

Digues et petits barrages en terre : un appareillage permettant de simuler une surverse in situ

Florian Mercier, G. Charrier, Stéphane Bonelli, Sylvie Nicaise, N. Chaouch, Y. Gremeaux, F. Byron, L.H. Luu

▶ **To cite this version:**

Florian Mercier, G. Charrier, Stéphane Bonelli, Sylvie Nicaise, N. Chaouch, et al.. Digues et petits barrages en terre : un appareillage permettant de simuler une surverse in situ. Colloque SHF/CFBR "Hydraulique des barrages et des digues", Nov 2017, Chambéry, France. pp.601-612. hal-01818908

HAL Id: hal-01818908
https://hal.science/hal-01818908

Submitted on 19 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

Session 223 du CST de la SHF

Digues et petits barrages en terre : un appareillage permettant de simuler une surverse in situ

Fabienne MERCIER, Grégory CHARRIER, Stéphane BONELLI, Sylvie NICAISE, Naïm CHAOUCH, Yves GREMEAUX, Faustine BYRON, Li-Hua LUU

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

Résumé : La rupture d'une digue fluviale suite à la survenue d'une crue dépassant la crête de l'ouvrage constitue l'un des scénarios incontournables de l'étude de dangers. Il est capital de quantifier la résistance à la surverse. Des essais à petite échelle au laboratoire sont exclus, du fait de l'absence de similitude pour un phénomène d'écoulement à surface libre sur forte pente avec érosion d'un sol cohésif. Par ailleurs, apporter le sol de digue dans un canal hydraulique de laboratoire ne permet pas d'avoir une représentation correcte du matériau en place, en terme de granulométrie et d'hétérogénéité induite par le compactage par couches. C'est la raison pour laquelle nous avons développé un simulateur de surverse in situ, à échelle un. Le dispositif a été déployé pour la première fois en avril 2016 dans le cadre du projet de recherche DigueELITE sur une digue expérimentale de 3,5 m de haut, 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, avec des débits allant jusqu'à 570 l/s par mètre linéaire, des vitesses de 5 m/s en pied de talus, et une lame d'eau de 30 cm en crête. La procédure suivie s'appuie sur les recommandations de la norme ASTM-D6460. Chaque campagne correspond à une durée d'écoulement de 4h30. La première phase d'érosion est celle de la couche superficielle. La deuxième phase est celle du sol constitutif. L'érosion se fait en marches d'escalier, en faisant apparaître les couches de compactage. Les résultats obtenus avec le simulateur de surverse montrent que le sol-chaux a une meilleure résistance à l'érosion que le sol non-traité. Par rapport au sol non traité, l'érosion en partie basse du talus est 3 fois moins importante dans le sol-chaux, et le développement de la fosse d'érosion en pied de talus aval y est 5 à 10 fois moins important.
Mots-clefs : Digue, barrage en terre, surverse, érosion, essai de terrain

Levees, dikes and small earth dams: a field overflowing simulator

Abstract : One of the key scenarios of the hazard study is the failure of a river dike following the occurrence of a flood beyond the crest of the structure. It is important to quantify the resistance to overflow. Small-scale laboratory tests are excluded due to the lack of similarity for a free surface flow phenomenon on steep slopes with erosion of a cohesive soil. Moreover, bringing the dike soil into a hydraulic laboratory channel does not make it possible to have a correct representation of the material in place, in terms of granulometry and heterogeneity induced by the compaction by layers. This is why we have developed a field overflowing simulator. The device was deployed for the first time in April 2016 as part of the DigueELITE research project on a 3.5 m high experimental dike in 2 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, with flow rates up to 570 l / s per linear meter, velocities of 5 m / s at the slope foot, and a water height of 30 cm at crest. The procedure followed is based on the recommendations of ASTM-D6460 standard. Each campaign corresponds to an overflow duration of 4h30. The first phase of erosion is that of the surface layer. The second phase is that of the dike body constituent soil. The erosion shows a stair-steps pattern, due to the layers of compaction. The results obtained with the overflowing simulator show that lime-treated soil has better erosion resistance than untreated soil. Compared to the untreated soil, erosion in the lower part of the slope is 3 times less in lime-treated soil, and the scour depth development process at the downstream toe is 5 to 10 times smaller.
Key words: Dike, levee, earth dam, overflowing, erosion, field test

I INTRODUCTION

Un guide international, l'International Levee Handbook [CIRIA, 2013], et un référentiel technique national, le Référentiel technique digues maritimes et fluviales [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 surverse. La rupture d'une digue fluviale suite à la survenue d'une crue dépassant la crête de l'ouvrage constitue l'un des scénarios incontournables de l'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 qualitative et se fait alors à dire d'expert pour une crue de référence, en comparant l'action hydraulique et la résistance du revêtement déterminée par ailleurs et parfois plusieurs années avant, le plus souvent sur canal hydraulique de laboratoire, et disponible 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.

