



HAL
open science

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

N. Nerincx, Stéphane Bonelli, F. Cornacchioli, J.J. Fry, G. Herrier, Florian Mercier, Sylvie Nicaise, D. Puiatti, J.M. Richard, J.M. Tachker

► **To cite this version:**

N. Nerincx, Stéphane Bonelli, F. Cornacchioli, J.J. Fry, G. Herrier, et al.. 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 SHF/CFBR "Hydraulique des barrages et des digues", Nov 2017, Chambéry, France. pp.322-333. hal-01819240

HAL Id: hal-01819240

<https://hal.science/hal-01819240>

Submitted on 20 Jun 2018

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

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

Hydraulique des barrages et des digues

Chambéry, 29 et 30 novembre 2017



Barrage de Palisse ©BETCGB



Barrage de Yaté ©BETCGB -S. Aigouy



Digue Isère © ENSHMG – Ph. Bois

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

Nicolas NERINCX¹, Stéphane BONELLI², Francesco CORNACCHIOLI³, Jean-Jacques FRY⁴, Gontran HERRIER⁵, Fabienne MERCIER², Sylvie NICAISE², Daniel PUIATTI⁶, Jean-Marc RICHARD⁷, Pierre TACHKER⁴

¹ISL Ingénierie, Lille (France)

²Irstea, Aix-en-Provence (France)

³Arcor Technologie, Meyreuil (France)

⁴EDF-CIH, Le Bourget du Lac (France)

⁵Lhoist Recherche et Développement, Nivelles (Belgique)

⁶DPST Consulting, Villemomble (France)

⁷Lhoist Southern Europe, Paris (France)

Une digue fluviale de protection est un ouvrage linéaire, en surélévation par rapport au TN, faisant partie d'un système de protection contre les inondations de cours d'eau. L'état de l'art actuel concernant les digues est en pleine évolution. Le projet de recherche DigueELITE s'inscrit dans cette dynamique, avec un angle résolument « matériau » focalisé sur l'utilisation innovante du sol traité à la chaux.

Les composants structurels des différents tronçons de digues se définissent par leurs fonctions géotechniques, hydrauliques ou structurelles. Selon le rôle qu'on veut lui faire jouer dans l'ouvrage hydraulique, le composant peut satisfaire aux exigences propres de différentes fonctions. Six fonctions sont proposées par DigueELITE: 1) maniabilité à la mise en œuvre, 2) stabilité mécanique, 3) étanchéité (liée à la perméabilité), 4) résistance à l'érosion interne, 5) résistance à l'érosion de surface par surverse, 6) évacuation (déversoir). Il est capital de quantifier la capacité du matériau à satisfaire une ou plusieurs fonctions.

Afin d'étudier de manière unifiée la résistance du matériau sol traité à la chaux aux sollicitations hydrauliques internes et externes, une digue expérimentale en remblai a été construite le long de la rivière Vidourle en juillet 2015, dans le cadre du projet DigueELITE, de 50 m de long et 3,5 m de haut.

Cette communication synthétise la méthodologie déployée et les résultats obtenus avec deux appareillages innovants : la simulation au laboratoire de l'érosion interne sous écoulement turbulent, et la simulation in situ de l'érosion de surface sous écoulement à surface libre sur forte pente. La communication conclut sur les perspectives offertes au concepteur par l'utilisation des performances remarquables du sol traité à la chaux.

Mots-clefs : digue, érosion, surverse, traitement, chaux, innovation

Steady overflow resistant flood protection dike : quantification of resistance to internal and external erosion in the frame of DigueELITE project

Knowledge about flood protection dike is under continuous development. French R&D project DigueELITE aims to develop state of the art flood protection dikes making innovative use of lime treatment of soil.

Structural components of different dike stretches may be distinguished by their geotechnical, hydraulic or structural role. The components may have to satisfy different functions in the hydraulic structure. Six functions are proposed by DigueELITE : 1) workability, 2) stability, 3) ability to retain water, 4) resistance to internal erosion, 5) surface protection, 6) evacuation (spillway). It is mandatory to assess material's ability to satisfy one or more functions.

Amongst other goals, DigueELITE aims to study both internal and external erosion resistance (function 4 to 6) of lime treated soil, in one single project unlike many other researches about the same topic, in order to get a comprehensive understanding of lime treated soil behavior under hydraulic stress. Therefore, an experimental dike has been built along Vidourle River (south of France) in summer 2015. The dike is about 50 m long and 3,5 m high.

This paper summarizes the process of internal and external erosion testing and results obtained with two innovative test devices: laboratory test of internal erosion under turbulent flow, and in situ surface erosion test under free surface flow with steep slope. The paper concludes with some design optimizations and innovations made possible by the remarkable performance of lime treated soil.

Key words: dike, levee, erosion, overflow, lime treatment, innovation

I INTRODUCTION

Un guide international, l'International Levee Handbook [CIRIA, 2013], et un référentiel technique national, le Référentiel technique Digue maritime et fluviale [MEDDE, 2015] présentent désormais clairement les principes liés aux systèmes de protection contre les inondations, également appelé système d'endiguement. Un tel système permet notamment d'éviter les inondations jusqu'à un niveau dit "niveau de protection". Au-delà du niveau de protection, il y a inondation du val protégé. Il est nécessaire de quantifier les caractéristiques de l'inondation, et de réduire les risques associés, via notamment des éléments tels que les déversoirs et les tronçons résistants à la surverse.

