



HAL
open science

Essais de surverse in situ et quantification de la résistance à l'érosion

Stéphane Bonelli, Sylvie Nicaise, Charrier Guillaume, N. Chaouch, F. Byron,
Y. Gremeaux

► **To cite this version:**

Stéphane Bonelli, Sylvie Nicaise, Charrier Guillaume, N. Chaouch, F. Byron, et al.. Essais de surverse in situ et quantification de la résistance à l'érosion. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les inondations - 3e colloque - Dignes 2019, Mar 2019, Aix-en-Provence, France. pp.8, 10.5281/zenodo.2530132 . hal-02609791

HAL Id: hal-02609791

<https://hal.inrae.fr/hal-02609791>

Submitted on 16 May 2020

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.

Essais de surverse in situ et quantification de la résistance à l'érosion

In situ overflow tests and quantification of erosion resistance

S. Bonelli, S. Nicaise, G. Charrier, N. Chaouch, F. Byron, Y. Gremeaux

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

Résumé

La rupture d'une digue fluviale suite à une crue dépassant la crête de l'ouvrage constitue un scénario de l'étude de dangers. Il est capital de quantifier la résistance à la surverse. Lorsque le tronçon est équipé d'une protection de surface, la pratique est d'utiliser des abaques (par exemple celles du CIRIA). 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. En conséquence, on considère actuellement en France que « les digues en terre ne supportent pas la surverse ». C'est la raison pour laquelle Irstea a développé un simulateur de surverse in situ, à échelle un. Le dispositif a été déployé dans le cadre du projet de recherche DigueELITE sur une digue expérimentale (hauteur de 3,5 m) construite en 2015, dans 2 canaux de 61 cm de large et 15 m de long, couvrant le talus aval (pente 1,5H/1V) et la plate-forme aval : l'un sur sol-chaux, l'autre sur sol non traité. Deux campagnes d'essais ont été réalisées (2016 et 2017), avec des débits allant jusqu'à 0,570 m²/s, des vitesses de 6 m/s en pied de talus, et une lame d'eau en crête correspondant à 50 cm en situation de surverse réelle. La première phase d'érosion est celle de la couche superficielle. La deuxième phase est celle du sol constitutif. L'érosion façonne le talus en marches d'escalier (head-cut), en faisant apparaître les couches de compactage. L'écoulement de surverse est donc assimilable à un écoulement aéré, fortement turbulent (skimming flow) sur pente avec marches. Les résultats obtenus permettent de quantifier la meilleure résistance du sol-chaux. Par rapport au sol non traité, le développement de la fosse d'érosion en pied de talus aval y est 5 à 10 fois moins important. Il a été possible d'interpréter les mesures suivant la norme ASTM-D6460 et de positionner les résultats sur l'abaque du CIRIA. Ce travail démontre qu'il est maintenant possible de quantifier la résistance à l'érosion de surverse du sol constitutif du remblai d'une digue.

Mots-Clés

Digue, surverse, érosion, essai in situ.

Abstract

The failure of a river dike following a flood exceeding the crest level of the structure is a scenario of the safety study. It is important to quantify the resistance to overflow. When the section is equipped with a surface protection, the practice is to use the abacuses (e.g. those of CIRIA). On the other hand, it is currently impossible to describe, with respect to its resistance to overflow, a soil constituting a dike section. As a result, it is currently considered in France that "earth dikes do not support overflow". This is why Irstea has developed an in-situ, full-scale overflow simulator. The device was deployed as part of the DigueELITE research project on an experimental dike (height of 3.5 m) built in 2015, in two channels 61 cm wide and 15 m long, covering the downstream slope (slope 1.5H/1V) and the downstream platform: one on lime treated soil, the other on untreated soil. Two test campaigns were carried out (2016 and 2017), with flow rates of up to 0.570 m²/s, velocities of 6 m/s at the slope toe, and a corresponding water height at 50 cm in situation of real overflow. The first phase of erosion is that of the superficial layer. The second phase is that of the constitutive soil. Erosion shapes the slope in steps (head-cut), showing the layers of compaction. The free-surface flow is therefore comparable to an aerated flow, strongly turbulent (skimming flow) on steep slope with steps. The results obtained make it possible to quantify the best resistance of the lime treated soil. Compared to untreated soil, the erosion pit at the toe of the downstream slope is 5 to 10 times smaller. It was possible to interpret the measurements according to ASTM-D6460 standard and to position the results on the CIRIA chart. This work shows that it is now possible to quantify the overflow erosion resistance of the soil constituting the embankment of a dike.

Key Words

Dike, levee, overflowing, erosion, field test.

Introduction

L'International Levee Handbook [7], et le Référentiel Technique Dignes Maritimes et Fluviales [12] présentent les principes liés aux systèmes de protection contre les inondations, ou systèmes d'endiguement, qui permettent d'éviter l'inondation du val protégé jusqu'à un niveau appelé "niveau de protection". Au-delà de ce niveau de protection, pour les digues fluviales, il y a surverse.

