Enfin, les mesures au scanner laser 3D permettent une interprétation de l'érosion en termes d'indice de Clopper (Clopper Soil Loss Index, CLSI), tel que défini dans la norme ASTM D6460. Les seuils correspondant à une érosion acceptable au sens de la norme (CLSI < 0,5 inch ou 1,3 cm) sont reportés à la Figure 6. Bien que cela ne soit valable que pour le sol testé sur le Vidourle, cette analogie indique le gain en termes de résistance à l'érosion que permet le sol traité à la chaux, autorisant ainsi la comparaison de cette technique avec d'autres protections, telles que des géosynthétiques ou des matelas pierreux.

Il convient de rappeler ici que le sol non traité a fait l'objet d'un soin tout particulier et de contrôles poussés lors de la mise en œuvre, avec notamment le passage du matériau en centrale de traitement (sans ajout de chaux), permettant un contrôle fin de sa teneur en eau et de la mouture, ce qui est tout à fait inhabituel dans la pratique courante, et par ailleurs onéreux.

À noter enfin que des résultats remarquables ont également

été observés suite aux essais de surverse réalisés par le SYMADREM sur les plots d'essais déjà mentionnés. Ces résultats feront l'objet de communications ultérieures.

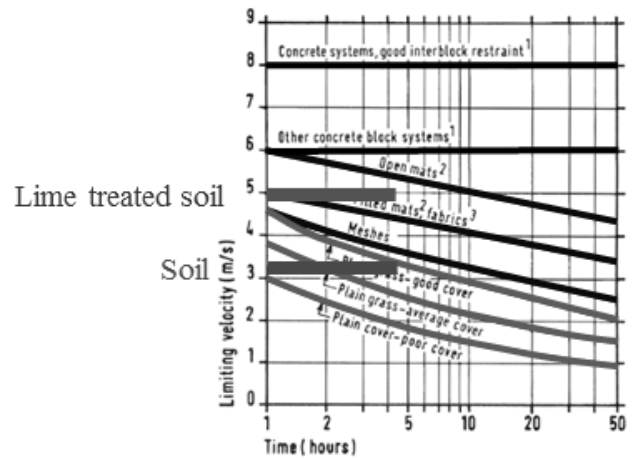


FIGURE 6 : POSITIONNEMENT DU SOL TRAITÉ ET NON TRAITÉ SUR LA CLASSIFICATION CIRIA, D'APRES LE CONCEPT D'ÉROSION ACCEPTABLE (EN FONCTION DE LA VITESSE D'ÉCOULEMENT ET DE LA DURÉE). SUR LA BASE DE [9]

Conséquences sur la conception d'ouvrages hydrauliques

Les essais réalisés dans le cadre du projet DigueELITE confirment la pertinence du traitement des sols à la chaux pour la réalisation d'ouvrages hydrauliques. La conception d'ouvrages exploitant les performances du sol traité à la chaux peut s'envisager dès aujourd'hui, selon les conditions de projet (solllicitations, matériaux, enjeux...). Plus précisément, le concepteur peut tirer parti des fonctionnalités suivantes attribuées au composant sol-chaux :

- maniabilité, de façon similaire aux travaux de terrassement classiques
- stabilité à justifier selon l'état de l'art
- capacité à retenir l'eau, en particulier pour des charges non permanentes (digues, ouvrage écrêteur de crues), pour autant que les conditions de perméabilité et de résistance à l'érosion interne soient vérifiées
- résistance à l'érosion interne, sur la base de résultats de laboratoire
- protection contre l'érosion de surface, pour autant que les sollicitations soient compatibles avec la résistance, éventuellement testée in situ, du sol traité.

Il est bien entendu que certaines situations complexes doivent être étudiées avec un soin particulier, comme de (très) mauvaises conditions de fondation (très meubles, hétérogènes) ou des charges sismiques élevées.

Dans ce cadre, les avantages pour le concepteur et le Maître d'ouvrage sont :

- limiter le besoin en matériaux nobles tels que sables propres, graviers, remblais, en valorisant au mieux les matériaux du site
- permettre, dans des conditions définies, la surverse, menant à des réductions de coût par rapport à des

protections de surface du type enrochement, matelas pierreux,...