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, qui permettent de simuler un écoulement de surverse ou des déferlements [Thornton *et al*, 2012], selon la norme ASTM D6460 [ASTM, 2012]. Un ensemble similaire de canaux a été construit sur le démonstrateur DredgeDike pour qualifier le sol de dragage sur le talus aval [Olschewski, 2014], [Cantré *et al*, 2017]. 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, car il n'existe pas d'appareillage de terrain pour la surverse. Pourtant, cette démarche a déjà été entreprise pour les digues maritimes. Aux Pays-Bas, un simulateur mobile est déjà déployé depuis plusieurs années pour estimer la résistance le long du talus aval et surtout en pied de digue sous l'effet de vagues et de volumes de franchissement croissants [Van der Meer, 2007].

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 [Wan & Fell, 2004], [Bonelli, 2013]. Toutefois, 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'essai de laboratoire EFA reproduit l'érosion de surface au laboratoire [Briaud *et al*, 2008], mais il est à petite échelle et nécessite d'apporter le sol au laboratoire. 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 [Hanson & Cook, 2004] , [Robbins & Wibowo, 2012]. Bien qu'il devrait 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. De plus, le JET Test n'est pas suffisamment représentatif de l'action de l'eau sur le talus lors d'une surverse.

Pour quantifier la résistance du sol 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. Des essais à petite échelle au laboratoire sont exclus, du fait de l'absence de similitude pour un phénomène d'écoulement à surface libre sur forte pente avec érosion d'un sol cohésif. Par ailleurs, 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 granulométrie et d'hétérogénéité induite par le compactage par couches. C'est la raison pour laquelle Irstea a développé un appareillage de terrain pour simuler une surverse in situ, et quantifier la résistance à l'érosion de la crête, du talus aval et du pied de talus.

II LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Une digue dédiée au programme de recherche DigueELITE 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 de 3H/2V. L'ouvrage comprend une section de 30 m traitée à la chaux et une section de 10 m en sol non traité (sol naturel). Les talus sont non-végétalisés (Figure 1). Les techniques de construction et les caractéristiques géotechnique des sols en place montrent que le sol non traité réalisé correspond « au meilleur sol possible » vis à vis des règles de l'art, et que le sol-chaux a une résistance mécanique et une résistance à l'érosion interne d'un à deux ordres de grandeur supérieures à celles de ce sol non traité [Nerincx *et*

al, 2016]. Le présent dispositif expérimental vise à confirmer que la résistance à l'érosion de surface du sol-chaux est supérieure à celle du sol non traité.



Figure 1 : Le démonstrateur DigueElite, avec les 2 canaux avant essai, sol non traité à gauche, sol-chaux à droite.

Le 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 ancrée 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.

Le protocole d'essai reprend des éléments de la norme ASTM D6460 [ASTM, 2012]. Une campagne d'essai consiste à réaliser une série d'écoulements de 30 mn, et à mesurer à chaque fois l'érosion apparue pendant ces 30 mn. Le débit initial est de 95 l/s/mL. 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, et la vitesse en pied de talus est proche de 5 m/s. Les caractéristiques 8 essais sont données dans le Tableau 1, et illustrées sur la Figure 2. La séquence de 8 essais correspond à 4h30 d'écoulement, qui ont été réalisés sur le sol non traité et sur le sol-chaux en 3,5 jours.

Le sol en place, qui n'est pas végétalisé, n'a volontairement pas été décapé, pour ne pas le modifier artificiellement. Les parois des canaux sont posées sur le sol, également pour ne pas modifier le sol en place. Il s'agit de ne pas créer une zone remaniée le long des parois, à la base de ceux-ci, qui aurait une résistance inférieure et aurait localisé l'érosion de manière artificielle. 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 en cours d'essai 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.