La technicité des tronçons déversoirs en domaine fluvial est documentée [Degoutte, 2012]. Pour les tronçons résistants à la surverse, la pratique est de protéger la digue par un revêtement : asphalte, enrochements, enherbement ou tout autre type de protection de surface connue. La qualification de la résistance à la surverse est qualitative et se fait alors à dire d'expert pour une crue de référence. L'expert compare, à l'aide de documents techniques, l'action hydraulique et la résistance du revêtement déterminée par ailleurs et parfois plusieurs années avant, le plus souvent sur canal hydraulique de laboratoire. Enfin, en ce qui concerne les tronçons non résistants à la surverse, la pratique est de supposer que s'il y a surverse, il y a rupture par brèche, et ce, très rapidement. La probabilité d'occurrence du mécanisme de défaillance est alors évaluée à partir des seules études hydrologiques et hydrauliques, et n'intègre aucune étude géotechnique relative à la résistance du sol à un écoulement de surverse.

Pour développer et qualifier une nouvelle solution de protection de surface, il faut disposer d'un équipement hydraulique spécifique : c'est par exemple le cas du grand canal du laboratoire hydraulique de l'Université du Colorado à Fort-Collins [Thornton, 2012]. En revanche, il est actuellement impossible de qualifier, vis à vis de sa résistance à un écoulement de surverse, un sol constitutif d'un tronçon de digue. C'est l'objet de cette communication, qui concerne l'utilisation d'un matériau qui n'a encore pas été utilisé pour les digues fluviales, à quelques rares exceptions près : le sol traité à la chaux.

Le traitement des sols à la chaux est un procédé qui améliore la maniabilité des matériaux limono-argileux et leur confère des propriétés mécaniques après compactage. Les avantages de cette technique sont surtout connus dans les terrassements et sont largement mis à profit pour la construction des remblais routiers, autoroutiers, ferroviaires, plates-formes industrielles, etc.

Le développement du traitement à la chaux dans les ouvrages hydrauliques s'est réalisé plus lentement. Les principaux avantages de la technique ont été rapportés à partir de la fin des années 1970 : limiter la dispersivité des sols, prévenir les fuites et résister aux écoulements. La réduction des phénomènes de retrait-gonflement des argiles très plastiques grâce au traitement à la chaux est également un avantage majeur. Plusieurs cas de confortement ou réparation ont été réalisés par les gestionnaires américains et australiens depuis le début des années 1970 [Nerincx *et al*, 2016]. Outre les propriétés mécaniques et hydrauliques conférées au sol par le traitement à la chaux, l'expérience montre que la technique présente un avantage économique significatif, notamment dans le cas de la réutilisation de matériaux jugés impropres à la mise en œuvre à leur état naturel.

D'importants efforts de recherche au laboratoire et in-situ ont été mis en œuvre pour quantifier les performances du sol traité à la chaux, en termes de stabilité, (im)perméabilité et résistance à l'érosion interne. Ces résultats sont actuellement exploités par le Comité CMD (Cemented Material Dams - comité P) de la CIGB, dans le bulletin en cours de rédaction consacré aux CSD (Cemented Soil Dams).

Enfin, la quantification de la résistance à un écoulement de surverse du sol traité à la chaux fait l'objet du programme de recherche « Digue ELITE », qui a abouti à la réalisation d'un ouvrage démonstrateur le long du Vidourle, à Aimargues (Gard). Cet ouvrage a servi, en avril 2016, à la première mise en œuvre du nouvel essai, dit essai de surverse, permettant cette quantification.

La présente communication rappelle les performances du sol traité à la chaux et relate la mise en œuvre de l'ouvrage démonstrateur du Vidourle et la réalisation de l'essai de surverse. Il envisage enfin les impacts du traitement à la chaux sur la conception d'ouvrages hydrauliques, et en particulier de tronçons de digues résistants à la surverse.

II PERFORMANCES DES SOLS TRAITES

Le mélange d'un sol contenant une fraction argileuse avec de la chaux donne lieu à des réactions à court et à long terme. A court terme, on observe une réduction de la teneur en eau (en particulier en cas d'utilisation de chaux vive), la floculation des argiles, la modification des caractéristiques géotechniques (limites d'Atterberg, et courbe Proctor), ainsi qu'une augmentation de l'indice de portance immédiat après compactage. A long terme, la combinaison des argiles avec la chaux conduit à une amélioration des caractéristiques mécaniques (cohésion, résistance à la compression) et hydrauliques (contrainte critique, indice d'érosion).

Afin d'optimiser la conception d'ouvrages ayant recours à ce type de matériau, une analyse des performances demandées au mélange sol-chaux est réalisée. Cette étape permet de vérifier son adéquation par rapport au composant de l'ouvrage hydraulique dans lequel il sera mis en œuvre. Cette analyse est synthétisée au Tableau 1 et peut être lue comme suit : pour un projet donné, le concepteur peut avoir recours au traitement de sols à la chaux pour remplir une ou plusieurs fonctions de l'ouvrage. Les exigences de performance sont décrites aussi bien par le(s) paramètre(s) à quantifier que par le procédé de traitement recommandé. Par exemple, si le sol à l'état naturel est trop humide, la fonction maniabilité est demandée, et les caractéristiques à étudier pour déterminer le dosage en chaux sont la portance et la densité après compactage.

Si la maniabilité et la résistance à l'érosion interne sont exigées, les caractéristiques à étudier sont la portance, la densité, l'homogénéité et la résistance à l'érosion interne.

Fonction recherchée	Maniabilité	Stabilité	Etanchéité	Résistance à l'érosion interne	Protection de surface	Evacuation
Rôle du composant en matériau sol-chaux	Facilité de mise en œuvre des sols humides	Stabilité sous poids propre et sous sollicitations sismiques	Etanchéité	Résistance à l'érosion interne	Résistance à l'érosion externe	Résistance aux écoulements à forte vitesse
Paramètres étudiés	<ul style="list-style-type: none"> Portance Compacité du matériau compacté 	<ul style="list-style-type: none"> Résistance en cisaillement (cohésion) Résistance à la traction et/ou à la compression 	<ul style="list-style-type: none"> Homogénéité Perméabilité 	<ul style="list-style-type: none"> Homogénéité Résistance à l'érosion de conduit 	<ul style="list-style-type: none"> Homogénéité Résistance à l'érosion de surface dans le cas d'un écoulement de surverse 	<ul style="list-style-type: none"> Homogénéité Résistance à l'érosion de surface pour un évacuateur

Tableau 1: Fonctions et exigences relatives au composant sol chaux

II.1 Comportement mécanique

La cinétique des réactions à long terme et les performances du sol traité à la chaux dépend de la réactivité, de l'importance de la fraction argileuse, du dosage en chaux et des conditions de mise en œuvre. Des exemples de performances mécaniques sont donnés en Tableau 2 et Tableau 3.