La rupture d'une digue fluviale suite à la surverse provoquée par une crue dépassant la crête de l'ouvrage constitue l'un des scénarios d'une étude de dangers. Pour les tronçons résistant 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 souvent qualitative et se fait souvent à dire d'expert pour une crue de référence, en comparant l'action hydraulique et la résistance du revêtement déterminée par ailleurs, le plus souvent via des résultats d'essais en canal hydraulique de laboratoire, disponibles dans les documents techniques. Pour les tronçons normaux, la rupture par surverse est susceptible de se produire pour un déversement faible par-dessus la crête. La probabilité d'occurrence de ce mécanisme de défaillance est actuellement évaluée à partir des seules études hydrologiques et hydrauliques. Elle n'intègre aucune étude géotechnique relative à la résistance du sol à l'érosion lors d'un écoulement de surverse. On suppose ainsi que s'il y a surverse, il y aura rupture par brèche. En conséquence, on considère actuellement en France que « les digues en terre ne supportent pas la surverse » [11].

Pour qualifier une solution de protection de surface, il faut disposer d'un équipement hydraulique spécifique. C'est par exemple le cas des grands canaux du laboratoire hydraulique de l'Université du Colorado à Fort-Collins [15], qui permettent de simuler un écoulement de surverse selon la norme ASTM D6460 [1] ou des franchissements de vagues. Un ensemble de canaux a été construit sur le démonstrateur DredgeDike [5,14] pour qualifier le sol de dragage sur le talus aval vis-à-vis de la surverse. 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 fluviale, car il n'existe pas d'appareillage de terrain pour la surverse.

Cette démarche a déjà été entreprise pour les digues maritimes. Aux Pays-Bas, un simulateur mobile est déployé depuis plusieurs années pour estimer la résistance le long du talus aval et surtout en pied de digue sous l'effet de franchissement de vagues [16]. Un franchissement de vague est représenté par des lâchers périodiques de volumes d'eau

et n'est pas comparable à un écoulement de surverse, qui est représenté par un écoulement à surface libre en régime permanent caractérisé par un débit, des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement. Le simulateur de franchissement de vagues [16] n'est pas adapté pour étudier la surverse.

Il est capital de quantifier la résistance du sol à l'érosion. Le Hole Erosion Test (HET) est déployé depuis plusieurs années au laboratoire pour l'érosion interne [2,3]. Toutefois, l'essai d'érosion interne HET ne permet pas de conclure sur la résistance à l'érosion externe. Nous n'avons pas connaissance de corrélations opérationnelles entre ces deux types de résistance à l'érosion [3]. L'essai de laboratoire EFA reproduit l'érosion de surface au laboratoire [4], mais il est à petite échelle et nécessite l'apport du sol au laboratoire. L'essai in situ de jet impactant (Jet Erosion Test) est représentatif de ce qui se passe en pied de digue, et éventuellement en pied de marche [8]. Bien qu'il doive être possible de relier l'action hydraulique du JET Test à la vitesse d'impact en pied de talus, nous n'avons pas connaissance de son utilisation pour le dimensionnement ou la vérification. De plus, le JET Test n'est pas représentatif de l'action de l'eau sur le talus lors d'une surverse.

Pour quantifier la résistance du sol à l'érosion externe, il est impossible d'utiliser des abaques comme celles qui existent pour les revêtements en engazonnement, enrochement ou dalles béton (comme les abaques du CIRIA [9]). Un essai sur le sol en question est nécessaire : c'est d'ailleurs une pratique traditionnelle en géotechnique. Malheureusement, un essai de laboratoire à petite échelle semble exclu compte tenu des connaissances actuelles. En effet, nous n'avons pas connaissance de lois de similitudes pour un phénomène couplant érosion d'un sol cohésif et écoulement aéré et fortement turbulent, à surface libre et sur forte pente. Même à échelle un, des essais de laboratoire similaires à ceux qui permettent de qualifier les solutions de protection de surface [15] ne nous semblent pas représentatifs. En effet, apporter le sol de digue dans un canal hydraulique de laboratoire ne permet pas d'avoir une représentation correcte du matériau en place, de sa granulométrie, et des hétérogénéités induites par le compactage par couches. C'est la raison pour laquelle Irstea a développé, pour les digues fluviales, un appareillage de terrain inspiré de la norme ASTM D6460 [1] pour simuler une surverse in situ, et quantifier la résistance à l'érosion de la crête, du talus aval et du pied de talus.