- simplifier la coupe type, en limitant le recours à des dispositifs complexes de filtration et drainage
- la possibilité de végétaliser l'entièreté de l'ouvrage, vu l'absence de recours à des protections de surface
- la possibilité de raidir les pentes
- la limitation des emprises
- la réduction des coûts de construction, du transport de matériaux et des nuisances associées, telles que trafic, détérioration du réseau routier local, poussières...

l'ouvrage ou en carapace épaisse) permet d'accepter des désordres sans mener à la ruine. De telles conceptions sont donc une réponse particulièrement intéressante dans le contexte de l'adaptation au changement climatique.

Études de cas et économie du projet

Afin d'illustrer les impacts des résultats du projet DigueELITE sur la conception d'ouvrages, deux cas d'étude sont présentés ci-après.

Le premier cas est celui d'une digue déversante faisant partie d'un système d'endiguement d'un cours d'eau du sud de la

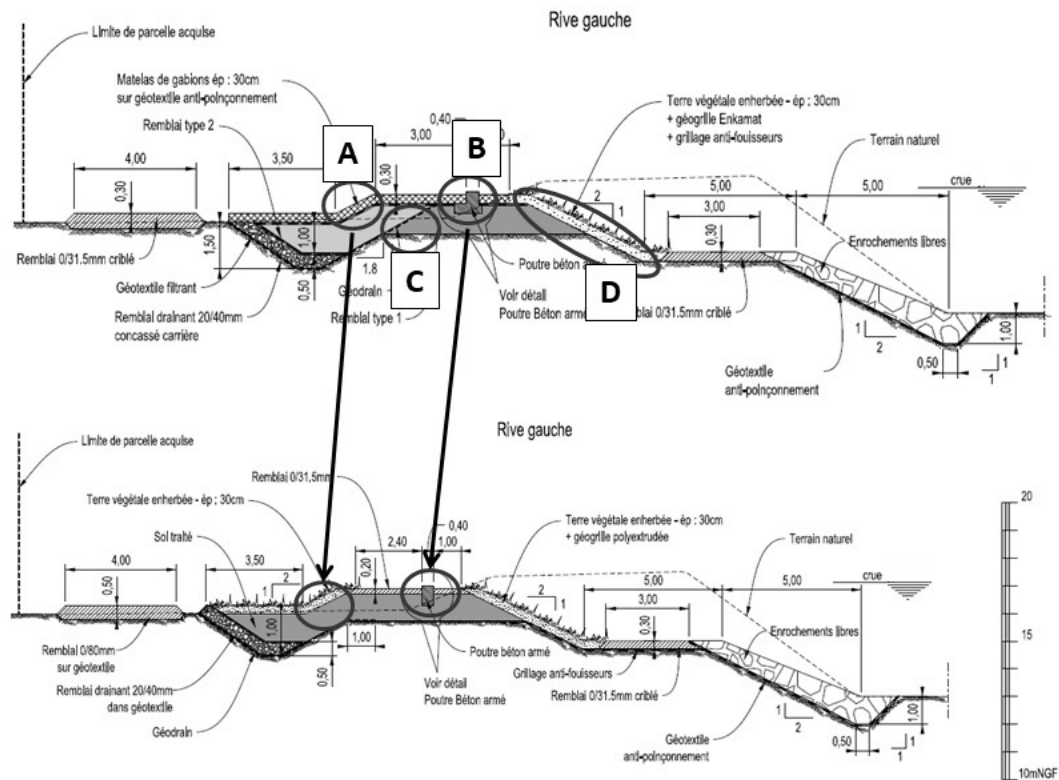


FIGURE 7. COMPARAISON CONCEPTION CLASSIQUE ET VARIANTE EN SOL TRAITE A LA CHAUX POUR UNE DIGUE DEVERSANTE

À noter enfin que la notion de digue résistante à la surverse prend tous son sens dans un contexte de changements climatiques. Les changements climatiques vont très probablement mener à une augmentation des débits de pointe et une augmentation de la fréquence des crues. Dans la plupart des cas, il sera impossible de rehausser continuellement les digues pour les rendre insubmersibles pour des périodes de retour de 100 ou 1000 ans, même pour des zones à enjeux majeurs. La conception actuelle des ouvrages ne tolère pas le déversement (sauf sur les zones déversoirs spécifiquement pourvues de protections), avec à la clé des risques pour les vies humaines et les biens. Avec une conception exploitant les performances du sol traité à la chaux, les digues ne rompent pas en cas de surverse. En effet, le traitement à la chaux (dans l'ensemble du corps de

France. Le tronçon déversant était initialement prévu avec une conception traditionnelle, à savoir essentiellement une protection par matelas pierreux. Dans le cadre de DigueELITE, une conception en sol traité a été proposée au Maître d'Ouvrage, et étudiée au stade de projet. Le composant sol-chaux assure les fonctions de résistance à l'érosion interne et résistance à l'érosion de surface. Par ailleurs, la fonction étanchéité (s'agissant d'une digue sèche) est également assurée par le sol-chaux.

Cette variante permet les modifications suivantes de conception :

- suppression des matelas pierreux sur le talus côté zone protégée ; le sol-traité assure la résistance au déversement (Figure 7, A)