Sol	IP	Chaux vive	Rc 7 jours (MPa)	Rc 28 j (MPa)	Rc 90 j (MPa)	Rc 365 j (MPa)
Limon	7	4 %	0,67	0,95	1,86	4,50
Argile limoneuse	25	5 %	0,60	0,95	3,79	5,19

Tableau 2. Résistance à la compression simple (en MPa) en fonction du temps pour deux types de de sols traités à la chaux

	Non traité	Traité à 3% de chaux vive			
Temps (j)	0	7	90	300	680
φ' (deg.)	37	37	36	37	37
c' (kPa)	5	19	38	103	138

Tableau 3. Cohésion et angle de frottement en fonction du temps pour un sol limoneux (IP = 16), non traité et traité à 3% de chaux.

II.2 Résistance à l'érosion interne

Parmi les 4 types d'érosion interne actuellement considérés, c'est l'érosion de conduit (ou érosion sous écoulement localisé) qui apparaît le plus pertinent pour évaluer la résistance à l'érosion interne du sol-chaux. L'appareillage de laboratoire correspondant est le Hole Erosion Test (HET), développé en Australie dans les années 2000, et qui est disponible maintenant dans plusieurs pays, dont la France. La Figure 1 montre un résultat type, en terme de courbes d'érosion, pour le sol non traité et le sol-chaux mis en œuvre sur le démonstrateur du projet DigueElite (teneur en chaux 2% compacté à $\rho_d=1,62 \text{ t/m}^3$, correspondant à 95% de $\rho_{d,OPN}$, et à $w=20\%$, du côté humide de la courbe Proctor), pour plusieurs temps de cure. La contrainte critique du sol non traité (ou contrainte seuil d'érosion) est $\tau_c=95 \text{ Pa}$; c'est une valeur qui conduit, avec l'approximation $D_{max}(\text{mm})\approx\tau_c \text{ (Pa)}$, à $D_{max}\approx 10 \text{ cm}$ où D_{max} est le diamètre maximum du conduit au-delà duquel il y a érosion [Bonelli, 2013]. La vitesse d'érosion, obtenue en multipliant le taux d'érosion par ρ_d , est peu élevée : elle est de l'ordre de 20 cm/h.

La contrainte critique du sol-chaux est égale à 880 Pa à 1 jour de temps de cure et atteint 3000 Pa à 60 jours, valeur qui n'augmente pratiquement plus au-delà. Elle est 30 fois plus grande que la contrainte critique du même sol non traité. L'analyse montre que pour les conduits observés en pratique, dont le diamètre initial est de l'ordre du décimètre (terriers, racines, ...), il n'y aura pas érosion du sol-chaux.

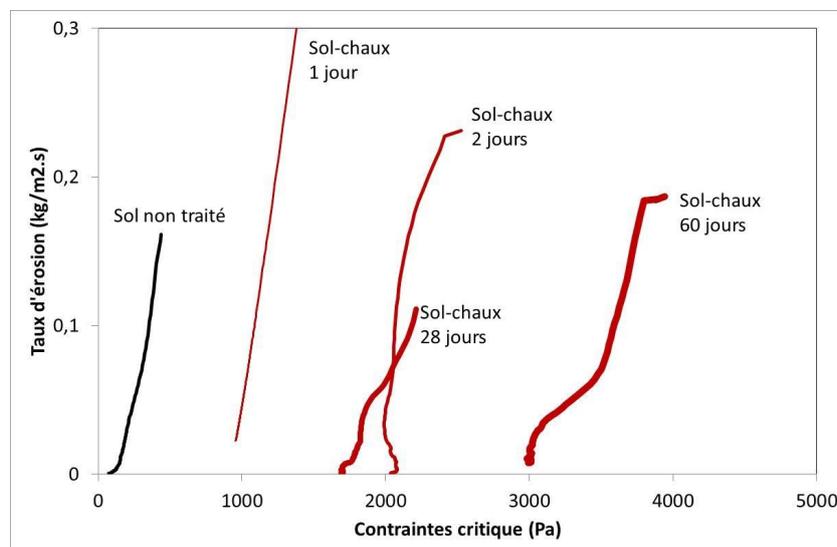


Figure 1: Courbes d'érosion des essais d'érosion interne HET (Hole Erosion Test) sur sol non traité et sur sol-chaux

III OUVRAGE DEMONSTRATEUR

III.1 Objectifs

Le programme de recherche DigueELITE intègre la réalisation d'un ouvrage démonstrateur, à savoir un tronçon de digue en sol traité à la chaux. L'objectif premier de l'ouvrage démonstrateur est de déployer l'essai de surverse, à savoir l'essai 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 au § IV et dans une autre communication [Mercier *et al*, 2017].

L'ouvrage expérimental permet également de valider les procédés 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.

L'ouvrage expérimental permet enfin d'enrichir la connaissance sur les caractéristiques des matériaux traités à la chaux et leur évolution à l'aide d'essais géotechniques, dont essais de perméabilité, essais d'érosion interne. Un suivi dans le temps de l'ouvrage est également réalisé.

La digue expérimentale est intégrée dans un programme de confortement et de recul localisé des digues le long du Vidourle, sous maîtrise d'ouvrage EPTB Vidourle.