Le dispositif expérimental

Au cours du programme de recherche DigueELITE (www.digueelite.fr), une digue expérimentale a été construite près de Lunel (Hérault) au bord de la rivière Vidourle. Elle a une hauteur de 3,5 m et une pente de talus aval de 3H/2V. L'ouvrage comprend une section de 10 m en sol non traité (sol naturel) et une section de 30 m traitée à la chaux. Les talus sont non-végétalisés (Figure 1). Les techniques de construction et les caractéristiques géotechniques des sols en

place montrent que le sol non traité réalisé correspond « au meilleur sol possible » vis-à-vis des règles de l'art [10,13]. Le sol-chaux a une résistance mécanique (cohésion, résistance à la compression simple) et une résistance à l'érosion interne d'un à deux ordres de grandeur supérieures à celles de ce sol non traité [10,13]. Le dispositif expérimental, objet de la présente communication, vise à quantifier la résistance à l'érosion externe du sol-chaux par rapport à celle du sol non traité.

Ce dispositif expérimental est constitué de deux canaux de 15 m de long et 61 cm de large implantés sur le parement aval de la digue, l'un dans la zone traitée à la chaux, l'autre sur le sol naturel, dans le but de tester la résistance à l'érosion en crête, sur le talus aval et en pied de talus (Figure 1). Une cuve tampon est positionnée sur la crête, entre l'arrivée du système de pompage et l'entrée du canal. Le canal d'essai débouche sur un bassin qui accueille les pompes, ce qui permet de fonctionner en circuit fermé.



FIGURE 1 : LE DEMONSTRATEUR DIGUE ELITE, AVEC LES 2 CANAUX AVANT ESSAI

Le protocole d'essai reprend des éléments de la norme ASTM D6460 [1]. Une campagne d'essai consiste à réaliser une série de paliers d'écoulements de 30 mn, et à mesurer à chaque fois l'érosion apparue pendant ces 30 mn. Le débit entrant est mesuré avec un débitmètre. La vitesse de l'écoulement est mesurée avec un courantomètre électromagnétique. La hauteur d'eau et la position du sol sont mesurées à la règle graduée.

Le débit initial est de 95 l/s/mL (0,095 m²/s). Ce débit est graduellement augmenté pour atteindre 570 l/s/mL. Pour un débit de 570 l/s/mL, la lame d'eau en crête est d'environ 30 cm ; c'est une hauteur d'eau critique qui correspond à une surverse de 50 cm.

La vitesse maximum en pied de talus est de l'ordre de 6 m/s. La séquence de 8 essais (Figure 2) correspond à 4h30 d'écoulement avec une vitesse moyenne de montée de la lame d'eau de 15 cm/h. Les deux séquences de 8 essais ont été réalisées sur le sol non traité et sur le sol-chaux en 3,5 jours.

Le sol en place n'est pas végétalisé. Il n'a volontairement pas été décapé, pour ne pas le modifier artificiellement. Les parois des canaux sont simplement posées sur le sol, également pour ne pas modifier le sol en place. Ces choix sont exploratoires et sont à remettre en question à l'aune des résultats obtenus avec d'autres dispositions expérimentales.

En début d'essai, à petit débit, l'écoulement est entièrement dans le canal (Figure 3.a). En cours d'essai, à des débits plus importants et avec l'érosion du sol, il apparaît des écoulements sous les parois (Figure 3.b). Ceci n'est pas rédhibitoire, puisque nous mesurons les vitesses et hauteur d'eau le long de l'écoulement dans le canal. Les fuites sont de l'ordre de 10 à 30 % suivant les essais.

L'écoulement à surface libre sur cette forte pente (33°) est toujours super-critique, avec un nombre de Froude de l'ordre de 2 à 4, en moyenne. La pente est dans la plupart des cas trop courte pour que l'écoulement soit établi. Cet écoulement fortement turbulent est aéré, comme le montre la Figure 4.

Résultats

Vitesses d'écoulement

Les vitesses mesurées maximum se situent entre 4 m/s à 95 l/s/mL et 6 m/s à 570 l/s/mL. L'écoulement accélère le long du talus pour atteindre sa vitesse maximale en pied aval (Figure 5).

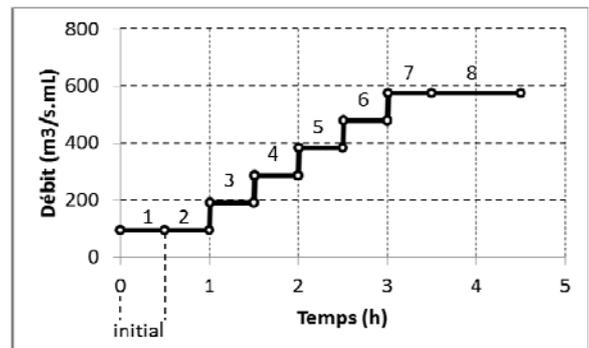


FIGURE 2: SEQUENCE EN DEBIT DES 8 ESSAIS, AVEC UN ESSAI INITIAL, SUIVI DE 6 ESSAIS AVEC AUGMENTATION GRADUELLE DU DEBIT, ET UN 8^{EME} ESSAI D'UNE DUREE D'1H