- le talus et le pied côté zone protégée peuvent être

végétalisés, pouvant remplacer avantageusement des solutions minérales, d'un point de vue paysager et environnemental (Figure 7, A)

- le talus côté rivière est recouvert de terre végétale enherbée uniquement ; le grillage anti-fouisseur étant rendu inutile du fait de la résistance du sol traité au creusement de terrier (Figure 7, D)
- la poutre de calage en crête est ancrée dans le sol traitée, ayant une portance et une rigidité nettement supérieure au sol non traité ; de ce fait la fondation de cette poutre est réduite (Figure 7, B)
- le corps de l'ouvrage est homogène (pas de recharge aval drainante), évitant ainsi la pose d'un géodrain à l'interface entre les matériaux (Figure 7, C)
- la perméabilité du sol traité est compatible avec le fonctionnement hydraulique de l'ouvrage.

L'étude économique de la variante, réalisée de façon détaillée à l'aide du logiciel EDITERRA, montre une réduction des coûts de l'ordre de 35 à 40 %, à hypothèses de définition des coûts similaires, essentiellement du fait de l'absence de matelas pierreux et de la diminution de la fondation de la poutre de calage, qui compensent largement le surcoût lié au traitement des sols. Cette réduction de coûts, cohérente avec les économies observées depuis 40 ans sur les chantiers de terrassement classiques (20 à 40 %) où les sols médiocres sont valorisés par le traitement à la chaux, méritera à l'avenir d'être confirmée par des opérations de grande envergure.

La réduction de coût est liée au mode de traitement (réduction plus importante si traitement en place). L'analyse économique montre par ailleurs que la réduction de coût diminue lorsque la hauteur de l'ouvrage augmente. Il est probable que pour des ouvrages de plus grande hauteur, une variante zonée (en sol traité et non traité) constitue un optimum économique.

Il faut noter par ailleurs que dans ce cas précis :

- le site ne souffre pas de manque de matériaux ; il y a plutôt un risque d'excédent de sol. De ce fait, il n'a pas été nécessaire de raidir les pentes (raidissement possible, du fait de l'augmentation de la résistance au cisaillement), ce qui aurait également pu contribuer à diminuer les coûts
- les sollicitations hydrauliques, les dimensions de la digue et les caractéristiques du sol en place (traité ou non) écartent le risque d'érosion interne. Dans le cas de conditions de sites plus pénalisantes, le recours au sol traité permet d'éviter le risque d'érosion interne dans le corps de l'ouvrage, et limite donc la mise en œuvre de dispositifs parfois complexes de filtration et drainage, ce qui est également une voie d'économie non négligeable.