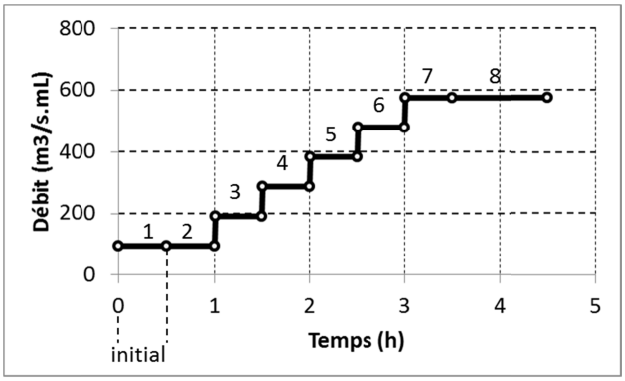


Figure 2 – Séquence en débit des 8 essais, avec un essai 1 initial, suivi de 6 essais avec augmentation graduelle du débit, et un 8ème essai d'une durée d'1h

L'écoulement à surface libre sur cette forte pente (angle de 33°) est super-critique, avec un nombre de Froude de l'ordre de 2 à 4, en moyenne. Cet écoulement est non établi, la pente étant trop courte. Enfin, il est aéré, comme le montre la Figure 4, et l'état de surface est irrégulier et fluctuant.

Le débit entrant est mesuré avec un débitmètre doppler. 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.

Tableau 1 : Caractéristiques des 8 essais de surverse.

N°	Débit (m^3/h)	Débit unitaire (l/s/mL)	Durée (min)	Hauteur d'eau en crête (mm)	Vitesse en pied de talus (m/s)
1-initial	210	96	30	71	2,2
2	210	96	30	71	2,2
3	420	191	30	105	2,5
4	630	287	30	145	3,6
5	840	382	30	178	4,2
6	1050	478	30	207	4,4
7	1260	574	30	220	4,9
8	1260	574	60	220	4,9



(a) (b)

Figure 3 : Vue en cours d'essai pour un débit de 95 l/s/mL (essai 1-initial) (a) et un débit de 570 l/s/mL (b).



(a) (b)

Figure 4 : Vue de l'écoulement en tête de talus et en cours d'essai pour un débit de 95 l/s/mL (a) et un débit de 570 l/s/mL (b) ; les parois latérales font 60 cm de haut.

III RESULTATS

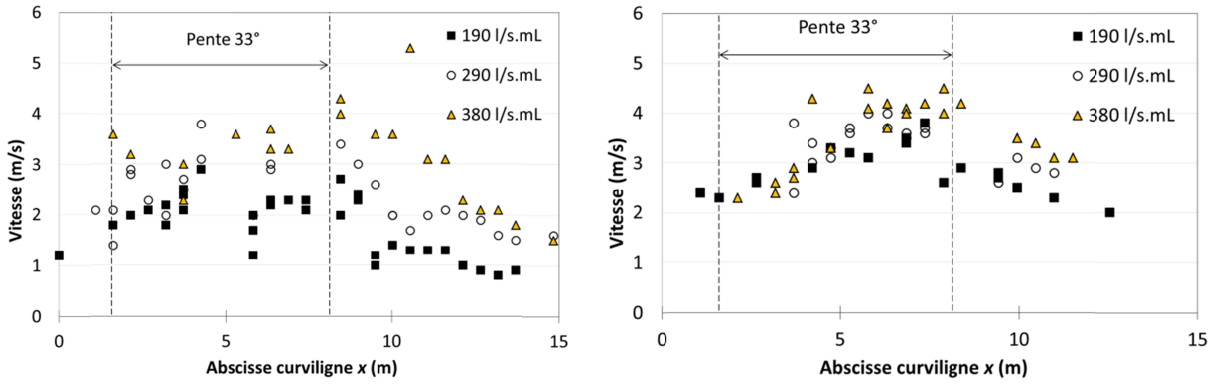
III.1 Vitesses et hauteurs d'eau

Les vitesses mesurées se situent entre 0.9 et 4.9 m/s (Tableau 1). L'écoulement accélère le long du talus pour atteindre sa vitesse maximale en pied aval (Figure 5). Les vitesses les plus faibles se trouvent sur la terrasse aval.

Pour un même débit entrant, les vitesses apparaissent plus élevées dans le canal du sol-chaux. Ceci s'explique par le fait que le sol-chaux étant plus résistant, les fuites sous les parois sont moins importantes. Il en résulte que pour le même débit entrant, l'action hydraulique est moins importante sur le sol non traité que sur le sol-chaux, car les fuites sont plus importantes. Autrement dit, une interprétation au 1er ordre qui compare directement les valeurs mesurées sur les deux canaux sans tenir compte des fuites conduit à sous-estimer l'érosion du sol le plus érodable.