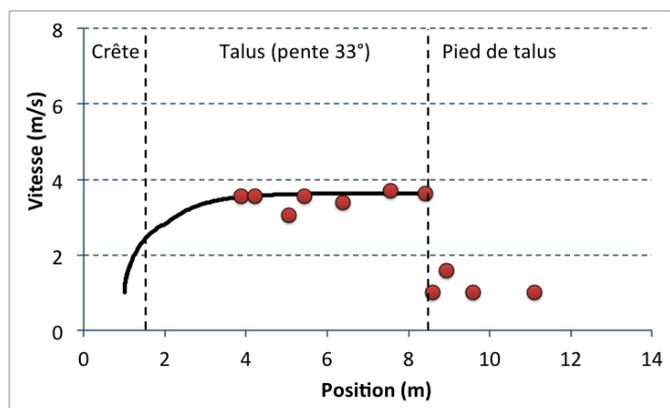
(A)

(B)

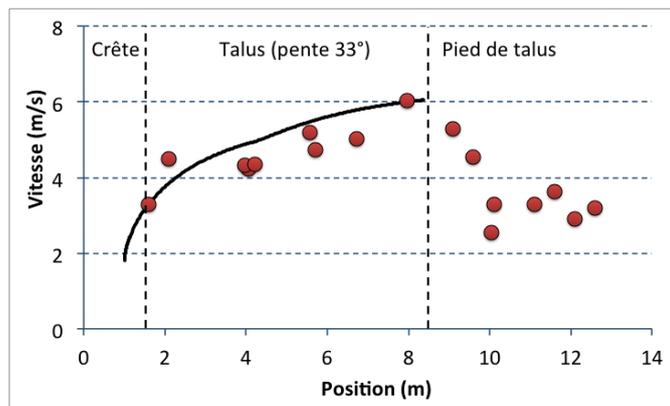
FIGURE 3: VUE EN COURS D'ESSAI POUR UN DEBIT DE 95 L/S/M^L (ESSAI 1-INITIAL) (A) ET UN DEBIT DE 570 L/S/M^L (B)



FIGURE 4: VUE DE L'ECOULEMENT EN TETE DE TALUS ET EN COURS D'ESSAI POUR UN DEBIT DE 95 L/S/M^L (A) ET UN DEBIT DE 570 L/S/M^L (B)



(a) Débit 95 l/s/mL



(b) Débit 570 l/s/mL

FIGURE 5: VITESSES D'ECOULEMENT (SYMBOLES : MESURES, TRAITS CONTINUS : MODELE DE CHANSON [8]).

Erosion du sol

L'érosion est quantifiée en mesurant la position du sol à la règle graduée. Ces mesures ne permettent pas une analyse fine des phénomènes en jeu, notamment lorsque l'érosion induit un état de surface fortement hétérogène. Elles donnent toutefois, en moyenne, un ordre de grandeur comparable aux mesures de grande précision obtenues par scanner 3D de type

LIDAR terrestre par Arcor Technologies [10,13].

On peut déduire de ces mesures le volume érodé par mètre carré, l'érosion unitaire (m^3/m^2), également appelé indice de Clopper [1], qui représente une épaisseur moyenne de sol érodé. Cette épaisseur moyenne intègre l'hétérogénéité du profil d'érosion, en marche d'escalier sur le talus, ou en fosse d'érosion en pied de talus. Le rapport constaté entre épaisseur moyenne et profondeur maximum est de l'ordre de 2 à 3.

L'érosion n'est pas uniforme, et la répartition spatiale de l'érosion est différente pour les deux sols testés. Afin de mieux analyser cela, l'érosion est analysée sur 4 zones : la crête, la partie haute du talus, la partie basse du talus et le pied de talus (Figure 6).

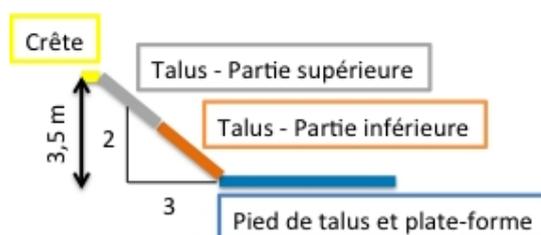


FIGURE 6: LES 4 ZONES D'ANALYSE DE L'EROSION

L'évolution avec le temps de l'érosion unitaire pour ces 4 zones est donnée Figure 7 où l'on compare les zones pour chaque sol. Globalement, l'érosion du sol-chaux est moins importante que celle du sol non traité. Il apparaît même que l'érosion du sol-chaux dans les 4 zones, inférieure à $0,05 m^3/m^2$ pour les 4h30 d'essai, est inférieure à la seule érosion initiale du sol non traité (essai 1, durée 30 mn). En outre, le 1^{er} essai provoque une érosion du sol-chaux inférieure de moitié environ à celle du sol non traité. Afin de mieux mettre en évidence la résistance du sol lui-même, objet du présent dispositif expérimental, les évolutions avec le temps de l'érosion unitaire sont tracées à partir de la fin de l'essai 1-initial, Figure 8 où l'on compare les sols pour chaque zone.