Ce type de conception est désormais applicable et le retour d'expérience de DigueELITE permet d'envisager à court terme une réalisation concrète, en justifiant la stabilité et la pérennité de la digue vis-à-vis des mécanismes de rupture

courants. Selon les cas, un plot d'essai préalable avec essais de surverse peut s'avérer utile.

Un second cas est l'étude préliminaire de l'intérêt du traitement des sols à la chaux dans le cadre d'ouvrages d'écrêtement des crues hors rivière. Le cas analysé consiste à réaliser des bassins pour permettre le stockage temporaire de volumes de crue. Les ouvrages sont de faible hauteur et de grandes superficies, induisant une houle caractéristique significative, en particulier en la rapportant à la profondeur d'eau stockée. De ce fait, une revanche importante est nécessaire pour éviter le risque de déferlement.

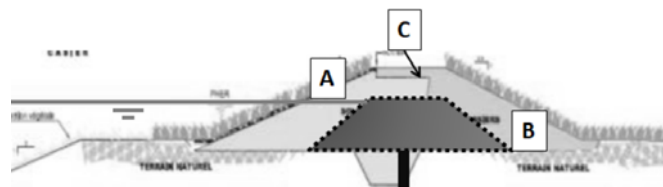


FIGURE 8. COMPARAISON CONCEPTION CLASSIQUE ET VARIANTE EN SOL TRAITÉ A LA CHAUX POUR UN OUVRAGE DE RETENTION

La conception en sol traité à la chaux permet d'envisager dans ce cas une économie significative de matériaux, du fait

- du raidissement des pentes, grâce à l'amélioration des propriétés mécaniques (Figure 8, B)
- la diminution, voire la suppression de la revanche (Figure 8, A) ; en effet, le sol traité résistant à l'érosion externe, un déversement dû au battillage, pendant des périodes courtes d'opération des bassins, est acceptable sans mettre en péril l'intégrité et la stabilité de l'ouvrage. Cet effet de diminution/suppression de revanche est d'autant plus significatif que le rapport entre revanche et hauteur d'eau est grand.

On remarque également que compte tenu des caractéristiques géomécaniques du sol traité à la chaux, il est possible d'envisager un remblai homogène plutôt qu'un ouvrage zoné (Figure 8, C). Cette simplification induit également une économie en termes de réalisation.

Vu le stade préliminaire de l'étude, la question des emprunts n'a pas été formellement étudiée, tant en termes d'économie (recours à des quantités moindres de matériau, recours à des matériaux a priori impropres à la mise en œuvre car trop plastiques, trop humides...) ni en termes d'aptitude au traitement (les sols disponibles sont-ils aptes au traitement).

Extension aux petits barrages

Dans le cadre du projet DigueELITE, les réflexions ont été étendues au cas des petits barrages, en collaboration avec un groupe de travail dédié du CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs), intégrant des représentants de plusieurs ingénieries françaises (ISL Ingénierie, Artelia, EDF, Tractebel), ainsi que l'IRSTEA [2].

On peut distinguer ici les très petits barrages (hauteur

inférieure à 15 m sur fondation), pour lesquelles les considérations ne sont pas fondamentalement différentes de celles relatives aux digues. Les réflexions ont également été étendues aux ouvrages jusqu'à 30 m de hauteur, pour lesquelles des contraintes complémentaires s'appliquent, et notamment le développement éventuel de pressions interstitielles à la construction ou encore la rupture fragile à la base.

Dans les deux cas ($h < 15$ m et $h > 15$ m), il est considéré à ce stade des études et recherche que le remblai ne peut assurer seul la retenue d'eau si elle est permanente. Il en résulte qu'une étanchéité rapportée (typiquement géomembrane) est préconisée pour les ouvrages à charge permanente (le retour d'expérience limité en étanchéité primaire pour les sols chaux impose pour le moment une certaine prudence) et jugée non nécessaire pour les ouvrages à charge non permanente. Les résultats de ces recherches basées sur des essais en laboratoire et des modélisations numériques sont, succinctement, et pour le type de sol étudié :