III.2 Conception

La digue expérimentale a été conçue pour répondre aux objectifs suivants :

- La digue doit permettre la réalisation des essais et l'implantation du dispositif de suivi
- La digue doit être intégrée dans son environnement, et notamment dans le système d'endiguement opérationnel
- En tant qu'ouvrage expérimental, la digue ne peut créer aucun risque en cas de rupture ou de comportement non anticipé, à court ou à long terme.

La digue présente une coupe type telle qu'illustrée à la Figure 2. La coupe est donnée en zone II (zone en sol traité à la chaux). Il faut noter que la digue est implantée dans la zone inondable du Vidourle (entre le cours d'eau et la digue de protection, dans un méandre délaissé). La digue expérimentale n'a donc pas de fonction de protection ; en cas de crue, le niveau d'eau monte ainsi des deux côtés de la digue.

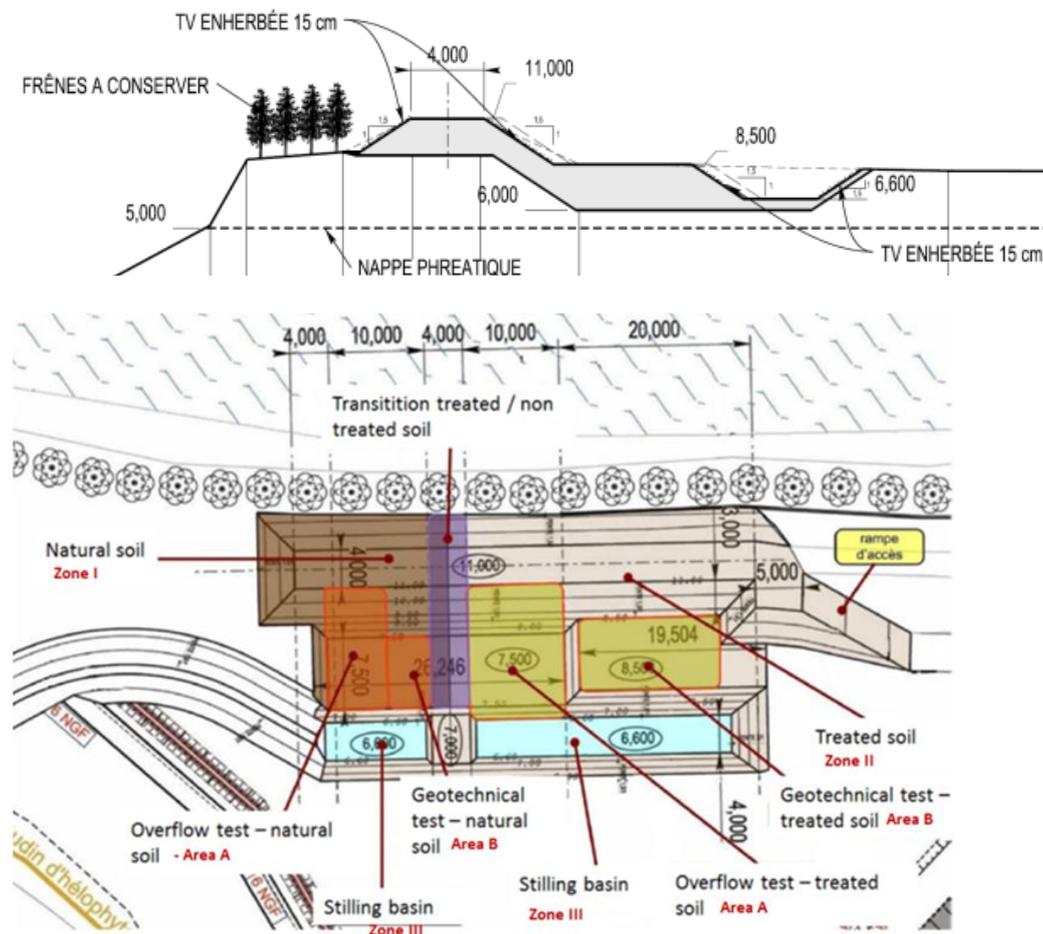


Figure 2: Coupe de la digue expérimentale (haut) et implantation (bas) – plan ISL

Aucun dispositif de filtration / drainage n'est mis en œuvre, de façon similaire à la digue de protection opérationnelle. Contrairement à celle-ci, aucun géotextile anti-fouisseur n'est mis en œuvre,

afin d'évaluer la résistance du sol traité aux tentatives de creusement de terriers, les fousseurs étant très présents dans le périmètre.

L'ouvrage a été construit en juillet / août 2015. L'implantation est présentée à la Figure 2, avec les différentes zones d'essai :

- La Zone I est constituée de sol non traité, en tant que zone de référence
- La zone II est constituée de sol traité à la chaux
- Les secteurs (area) A sont dédiés aux essais de surverses
- Les secteurs (area) B sont dédiés aux autres essais géotechniques
- La Zone III constitue le bassin de dissipation pour l'essai de surverse

III.3 Construction

III.3.1 Matériaux et étude de traitement

Le projet prévoit la réutilisation de sol excavé dans le méandre délaissé. Il s'agit d'un sol limoneux peu plastique. Ses caractéristiques principales sont données au Tableau 4.

Un dosage en chaux de 2% est retenu, légèrement supérieur au point de fixation de la chaux déterminé par l'essai Eades et Grim (ASTM C977 – déterminé à 1,5 %). Une chaux vive calcique Proviacal® DD, conforme à la norme NF EN 459-1 et à haute teneur en CaO disponible, a été fournie par Lhoist

Le traitement à la chaux induit les modifications des caractéristiques Proctor suivantes :

- Sol non traité : masse volumique à l'OPN de 18,1 kN/m³ pour 17% de teneur en eau
- Sol traité à 2% : masse volumique à l'OPN de 17,3 kN/m³ pour 18,7% de teneur en eau

Environ 9% d'eau sont ajoutés au mélange sol-chaux afin d'atteindre les objectifs de mise en œuvre du côté humide de l'OPN, compte tenu des conditions climatiques (temps chaud et venteux) et de la faible teneur en eau initiale du matériau.