Les observations faites sur les Figures 7 et 8 sont les suivantes :

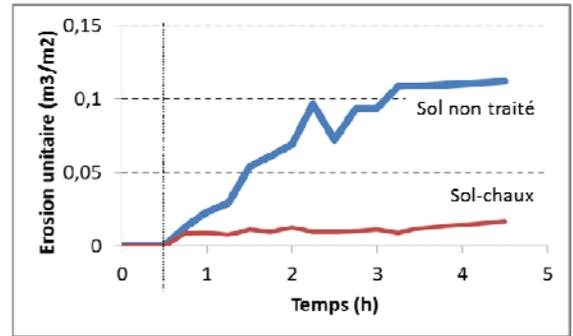
- Sol non traité
 - le 1^{er} essai provoque une érosion initiale relativement uniforme dans les 4 zones de l'ordre de $0,05 m^3/m^2$ soit 5 cm en moyenne ;
 - l'érosion est la plus importante en crête, elle atteint $0,17 m^3/m^2$; c'est également la plus évolutive après l'essai 1-initial, avec une cinétique moyenne de 3 cm/h ;
 - le long de talus, la cinétique d'érosion est en moyenne de 0,4 cm/h en partie haute et 0,8 cm/h en partie basse après l'essai 1-initial ;

○ l'érosion du pied de talus est du même ordre de grandeur qu'en partie basse du talus, mais elle est plus localisée et plus profonde.

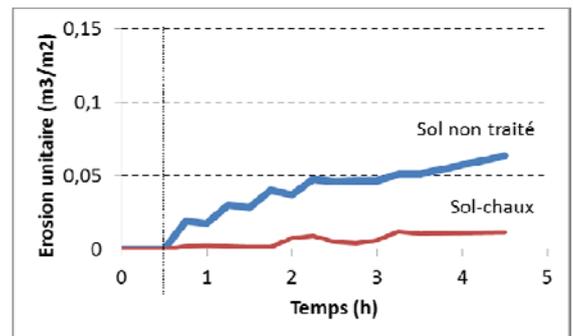
- Sol-chaux

- le 1^{er} essai provoque une érosion initiale de l'ordre de 0,02 à 0,04 m³/m², sauf sur le talus en partie basse, où cette érosion initiale est négligeable ;
- la zone où l'érosion est la plus faible est le bas de talus ;
- le long de talus, la cinétique d'érosion est en moyenne de 0,8 cm/h en partie haute et 0,3 cm/h en partie basse après l'essai 1-initial ;
- l'érosion en crête est similaire à l'érosion de haut de talus (0,8 cm/h) ;
- après l'essai 1-initial, la cinétique de l'érosion du pied de talus est similaire à l'érosion du bas de talus (0,3 cm/h) ;
- le cumul des différentes phases à débit croissant a causé moins d'érosion que le 1^{er} essai initial.

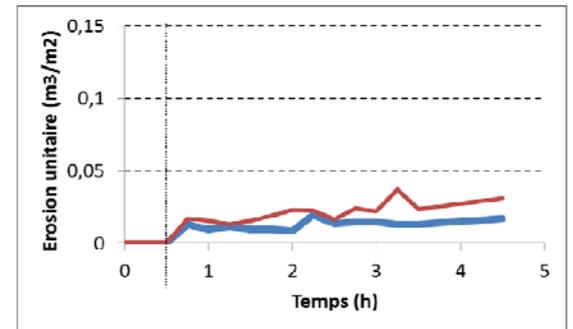
FIGURE 7: VOLUMES ERODES PAR M² EN FONCTION DU TEMPS, SUR LA CRETE, LE HAUT DE TALUS, LE BAS DE TALUS ET LE PIED DE TALUS POUR CHAQUE SOL.