- la possibilité de tenir compte de l'évolution des caractéristiques mécaniques (résistance au cisaillement, rigidité) dans la conception d'un petit barrage en sol traité à la chaux,
- l'importance d'étudier finement la stabilité pendant les phases de construction, en particulier la cinétique d'évolution des caractéristiques géomécaniques en lien avec la vitesse de montée du remblai,
- l'absence de risque lié aux pressions interstitielles à la construction pour des vitesses courantes de montée du remblai,
- le tassement propre de l'ouvrage est limité à environ 1 % de la hauteur de l'ouvrage,
- la stabilité de l'ouvrage peut être justifiée pour des pentes de l'ordre de $1,25H/1V$,
- l'importance de recourir à des modèles de comportement prenant en compte l'érouissage et dépendant du temps pour vérifier la stabilité et les tassements.

Cette conception n'a à ce jour pas fait l'objet d'étude économique. Le gain attendu est fortement dépendant de la disponibilité des matériaux sur le site ; le gain sera d'autant plus important que le traitement à la chaux permet de recourir à des matériaux locaux a priori impropres à l'élévation d'un remblai, et/ou permet de limiter le transport.

Durabilité

Dans le langage commun, la problématique de la durabilité peut se résumer à la question suivante : l'ouvrage sera-t-il toujours à même de remplir ses fonctions telles que définies lors de sa conception, dans 10 ans, 20 ans, 50 ans...

La meilleure preuve de durabilité est apportée par l'expérience sur des ouvrages anciens. Il faut remarquer qu'il est difficile de trouver des ouvrages anciens pour un procédé qui se veut innovant. Il faut donc travailler avec des ouvrages

ayant mis un œuvre un concept ou des techniques proches de celles visées.

À ce titre, on peut se référer aux ouvrages suivants :

Dans le domaine des ouvrages hydrauliques, le canal de Friant Kern (USA, Californie) est l'exemple le plus parlant. Construit dans les années 1970, le fond de ce canal ainsi que ses berges sont recouverts sur certains tronçons d'un corroi d'argile traitée à la chaux, compacté à l'aide d'un rouleau à pieds dameurs (moins performants que ceux disponibles à l'heure actuelle). Il est encore fonctionnel aujourd'hui, et par ailleurs dans un bien meilleur état de conservation que certains tronçons adjacents confortés avec des techniques traditionnelles (enrochements, dalles de béton non armé). Il est soumis à un écoulement d'environ 1 à 2 m/s de façon quasi continue. Il est bien entendu que tant les conditions de mise en œuvre (type de sol, taux de chaux, matériels utilisés,...) que les sollicitations sont propres à ce site, comme c'est par ailleurs le cas pour tout projet, qui est unique. Néanmoins il s'agit d'un ouvrage ayant fait ses preuves sur plus de 40 années. Cet exemple largement documenté, ainsi que des études expérimentales en laboratoire [10, 11, 12] tendent à démontrer que l'effet des percolations à travers un ouvrage en sol traité n'est pas dimensionnant, du fait du faible niveau de percolation (faible perméabilité) et que les liaisons pouzzolaniques, majoritaires à long terme, sont très peu solubles. La chaux disponible résiduelle dans le matériau permet aussi de pérenniser ces liaisons à long terme

De façon générale, on peut se référer à [2] pour plus d'information sur des ouvrages hydrauliques existants en sol traité.

Il est pertinent également d'évoquer les innombrables chantiers de terrassement classique en sol traité à la chaux, dans des contextes variés, en termes de sols, de taux de chaux, de techniques de mise en œuvre, de fonctionnalités, de sollicitations,... De très nombreux chantiers d'autoroutes, LGV et plateformes aéroportuaires notamment ont été mis en œuvre depuis plus de 50 ans. Dans ces contextes, la durabilité n'est pas à démontrer. Les terrassiers en sont eux-mêmes convaincus.

Environnement

L'évaluation de l'impact environnemental du traitement des sols à la chaux doit s'entendre sous diverses facettes décrites ci-dessous.