Fraction argileuse (<2 µm) (%)	Passant à 80 (%)	Valeur au bleu de Méthylène (g/100 g)	Indice de plasticité (%)	Limite de plasticité (%)	Limite de liquidité (%)	Teneur en eau du stock (%)
23	82	3.0	5	23	28	14 à 15

Tableau 4 : Caractéristiques principales du matériau constitutif de l'ouvrage démonstrateur

III.3.2 Mélange et compactage, mise en œuvre et équipements

Le matériel utilisé pour le mélange du sol traité à la chaux et l'ajout d'eau est une centrale mobile de traitement de capacité 150 T/h environ. La centrale permet de contrôler précisément et en continu le dosage en chaux.

Pour le compactage, un compacteur à pied dameur type VP5 (norme NF P 98-736) est utilisé. L'objectif de compactage est de 95 % de l'OPN en tout point.

Il est à noter que le même matériel est utilisé aussi bien pour le sol non traité que le sol traité à la chaux. Notamment, la centrale est utilisée pour la mise à la bonne teneur en eau et l'homogénéisation du mélange. Le sol non-traité ainsi mis en place correspond donc au meilleur sol possible, en termes de caractéristiques géotechniques.

III.3.3 Contrôles pendant la construction

Les contrôles pendant la construction ont été définis et assurés par EDF. Ils concernent

- Le dosage en chaux

- La teneur en eau du matériau, traité et non traité, après mise en œuvre
- L'épaisseur des couches de matériau traité et non traité
- Le taux de compactage du matériau traité et non traité (gammadensimètre)

Le même soin est apporté au contrôle de la mise en œuvre de chaque type de matériau (traité et non traité).

Les mesures (teneur en eau et chaux) montrent un haut niveau d'homogénéité, notamment au travers de l'écart-type, confirmant la pertinence de l'utilisation de la centrale de traitement (Tableau 5). Les objectifs de densité sont respectés. L'épaisseur moyenne des couches après compactage est de 30 cm.

Ces constats sont valables tant pour le sol traité que pour le sol non traité.

Sol Traité	Teneur en eau (%)	Dosage en chaux (%)	densité (% pd à l'OPN)
Objectif	Supérieur à l'OPN (19,6 à 21,5)	2,0	Supérieur ou égal à 95
Moyenne	19,8 (w-w _{OPN} = 1,1)	1,9 à 2,2	95,2
Ecart-type	1,3 (104 mesures)	-	2,2 (48 mesures, sur planche d'essai)

Sol Non Traité	Teneur en eau (%)	densité (% pd à l'OPN)
Objectif	16	Supérieur ou égal à 95%
Moyenne	15,8	> 95% (contrôle au pénétromètre dynamique)
Ecart-type	1,02 (39 mesures)	-

Tableau 5 : Contrôles lors de la mise en place du matériau

III.4 Suivi visuel

• Fouisseurs

Les animaux fouisseurs sont très présents sur le périmètre. Notamment, de nombreux terriers sont observés dans la zone en sol non traité (Zone I): 15 terriers ont été observés dans les 4 mois après la mise en œuvre, d'une profondeur variant de 10 à 70 cm. A l'inverse, aucun terrier n'est répertorié dans la zone en sol traité (Zone II). Quelques tentatives ont été constatées, avec des traces de griffes ou de creusement de la couche superficielle (Figure 3).



Figure 3 : Terriers dans le sol non traité (gauche) et tentatives infructueuses dans le sol traité (droite)

• Etat de surface

L'état de surface est décrit dans le cadre de l'analyse de la résistance à l'érosion externe (§ IV).

III.5 Comportement du remblai - capteurs

Les capteurs suivants sont intégrés à l'ouvrage en zone I (non traité) et zone II (traité) : teneur en eau, température et succion. Un piézomètre est également présent.

Les données de ces capteurs sont en cours de dépouillement. Leur analyse devra permettre de mieux comprendre les échanges entre le remblai et son environnement, l'évolution de ces échanges dans le temps, et la comparaison du comportement entre sol traité et sol non traité.

IV RESISTANCE A L'EROSION DE SURFACE

Pour quantifier la résistance du sol non traité ou du sol-chaux à l'érosion de surface, il est impossible d'utiliser des abaques comme celles qui existent pour les revêtements en engazonnement, enrochement ou dalles béton. Comme c'est la pratique en géotechnique, un essai sur le sol en question est nécessaire.

L'essai d'érosion interne HET ne permet pas de conclure sur la résistance à l'érosion de surface. Nous n'avons pas connaissance de corrélations entre ces deux types de résistance à l'érosion. L'érosion induite par les précipitations est une première indication de la résistance à l'érosion de surface. Celle-ci peut être testée in situ avec le JET TEST, qui permet de comparer les sols entre eux.

L'essai in situ de jet (Jet Erosion Test) est intéressant, car il est notamment représentatif de ce qui se passe en pied de digue, et donne un résultat quantitatif. Bien qu'il doit être possible de relier l'action hydraulique du JET à la vitesse en pied de talus, nous n'avons pas connaissance de son utilisation pour le dimensionnement. De plus, le JET Test n'est pas suffisamment représentatif de l'action de l'eau sur le talus lors d'une surverse. Cet essai a notamment été utilisé sur sol traité pour les digues d'une digue de la Nouvelle Orléans [Robbins & Wibowo, 2012].