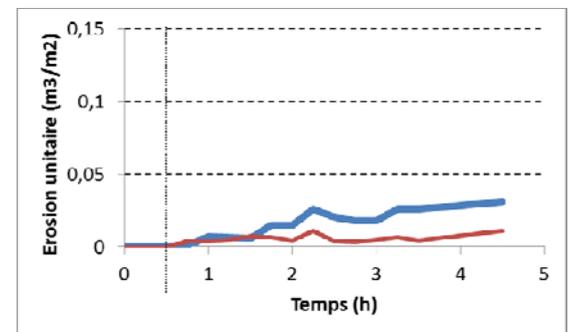
(a) Crête



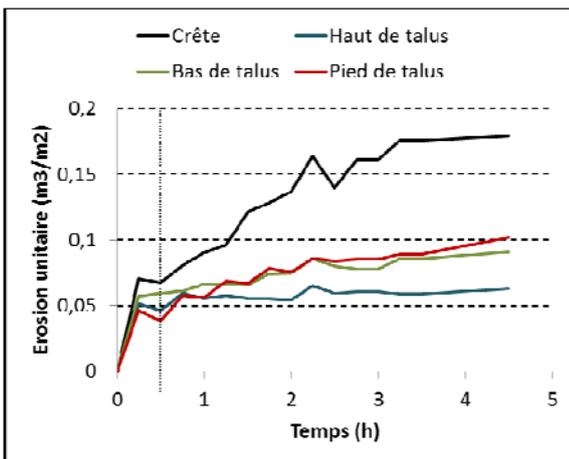
(b) Fosse en pied de talus



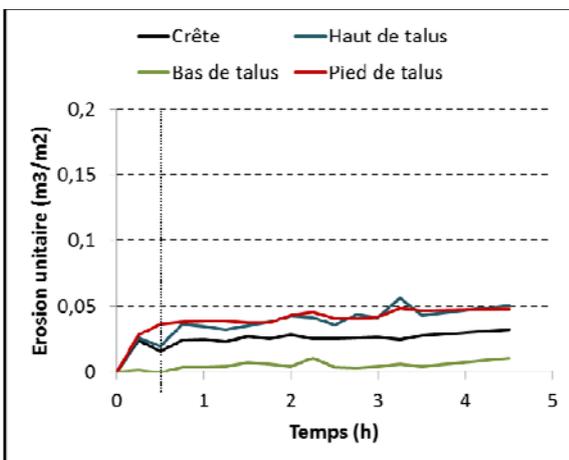
(c) Talus partie haute



(d) Sol-chaux



(a) Sol non traité



(b) Sol-chaux

FIGURE 8: VOLUMES ERODES PAR METRE CARRE EN FONCTION DU TEMPS A PARTIR DE LA FIN DE L'ESSAI 1-INITIAL.

COMPARAISON DE L'ÉROSION DU SOL NON TRAITÉ ET DU SOL-CHAUX POUR CHAQUE ZONE (CRÊTE, HAUT DE TALUS, BAS DE TALUS ET PIED DE TALUS).

Le 1^{er} essai initial de 30 mn de surverse à 95 l/s/mL provoque une érosion de quelques centimètres des deux sols. C'est l'érosion de la couche de surface, altérée par les échanges thermiques, hydriques et chimiques avec l'environnement extérieur pendant plusieurs mois, depuis la construction. Cette couche de surface a protégé le sol constitutif du remblai. Toutefois, on ne peut pas considérer qu'il s'agit d'une couche de protection, puisqu'elle n'a pas fait l'objet d'un dimensionnement et qu'elle ne fait pas l'objet d'un programme de maintenance.

Pour le sol non traité, l'érosion est croissante, du haut de talus au pied de talus, ce qui correspond aux observations classiques. Le fait que l'érosion de crête soit la plus importante est imputable à notre dispositif. Il ne reproduit en effet pas une lame d'eau étalée longitudinalement et qui s'accélère sur la crête à partir d'un régime sous-critique. Il s'agit d'un écoulement déjà super-critique, avec une vitesse initiale super-critique, et une agitation importante. Cette condition hydraulique est donc plus sévère qu'une surverse. Elle est toutefois représentative de la localisation de l'écoulement de crête au droit d'une singularité (tronc d'arbre ou trou par exemple). D'autre part, les courbes montrent qu'elle est discriminante. Nous considérons donc qu'elle est pertinente, et interprétable.

Les données permettent d'évaluer les ratios moyens de volume unitaire érodé, et les ratios moyens de cinétique d'érosion. Ces deux ratios sont du même ordre de grandeur :

- en crête, l'érosion du sol non traité est 6 à 7 fois plus importante que celle du sol-chaux ;
- en pied de talus, là où se développe la fosse d'érosion, l'érosion du sol non traité est 5 à 10 fois plus importante que celle du sol-chaux ;
- en partie basse du talus, l'érosion du sol non traité est 3 fois plus importante que celle du sol-chaux ;
- en partie haute du talus, l'érosion du sol non traité est du même ordre de grandeur que celle du sol-chaux.