Tout d'abord, le traitement des sols à la chaux induit une augmentation importante de la basicité du sol qui se maintient à des niveaux élevés pendant plusieurs années à plusieurs décennies. Il est donc pertinent d'évaluer le risque et/ou l'impact d'une potentielle diffusion des ions calcium et hydroxydes, initiateurs de ce pH élevé.

Le rapport de projet SOTREDI [13] s'intéresse à cette question et rapporte les résultats d'essais en laboratoire ainsi que sur planches d'essais en vraie grandeur, dont les grands enseignements sont rappelés ci-dessous.

L'essai en laboratoire est réalisé grâce à une colonne de lixiviation, qui permet de faire circuler l'eau (eau distillée neutre, pH = 7) dans un échantillon sous une pression de 0,1 MPa, soit à peu près 10 m de colonne d'eau. Le flux rencontre d'abord une couche de sol traité puis passe à travers deux couches de sol non traité.

L'analyse des eaux de lixiviation montre une augmentation du pH de 1 à 2 unités, pour atteindre un pH de 9, dans le cas d'un traitement du sol à 3 %. Cette valeur est à comparer avec le pH élevé, de l'ordre de 11 à 12, dans le sol traité. Les eaux de lixiviation sont donc légèrement plus basiques que les eaux n'ayant pas traversé le sol, mais sont à des niveaux nettement inférieurs au pH du sol traité. Les conditions de l'essai sont également pénalisantes et ne représentent pas les conditions réelles d'écoulement à travers un ouvrage hydraulique.

Concernant la basicité du sol, les essais en laboratoire ont montré que le pH des sols naturels adjacents n'augmente pas, si ce n'est une légère augmentation dans la fine couche limitrophe au massif traité à la chaux (5 à 6 cm). Ces couches adjacentes sont dès lors considérées comme agissant comme « tampons », ce qui a été démontré par des essais en vraie grandeur.

Des essais en vraie grandeur (voire notamment [14]) ont démontré l'effet limité du traitement sur le pH des eaux ayant percolé le sol traité, et ce d'autant plus qu'une couche de sol non traité en contact avec le sol traité est présente et agit comme tampon pour neutraliser la diffusion à partir des massifs traités à la chaux. Par ailleurs, les essais en vraie grandeur confirment que l'augmentation du pH des couches de sol non traité, adjacentes à du sol traité, est limitée à une zone de quelques centimètres (zone tampon) ; les massifs non traités avoisinants ne sont donc pas atteints par une augmentation du pH.

Par ailleurs, il a été montré dans le cadre du projet DigueELITE que l'impact d'une éventuelle dispersion de chaux dans l'environnement suite à une brèche dans un ouvrage est modeste, et que les concentrations en chaux libérées restent inférieures aux seuils de toxicité issus de tests de l'ECHA (European Chemicals Agency) [15] sur des vivants sensibles.

La mise en œuvre d'une digue en sol traité à la chaux a recours à toutes les techniques usuelles d'un chantier de terrassement de digue, identiques aux techniques appliquées sur le chantier de digue classique.

La seule différence en matériel et matériaux utilisés réside dans le traitement du sol.

La chaux est traditionnellement mise en œuvre pour le traitement selon différentes méthodologies :

- Le traitement en place, par épandage de la chaux sur la surface à traiter, malaxage et compactage. En cas d'enjeux environnementaux, le recours à la chaux à émission de poussières réduite permet de diminuer fortement le risque de libération de poussière.

- Le traitement en centrale, fixe ou semi-mobile, permettant un malaxage sous cloche (compartiment fermé), sans émission de poussière. Les seuls risques se situent au chargement des silos mais ceux-ci sont équipés de filtres. Un risque résiduel d'accident doit malgré tout être considéré : la rupture du flexible qui relie le camion au silo. C'est très rare mais de probabilité non nulle.

Il est utile de signaler que la technique du traitement à la chaux a été utilisée avec succès dans le cadre d'un chantier de restauration de digues en 2011 sur un affluent de la Garonne en région bordelaise (l'Estey d'Eyrans [16]). Ce chantier délicat de par son accessibilité difficile, son contexte d'exposition aux marées et le respect des zones avoisinantes classées Natura 2000, constitue un précédent de réalisation hydraulique en sol traité à la chaux respectueux de l'environnement.