Les essais en canaux hydrauliques permettent d'étudier les solutions de revêtement. Ils ont également été utilisés pour étudier l'érodabilité des sols traités [Thornton, 2012]. La procédure est de compacter manuellement une couche de sol dans un bac métallique sur une épaisseur décimétrique puis de positionner ce bac dans le canal. Nous pensons que cela n'est pas adapté. La mise en œuvre du matériau et son compactage ne sont pas représentatifs de la méthode de réalisation d'une digue en remblai. De plus, il est possible que l'interface entre le bac et le sol soit le lieu de sous-pressions, situation non représentative de la réalité. Les résultats ainsi obtenus sont par conséquent discutables et ne permettent pas de qualifier la résistance à l'érosion de surface des sols traités. Apporter le sol de digue dans un canal hydraulique de laboratoire ne permet pas d'avoir une représentation correcte du matériau en place, en termes de compactage par couches, et de granulométrie. Il est préférable de réaliser des essais à échelle 1. Ceci a notamment été fait sur le démonstrateur du projet DredgeDike [Cantré *et al*, 2017].

IV.1 Erosion de surface - précipitations

Directement après construction, les remblais sont couramment sujets à de l'érosion due aux précipitations et ruissellement associé, et doivent être repris avant mise en œuvre des dispositifs de protection (de la terre végétale enherbée aux enrochements ou matelas pierreux). C'est le cas de la zone I en sol non traité (Figure 4), qui montre d'importantes griffes d'érosion évolutive : 18 mois après la construction, la profondeur des griffes d'érosion peut dépasser 50 à 100 cm.

A l'inverse, la zone II, en sol traité à la chaux, ne montre pas de telles traces d'érosion. Le remblai paraît insensible aux précipitations.



Figure 4 : vue du démonstrateur avant l'essai de surverse, 18 mois après la construction

Photo de gauche : sol non traité (Zone I) à gauche, avec griffes d'érosion; sol traité (Zone II) à droite, sans trace d'érosion

Photo de droite : contraste entre érosion due aux précipitations sur sol non traité (partie supérieure) et sol traité (partie inférieure)

Le contraste de résistance à l'érosion est également visible sur les parois du bassin de dissipation (Figure 4, droite). Les traces d'érosion disparaissent lorsque la partie en sol traité est atteinte.

IV.2 Essais de JET

Des essais d'érosion JET (Jet Erosion Test) ont été réalisés par GeophyConsult. Les essais ont été réalisés environ un an après la construction. Les vitesses d'impact en début d'essai sont de 2 à 3 m/s. Il en ressort que les essais réalisés sur les zones en sols traités à la chaux (deux essais), dans de bonnes conditions expérimentales, n'ont généré aucune érosion avec une charge hydraulique de l'ordre de la celle susceptible d'être appliquée sur le sol en cas de crue.

A l'inverse, les deux essais réalisés avec une charge hydraulique analogue dans de bonnes conditions expérimentales dans la zone en sol non traité ont provoqué de l'érosion et mis en évidence la présence de sols des catégories « érodable » à « très érodable » selon la classification de Hanson. La contrainte critique du JET, de l'ordre de 10 à 20 Pa, est environ 5 à 10 fois plus petite que la contrainte critique du HET, qui est de l'ordre de 100 Pa. Cet ordre de grandeur du ratio est usuellement constaté entre les τ_c de l'écoulement tangentiel (HET) et l'écoulement avec point d'arrêt (JET) [Bonelli, 2013].

IV.3 Essais de surverse

Irstea a développé un simulateur de surverse in situ, à échelle 1 [Mercier *et al*, 2017]. Il a été déployé pour la première fois en avril 2016 sur la digue expérimentale DigueElite, soit environ 9 mois après sa construction. La procédure suivie s'appuie sur les recommandations de la norme 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, et la plate-forme aval. Une campagne d'essai consiste à réaliser une série d'écoulements de 30 min, 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 [Mercier *et al*, 2017] pour plus de détails). Pour un débit de 570 l/s/mL, la lame d'eau en crête est d'environ 30 cm, et la vitesse en pied de talus est proche de 5 m/s. La profondeur maximum d'érosion, localisée en pied de talus dans la fosse d'érosion, atteint 14 cm pour le sol-chaux et 26 cm pour le sol non traité. Le volume de sol érodé est quantifié par Arcor Technologies avec un scanner 3D (LIDAR) terrestre et un logiciel d'interprétation. La Figure 5 montre que le volume érodé du sol naturel est environ trois fois plus important que le volume érodé du sol-chaux.

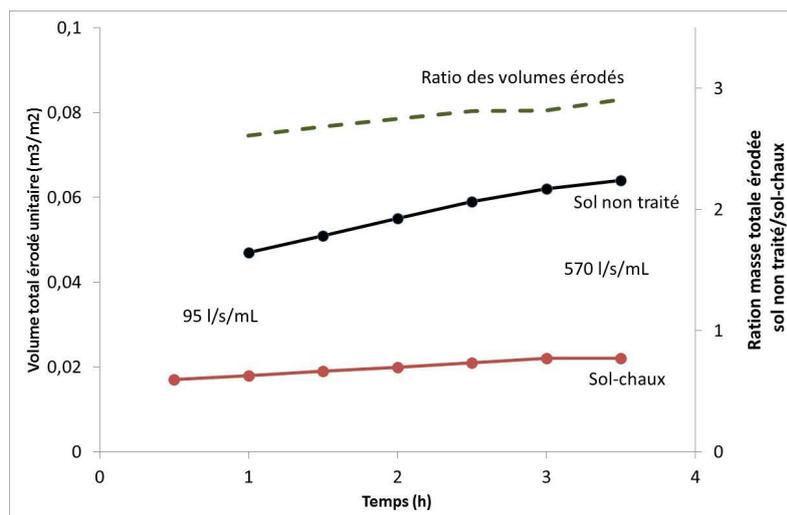


Figure 5 : volumes de sol érodés durant les essais de surverse

Une analyse approfondie des mesures de vitesse et de hauteur d'eau, avec pour objectif d'estimer les seuils d'érosion, reste à faire. Deux difficultés majeures rendent cette interprétation délicate : i) l'écoulement n'est pas établi du fait de la faible longueur de la pente, ii) la résistance du sol à l'érosion n'est pas homogène du fait de la construction par couches successives, avec comme conséquence un profil d'érosion en « marches d'escalier ».