Les mesures de vitesse et les mesures d'érosion ont été interprétées suivant la norme ASTM-D6460 [1] afin d'évaluer la vitesse limite. Il s'agit d'une vitesse limite « d'érosion acceptable » définie selon cette norme par un indice de Clopper maximum de 0,5 pouces, soit 1,3 cm d'érosion unitaire. En ce qui concerne le sol non traité, mis en place de telle sorte à ce qu'il corresponde au « au meilleur sol possible » vis-à-vis des règles de l'art [10,13], la vitesse limite est de 3 m/s. La vitesse limite du sol-chaux est de 5 m/s. Ces résultats ont été positionnés sur l'abaque du CIRIA [9], en tenant compte de la durée de l'essai (4h30). Ces vitesses limites sont celles du sol constitutif, non inclus la couche de surface. La vitesse limite du sol non traité est du même ordre de grandeur que celle d'un engazonnement. La

vitesse limite du sol-traité est du même ordre de grandeur que celle d'un géo-grille. C'est la première fois que cette démarche est entreprise et que des vitesses limites d'érosion externe sont évaluées pour un sol compacté de corps de digue. Les ordres de grandeur obtenus sont cohérents. Toutefois, tout cela doit être confirmé par des analyses complémentaires.

L'érosion est quantifiée en mesurant la position du sol à la règle graduée. Ces mesures sont ponctuelles et n'intègrent pas l'hétérogénéité de l'état de surface induite par l'érosion et les gradients de densité des couches de compactage. Il serait de grande valeur d'utiliser les mesures de grande précision obtenues par scanner 3D de type LIDAR terrestre par Arcor Technologies [10,13]. Ce travail est en cours de publication.

La norme ASTM-D6460 [1] n'a pas été élaborée pour quantifier la résistance à l'érosion d'un talus de digue soumis à un écoulement de surverse. Elle est initialement destinée aux sols agricoles. La vitesse limite d'érosion acceptable ne correspond pas à une vitesse seuil d'érosion. Cela permet simplement de comparer des matériaux entre eux. La notion d'érosion acceptable est sans fondement physique et purement normative : l'érosion unitaire doit être inférieure à 0,5 pouces.

L'écoulement est complexe. Il s'agit d'un écoulement à surface libre, non établi, fortement turbulent, aéré, et sur forte pente, avec macro-rugosités. L'état des connaissances actuelles rend extrêmement difficile l'analyse et l'interprétation des mesures en termes de taux d'érosion, de contrainte de cisaillement hydraulique, de loi d'érosion, de contrainte critique, et de coefficient d'érosion comme cela est l'usage pour l'érosion interne [2,3]. Des travaux de recherche sont nécessaires pour poursuivre dans cette direction et atteindre un niveau de connaissance des phénomènes élémentaires, un niveau de modélisation et un niveau de résultats opérationnel similaire à ce qui a récemment été obtenu pour l'érosion interne [2,3].

Observations

Un profil en marches d'escalier s'est progressivement développé durant la surverse, visible Figure 10. Au tout début de l'essai, l'érosion a été très intense sur la crête du sol non traité en affectant seulement la première couche de sol. Le corps de digue a été compacté par couches successives de 30 cm d'épaisseur. Le compactage induit un gradient de densité au sein de chaque couche, ce qui favorise l'érosion de leur partie inférieure. La zone ayant subi l'érosion la plus localisée est le pied de talus aval des deux canaux. La fosse d'érosion du sol-chaux présente une coupe nette de la première couche de sol. En revanche, pour le sol non traité, la rupture de pente est moins marquée alors que la profondeur est deux fois plus importante.

Les fuites apparues sous les parois latérales ont provoqué une érosion du sol de part et d'autre des canaux. Ceci est

visible sur la Figure 10. Le sol non traité étant plus érodable, les fuites sont plus importantes, et l'érosion de part et d'autre du canal est plus importante, plus localisée et plus profonde (canal de gauche sur la Figure 10). Au contraire, le sol-chaux est moins érodable, et les écoulements de fuites s'étalent plus largement de part et d'autre du canal (canal de droite sur la Figure 10). Sur les deux sols, l'érosion de la couche superficielle met en relief les couches de compactage.

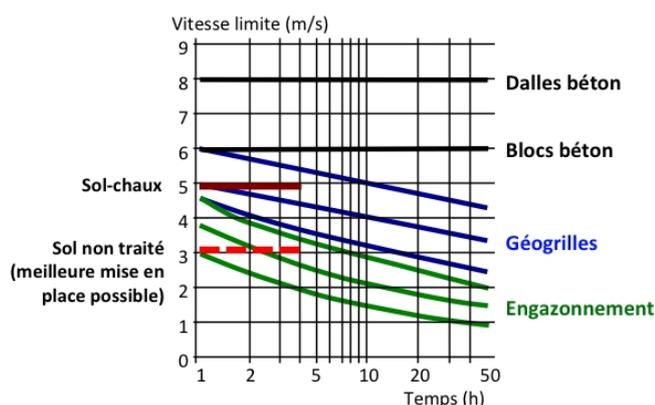


FIGURE 9: INTERPRETATION DES MESURES DES ESSAIS DE SURVERSE SUIVANT LA NORME ASTM-D6460 [1] ET POSITIONNEMENT SUR L'ABAQUE DU CIRIA [9]



FIGURE 10: VUE DU SOL APRES LA CAMPAGNE D'ESSAIS. LES FUITES ONT PROVOQUES UNE EROSION DU SOL DE PART ET D'AUTRE DES CANAUX.