Du fait même de son obtention par calcination de roche calcaire, la production de chaux s'accompagne de dégagement de CO₂. La question du bilan carbone lié au traitement des sols à la chaux a été traitée en grande partie dans le projet TERDOUEST [17]. Les conclusions de ce projet signalent qu'il faut également tenir compte d'une série de critères additionnels, qui s'insèrent dans les piliers du développement durable (environnement, société, économie) :

- Bilan économique généralement positif ;
- Bilan positif en termes de gestion des ressources naturelles (réemploi de matériaux locaux, en lieu et place d'emploi de matériaux nobles de carrières ou de béton)
- Préservation des infrastructures locales de transports
- Gain de temps, réduction des aléas météo
- De plus, les émissions de CO₂ liées à la production de chaux elle-même sont réduites du fait des faibles dosages pratiqués (2 à 3 % de la masse sèche du sol). Ces émissions, liées à la réalisation de l'ouvrage doivent par ailleurs être évaluées en tenant compte de toute la durée de vie de l'ouvrage.



FIGURE 9. : AMENAGEMENT DE L'ESTEY D'EYRANS, UNE ANNEE APRES TRAVAUX [13]

Enfin, il faut rappeler qu'un ouvrage en sol traité à la chaux peut parfaitement être recouvert de terre végétale enherbée, solution nettement plus qualitative d'un point de vue

paysager et environnemental que des solutions de génie civil qui ne seraient pas végétalisées (type béton, enrochements, matelas pierreux...). Cette solution de végétalisation est par ailleurs préconisée de façon générale, pour protéger le remblai en sol traité à la chaux des éléments extérieurs (atténuation des cycles d'humidification / séchage, des cycles gel / dégel, protection contre les conditions extrêmes d'ensoleillement ou de vent...).

Conclusions

Le projet DigueELITE a permis de réaliser une démarche de R&D complète autour de l'utilisation du sol traité à la chaux dans les ouvrages hydrauliques :

- Analyse de l'état de l'art existant au démarrage du projet
- Caractérisation du matériau et essais de laboratoire
- Etudes et conception d'un ouvrage expérimental
- Réalisation de cet ouvrage
- Essais sur l'ouvrage, avec le développement d'un dispositif innovant d'essai de surverse
- Analyse des enseignements de l'ouvrage expérimental, sur les volets conception (y compris études géotechniques et de traitement), réalisation, environnement, économique.

Ce projet a permis de rassembler un savoir faire technique de pointe autour d'un concept innovant de digues résistantes à la surverse.

À ce jour, le concept peut s'appliquer à des projets à enjeux et sollicitations modérés, dans l'attente d'un retour d'expérience en développement actuellement, pour élargir le champ d'application. Il reste toutefois impératif de suivre une démarche d'étude et de réalisation sérieuse, prenant en compte les enseignements du projet DigueELITE.

Grâce au traitement des sols à la chaux, la résistance à l'érosion interne et externe du remblai d'un ouvrage hydraulique peut être prise en compte dans la conception pour limiter le recours à des dispositions complexes et/ou coûteuses de filtres / drains et protections de surface. Les principaux avantages sont :

- Limiter le recours à des matériaux nobles (type sable, graviers, enrochements, matelas pierreux, béton...) par la valorisation des matériaux du site
- Simplifier les coupes types, et en particulier des dispositions relatives à la filtration et au drainage du corps de l'ouvrage,
- La possibilité d'enherber la totalité de l'ouvrage, étant donné que des protections de surface peuvent ne plus être nécessaires,
- La réduction des coûts globaux et du transport de matériaux.

Le présent article synthétise les principaux enseignements de ce projet, et préfigure un document de synthèse du projet à destination des Maîtres d'Ouvrages, Maîtres d'œuvre, Entreprises de travaux et services de contrôle.