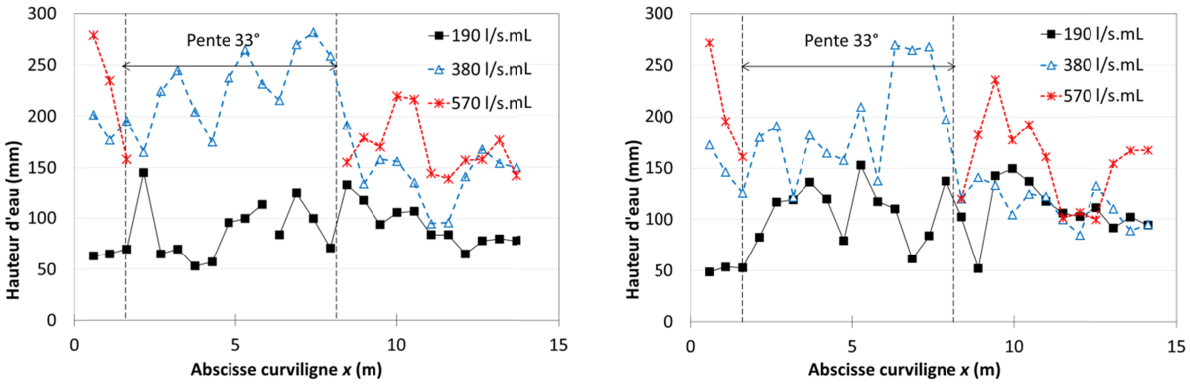
Les mesures de vitesses sont plus dispersées pour le sol non traité. Ceci est probablement dû à une érosion en marches d'escaliers plus prononcée et plus importante, qui accroît les irrégularités de l'écoulement.

Les hauteurs d'eau mesurées dans les canaux varient entre 5 et 27 cm (Tableau 1). L'état de surface de l'écoulement est irrégulier, et l'écoulement est aéré avec des remous et une transition floue entre eau et air. Ces mesures ne donnent que des ordres de grandeurs, qui sont comparables pour les deux canaux (Figure 6). Les profils de hauteurs d'eau ne diminuent pas avec la pente, alors que la vitesse augmente : ceci est probablement dû à la surface du sol en marche d'escaliers, qui rend les profils complexes. Malgré ces difficultés, les hauteurs d'eau sont comparables pour les deux canaux.



(a) Sol non traité (b) Sol-chaux

Figure 5 : Vitesses mesurées dans l'écoulement en cours d'essai par courantomètre électromagnétique pour le sol non traité (a) et le sol-chaux (b). Le zéro de l'abscisse curviligne de situe en crête.



(a) Sol non traité (b) Sol-chaux

Figure 6 : Hauteurs d'eau mesurées dans l'écoulement en cours d'essai par règle graduée pour le sol non traité (a) et le sol-chaux (b). Le zéro de l'abscisse curviligne de situe en crête.

III.2 Erosion du sol

L'érosion est quantifiée en mesurant la position du sol à la règle graduée. On en déduit le volume érodé par mètre carré, l'érosion unitaire (m^3/m^2), qui représente une épaisseur moyenne de sol érodé. Cette épaisseur moyenne est à considérer en tenant compte de l'hétérogénéité du profil d'érosion, que ce soit en marche d'escalier sur le talus, ou en fosse d'érosion en pied de talus. Le rapport entre épaisseur moyenne et profondeur maximum est de l'ordre de 2 à 3.

Les courbes de la Figure 7 montrent l'érosion unitaire de la pente du talus, trois fois plus importante pour le sol non traité par rapport au sol-chaux. Ces courbes obtenues à partir de mesures à la règle graduée sont comparables, quoiqu'un peu supérieures, à celles obtenues avec les mesures de grande précision réalisées par scanner 3D de type LIDAR terrestre par Arcor Technologies [Nerincx *et al.*, 2017].

La Figure 8 montre les profils mesurés : profils initiaux, profils après l'essai n°1-initial (30 mn), et profil final après 4h30 d'écoulement. 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.

L'évolution avec le temps de l'érosion unitaire pour ces 4 zones est donnée Figure 9 où l'on compare les zones pour chaque sol, et Figure 10 où l'on compare les sols pour chaque zone. 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 1er essai initial provoque une érosion du sol-chaux inférieure de moitié environ à celle du sol non traité.