V IMPACT SUR LA CONCEPTION ET PERSPECTIVES

V.1 Généralités

La chaux est couramment utilisée pour favoriser la maniabilité des sols. Cette propriété est valable pour les ouvrages hydrauliques, mais avec peu ou pas d'impact sur la conception (implantation, coupes, ouvrages,...). Cependant, la conception peut tirer profit du traitement à la chaux lorsque les performances suivantes sont intégrées à la réflexion de conception : stabilité, résistance à l'érosion interne et externe, faible perméabilité.

Différentes typologies de digues couramment rencontrées sont discutées ci-après, en relation avec le Tableau 1 des fonctions du composant sol chaux.

V.2 Tronçons « courants »

Pour des tronçons de digue courants, l'amélioration de la stabilité mécanique (Tableau 2 et Tableau 3) peut mener à un raidissement des pentes. Le raidissement des pentes peut apporter la réponse à des problématiques de quantité limitée de matériaux ou de faible emprise disponible.

De plus, la résistance à l'érosion interne conférée au matériau par le traitement à la chaux permet de simplifier radicalement le système de filtration et drainage, qui peut ne plus être nécessaire dans le corps de l'ouvrage (sous réserve de résultats probants lors d'essais d'érosion interne). Il faut cependant rappeler que le traitement de la fondation et son interface avec l'ouvrage reste indispensable pour limiter le risque d'érosion interne sous le corps du remblai. La simplification, voire l'absence de dispositif de filtration et drainage peut être la source d'économie tant en termes d'approvisionnement de matériaux (matériaux granulaires non pollués) que de coût de mise en œuvre (possibilité d'élever un remblai homogène, non zoné).

V.3 Tronçons résistants à la surverse

Au-delà des optimisations de conception possibles en termes de stabilité et résistance à l'érosion interne, la résistance à l'érosion externe, et en particulier à la surverse, du matériau sol-chaux permet d'envisager des conceptions de digue économiques et innovantes.

Le projet Digue ELITE a intégré plusieurs aspects de l'hydraulique et de la résistance du sol à l'érosion interne et à l'érosion de surface, et en particulier l'essai de surverse. Les résultats ont permis de confirmer la tenue à l'érosion du sol traité à la chaux. Le recours à un remblai résistant à l'érosion permet de repenser radicalement la conception des ouvrages en limitant ou supprimant la revanche, voire en considérant une revanche négative. Dans ce dernier cas, la crête se situe sous le niveau de Plus Hautes Eaux. Les gains en termes de volume de matériau à mettre en œuvre sont immédiats.

Dépendamment du fonctionnement hydraulique du site, et des hauteurs d'eau / débits spécifiques attendus, cette approche permet d'organiser les écoulements par surverse au-dessus de la crête de l'ouvrage, pour des crues d'occurrence donnée, possiblement sur de grandes longueurs. En effet, le surcoût réduit lié au traitement à la chaux autorise la réalisation de tronçons résistants à la surverse de linéaire important, contrairement aux tronçons déversoirs ayant recours à des techniques de génie civil (béton, enrochements – éventuellement bétonnés, matelas pierreux,...).

A l'inverse, à cote de crête identique, la résistance au déversement permet d'augmenter drastiquement le niveau de sûreté de l'ouvrage, et d'infirmier l'hypothèse généralement prise de non résistance d'un remblai (digue, petit barrage en terre) à l'érosion externe.

Prenant en compte l'expérience de la digue du Vidourle, une conception autorisant le déversement de débits spécifiques de l'ordre de quelques centaines de litres par mètre linéaire par seconde est envisageable.

A ce jour, le retour d'expérience est cependant encore limité et la quantité de données disponibles est faible. La réalisation de tronçons de digue résistants à la surverse doit donc encore être envisagée avec prudence et tenir compte des incertitudes. Une approche novatrice pour tenir compte de ces limites actuelles est d'intégrer la notion d'érosion autorisée du remblai : les premiers essais sur la digue du Vidourle montrent qu'une petite érosion peut se produire, essentiellement en début de sollicitation (érosion d'une épaisseur restreinte altérée en surface), mais que la vitesse d'érosion ralentit drastiquement ensuite, voire que l'érosion est arrêtée. Prévoir une surépaisseur de remblai,

déterminée en fonction de l'intensité et de l'occurrence des événements causant la surverse et pouvant être sujette à érosion, est une orientation de conception économique et sécuritaire.

Une conception mixte, entre zones dédiées à l'évacuation des crues en techniques de « génie civil » et tronçons résistants à la surverse permettant d'augmenter le niveau de sûreté et/ou diminuer la cote de crête laisse également entrevoir une optimisation du projet au niveau du coût et/ou de la sûreté de l'ouvrage.

Notons enfin que la résistance du sol traité à la chaux est significativement meilleure que celle de la terre végétale enherbée qui le protège. De ce fait, la conception doit intégrer le besoin en reprise ponctuelle de la terre végétale suite à une crue ayant sollicité fortement l'ouvrage.

Il est bien entendu que chaque projet doit être étudié soigneusement au regard des données disponibles et des matériaux particuliers du site. Notamment, les sites à fort enjeux ou sollicitations importantes ne pourront probablement faire l'objet de traitement à la chaux dans une optique de résistance à la surverse que lorsque des données complémentaires et un retour d'expérience suffisant auront été accumulés.