Conclusion

Le simulateur de surverse in situ présenté dans cette communication permet de quantifier la résistance du sol de digue à l'érosion. Le point crucial est de solliciter le sol de l'ouvrage en place, ce qui permet de tenir compte des conséquences de la construction par couches, et de considérer toute l'étendue granulométrique du sol en place. Cette campagne d'essai a été réalisée avec des débits allant jusqu'à 570 l/s par mètre linéaire, et a conduit à une lame d'eau

correspondant à une surverse de 50 cm en crête et des vitesses de 6 m/s en pied de talus. Ces valeurs sont représentatives d'une surverse d'un tronçon de digue ou d'un petit barrage en terre. Le profil d'érosion du talus en marches d'escalier, dû aux couches de compactage, est mis en évidence. L'érosion est quantifiée sur la crête, le talus en partie haute et en partie basse, et en pied de talus où apparaît la fosse d'érosion. La simple analyse des mesures brutes obtenues, sans hypothèse de modélisation, permet déjà d'apporter des éléments de conclusion. L'interprétation suivant la norme ASTM-D6460 utilisée aux USA pour les solutions de protection de surface des digues donne des ordres de grandeur des vitesses limites cohérents avec l'abaque du CIRIA. Des travaux de recherche sont nécessaires pour aller plus avant sur l'évaluation de la contrainte critique et du coefficient d'érosion, du fait notamment de la complexité de l'écoulement aéré sur forte pente et des profils en marche d'escalier.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement l'ensemble du Consortium DigueELITE (Lhoist, ISL, EDF et Arcor Technologies) et l'EPTB Vidourle pour leur contribution enthousiaste. Le projet de recherche français DigueELITE (www.digueelite.fr) a été financé par BPI, la Région PACA et le CD13 à travers le FUI (AAP 15).

Références

- [1] ASTM (2012). — Standard test method for determination of Rolled Erosion Control products (RECP) performance in protecting earthen channel from stormwater-induced erosion. Technical Report D 6460.
- [2] Bonelli S. (2012). — *Erosion of Geomaterials*, Wiley/ISTE, 371 p.
- [3] Bonelli S. (2013). — *Erosion in geomechanics applied to dams and levees*, Wiley/ISTE, 388 p.
- [4] Briaud J., Chen H., Govindasam A., Storesund R. (2008). — Levee erosion by overtopping in New Orleans during the Katrina Hurricane. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(5):618-632.
- [5] Cantré S., Olschewski J., Saathoff F. (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.
- [6] Chanson, H. (2001). *The Hydraulics of Stepped Chutes and Spillways*. Balkema, Lisse, The Netherlands.
- [7] 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.
- [8] Hanson G.J., Cook K.R. (2004). — Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ. *Applied Eng. in Agric.* 20(4): 455-462.
- [9] Hewlett H.W.M., Boorman L.A., Bramley M.E. (1987). *Design of Reinforced Grass Waterways*. CIRIA Report 116, Construction Industry Research and Information Association, London, England, 116 p.
- [10] Herrier G., Bonelli S., Cornacchioli F., Nerinx N., Nicaise S., Puiatti D., Richard J.-M., Tachker P. (2018). Erosion resistant dikes thanks to soil treatment with lime, 3rd International Conference on Protection against Overtopping, 6-8 June 2018, Grange-over-Sands, UK.

- [11] Mériaux P., Royet P., Folton C., *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations*, Cemagref Editions, 2004.
- [12] Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE) (2015). — *Référentiel technique digues maritimes et fluviales*, 190 p.
- [13] Nerinx N., Bonelli S., Puiatti D., Herrier G., Fry J.-J., Tourment R., Nicaise S. (2016). — Impact of lime treated soils performance on design of earthfill dikes, 3rd European Conference on Flood Risk Management FLOODrisk 2016, Lyon.
- [14] Olschewski J., Cantré S., Saathoff F. (2014). — Flume experiments to determine the erosion stability of the german dredgdikes research dike. In *Proceedings of the South Baltic Conference on New Technologies and Recent Developments in Flood Protection*. Danzig, pages 1-11.
- [15] Thornton C., Scholl B., Huches S., Abt S. (2012). — Full-scale testing of levee resiliency during wave overtopping. *Proceedings from Annual Innovative Dam and Levee Design and Construction for Sustainable Water Management*, pages 721-735.
- [16] Van der Meer J.W., Hardeman B., Steendam G.J., Schuttrumpf H., Verheij H., (2011). — Flow depths and velocities at crest and landward slope of a dike, in theory and with the wave overtopping simulator. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32):10.