Remerciements

Les auteurs remercient les financeurs du projet DigueELITE (BPI France, Région Provence Alpes Côte d'Azur, Conseil Général des Bouches du Rhône) ainsi que l'EPTB Vidourle.

Références

- [1] NERINCX et al. (2017). *Tronçons de digue résistant à la surverse : quantification de la résistance à l'érosion interne et à l'érosion de surface dans le cadre du projet DigueELITE*. Colloque CFBR-SHF : «Hydraulique des barrages et des digues », Chambéry, 29-30 novembre 2017
- [2] SETRA – LCPC (2000). *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS) - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme - Guide technique*.
- [3] NERINCX et al. (2018). *Petits barrages et digues en sols traités : matériaux, concepts, comportement, retours d'expérience et innovation*. Commission Internationale des Grands Barrages - Vingt sixième congrès des grands barrages, Vienne, juillet 2018
- [4] MAKKI-SZYMKIEWICZ L et al. (2015) *Evolution of the properties of lime-treated silty soil in a small experimental embankment*, Engineering Geology, 191, pp 8-22
- [5] CHARLES I. et al. (2012). *An experimental full-scale hydraulic earthen structure in lime treated soil*. Proceedings of the 6th International Conference on Scour and Erosion, Paris, France
- [6] BENNABI, A.; HERRIER, G.; LESUEUR, D. (2016) *Lime treated soil erodibility investigated by EFA erosion testing*, ICSE-8 : International Conference on Scour and Erosion, Oxford, United Kingdom, 12-15 September 2016, 6p.
- [7] HERRIER G. & BONELLI S. (2014) *Internal erosion resistance of soils treated with lime: An evolutive benefit*, Proceedings of the 7th International Conference on Scour and Erosion, Perth, Australia.
- [8] MERCIER et al (2017). — *Digues et petits barrages en terre : un appareillage permettant de simuler une surverse in situ*, Colloque CFBR-SHF : «Hydraulique des barrages et des digues », Chambéry, 29-30 novembre 2017
- [9] HEWLETT et al (1987). *Design of reinforced grass water-ways*. CIRIA Report 116, Construction and Industry Research and Information Association, Londres.
- [10] McCallister, CD and Petry, TM. *Physical property changes in a lime-treated expansive clay caused by leaching*. Transportation Research Record 1295 (1991) p37.
- [11] Lequiller, B.; Ferber, V.; Cuisinier, O.; Deneele, D. ; Cui, Y.-J. *Stability of the solidification process of a lime-treated silt under percolation conditions*. Advances in Transportation Geotechnics (2008) p665
- [12] Deneele, D. ; Le Runigo, B. ; Cui, Y.-J.; Cuisinier, O.; Ferber, V. *Experimental assessment regarding leaching of lime-treated silt*. Construction and Building Materials 112 (2016) p1032.
- [13] HERRIER, G., et al (2012). *Traitement des sols à la chaux pour ouvrages hydrauliques, Rapport final du programme partenarial de recherches SOTREDI (Soil Treatment for Dikes)*. Limelette (Belgique): Lhoist Ed.
- [14] DETRY, J., VAN DEN BERGH, H. et BOLLENS, Q. (2005) *Etude d'une planche expérimentale de limon traité à la chaux il y a 30 ans - Analyse de son comportement mécanique et de son influence environnementale sur son environnement direct*. Symposium TREMTI
- [15] <http://echa.europa.eu/fr/guidance-documents/guidance-on-information-requirements-and-chemical-safety-assessment>.
- [16] NORENA, E. et al. (2013) *Restauration des berges et digues de l'Estey d'Eyrans au moyen du traitement à la chaux : une solution performante et respectueuse de l'environnement*. Digue Maritimes et Fluviales de Protection contre les Submersions, 2è Colloque National.
- [17] IDRRIM (2015), Enseignements de TerDOUEST ; Propositions de compléments au Guide Traitement des Sols,

- [18] HAAS, S., & RITTER, H. J. (2018). *Soil improvement with quicklime: long-time behaviour and carbonation*. Road Materials and Pavement Design, 1-11