Concernant les barrages en remblai, rappelons enfin [Deroo, 2011] que leur capacité à supporter des déversements modérés est décisive. Une lame d'eau uniforme de 20 à 50 cm sur la crête permet de faire passer un débit de l'ordre de 30 à 70 m³/s sur une longueur de crête de 200 m (0,15 à 0,35 m³/s/ml). C'est, excepté dans l'emprise des épisodes méditerranéens, l'équivalent de la crue de projet pour un bassin d'environ 5 à 10 km² en France métropolitaine. Cette capacité intéressante est perdue s'il existe des points faibles, amorces de rupture, par exemple : point bas dans la crête, débordement dans l'évacuateur (s'il est sur le remblai ou attendant), amorce d'érosion régressive en pied, parapet en crête dont la rupture d'un élément génère un écoulement localisé, matériaux peu résistants à l'érosion. A l'inverse, cette résistance peut être intégrée dans la conception dès lors qu'elle est démontrée. A ce titre, l'essai de surverse sur l'ouvrage expérimental du Vidourle apporte des éléments de grande valeur, dans la gamme des débits spécifiques considérés, et même au-delà.

V.4 Evacuateurs

Les ordres de grandeur des débits spécifiques / lames d'eau en crête / vitesses en pied sont sensiblement supérieurs pour les évacuateurs de crue. On peut notamment attendre des vitesses dépassant les 5 à 7 m/s. A ce jour, les essais ne permettent pas de valider la résistance du sol traité à la chaux à de telles sollicitations.

Néanmoins, la résistance à l'érosion externe du sol traité à la chaux peut impacter significativement la conception, selon la configuration propre à chaque projet :

- Reconfiguration du dispositif d'évacuation des crues, pour supprimer les déversoirs et les remplacer par de longs linéaires de tronçons résistants à la surverse. Pour un même débit total à évacuer, multiplier par 2, 3 ou plus la longueur du déversoir permet de diviser d'autant le débit spécifique. Une adaptation du profil en travers (adoucissement des pentes) permet également de limiter, dans une certaine mesure, les vitesses en pied d'ouvrage.
- Concevoir un dispositif mixte, tel qu'évoqué ci-dessus (déversoirs et tronçons résistants à la surverse), permettant de diminuer significativement la longueur du déversoir.
- A terme, des conceptions innovantes de déversoir méritent d'être étudiées :
 - Remblai fusible, dont un volume important peut être érodé en cas de crue. Le taux d'érosion est primordial dans le dimensionnement de ce remblai ; l'essai de surverse peut apporter des éléments de justification majeurs, pour autant que les vitesses testées soient compatibles avec les vitesses prévues sur l'ouvrage
 - Evacuateur de crues en sol traité à la chaux avec marches d'escalier, renforcées à l'aide de béton,...

Ces conceptions doivent faire l'objet d'études spécifiques, et d'essais à grande échelle pour valider leur faisabilité.

VI CONCLUSIONS

Le projet Digue ELITE a intégré plusieurs aspects de l'hydraulique et de la résistance du sol à l'érosion interne et à l'érosion de surface, et en particulier l'essai de surverse. Tous les résultats ont permis de confirmer et de qualifier la tenue à l'érosion du sol traité à la chaux.

Ces résultats ouvrent la voie à des conceptions tirant parti de cette résistance, au-delà des caractéristiques mécaniques du sol traité à la chaux déjà démontrées par ailleurs, en laboratoire et sur site. Compte tenu de coût compétitif de mise en œuvre, comparativement aux techniques usuelles de protection d'un ouvrage contre l'érosion externe, il est désormais envisageable de concevoir des tronçons de digue ou des petits barrages résistants à la surverse. Cette conception permet de prévoir des économies substantielles en réévaluant les besoins en termes de revanche, et/ou d'augmenter le niveau de sûreté de l'ouvrage.

Des applications concrètes dans des petits barrages ou digues à enjeux de sécurité modérés sont d'ores et déjà possibles, compte tenu de l'expérience acquise dans le cadre du projet Digue ELITE et tenant compte de la possibilité de réaliser des essais de surverse, permettant de quantifier la résistance à l'érosion du sol traité à la chaux.

A terme, avec le développement du retour d'expérience et la poursuite des efforts de recherche, des applications plus ambitieuses sont envisageables, dans des dispositifs conjuguant déversoirs en génie civil et en sol traité à la chaux, pour faire face à des sollicitations hydrauliques plus importantes.

VII REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement l'ensemble du Consortium Digue ELITE ainsi que l'EPTB Vidourle pour leur appui et leurs contributions.

VIII REFERENCES

- S. Bonelli (2013). — *Erosion in geomechanics applied to dams and levees*, Wiley
- S. Cantré, J. Olschewski, F. Saathoff (2017). — Full-Scale Flume Experiments to Analyze the Surface Erosion Resistance of Dike Embankments Made of Dredged Materials, J. Waterway Port. Coast. Ocean. Eng. ASCE, DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000375.
- CIRIA, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE), United States Army Corps of Engineers (USACE) (2013). — *International Levee Handbook (ILH)*, 1350 p.
- G. Degoutte (coord., 2012). — *Les déversoirs sur digues fluviales*. Editions Quæ, 198 p.
- L. Deroo (2009). — Crues, évacuateurs et probabilités de défaillance, Congrès SHF – Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues, Paris.
- F. Mercier, G. Charrier, S. Bonelli, S. Nicaise, N. Chaouch, Y. Grémeaux, F. Byron, L.-H. Luu (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.
- Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE) (2015). — *Référentiel technique digues maritimes et fluviales*, 190 p.
- N. Nerinx, S. Bonelli, D. Puiatti, G. Herrier, J.-J. Fry, R. Tourment, S. Nicaise (2016). — Impact of lime treated soils performance on design of earthfill dikes, 3rd European Conference on Flood Risk Management FLOODrisk 2016, Lyon.
- B. A. Robbins, J. L. Wibowo (2012). — Field Jet Erosion Tests of Treated Clay Levee Embankments, ICSE6 Paris - August 27-31.
- C. Thornton, S. Hugues, B. Scholl (2012). — Full-Scale Testing of Levee Resiliency During Wave Overtopping, ICSE6 Paris - August 27-31.