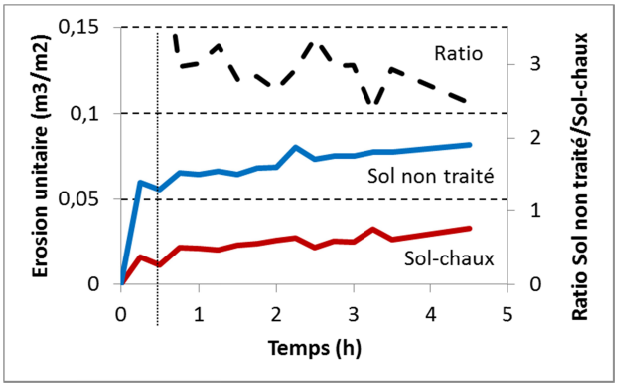


Figure 7 – Volumes érodés par mètre carré en fonction du temps sur le talus, et ratio des volumes érodés

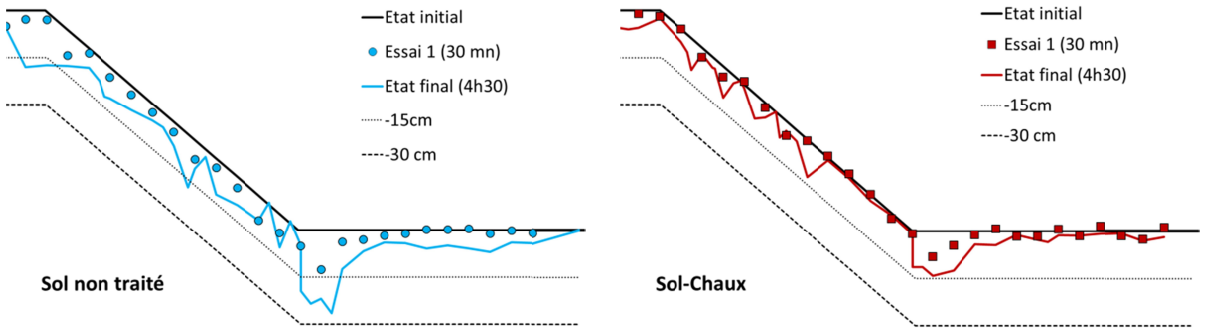


Figure 8 – Profils mesurés du sol des deux canaux.

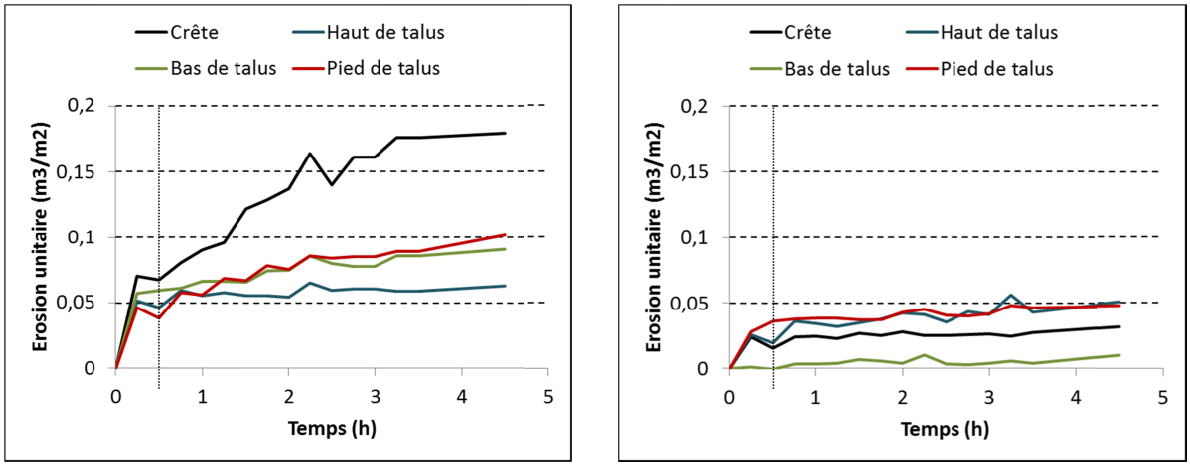
Plus précisément, les observations faites sur les Figures 9 et 10 sont les suivantes :

- Sol non traité
  - le 1er 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 (Figure 8).
- Sol-chaux
  - le 1er essai provoque une érosion initiale de l'ordre de 0,02 à 0,04 m^3/m^2, 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 1er essai initial de 30 mn de surverse à 95 l/s/mL provoque une érosion significative des deux sols. Elle est représentative de la couche de surface, altérée par les échanges thermiques, hydriques et chimiques avec l'environnement extérieur pendant 10 mois, depuis la construction.

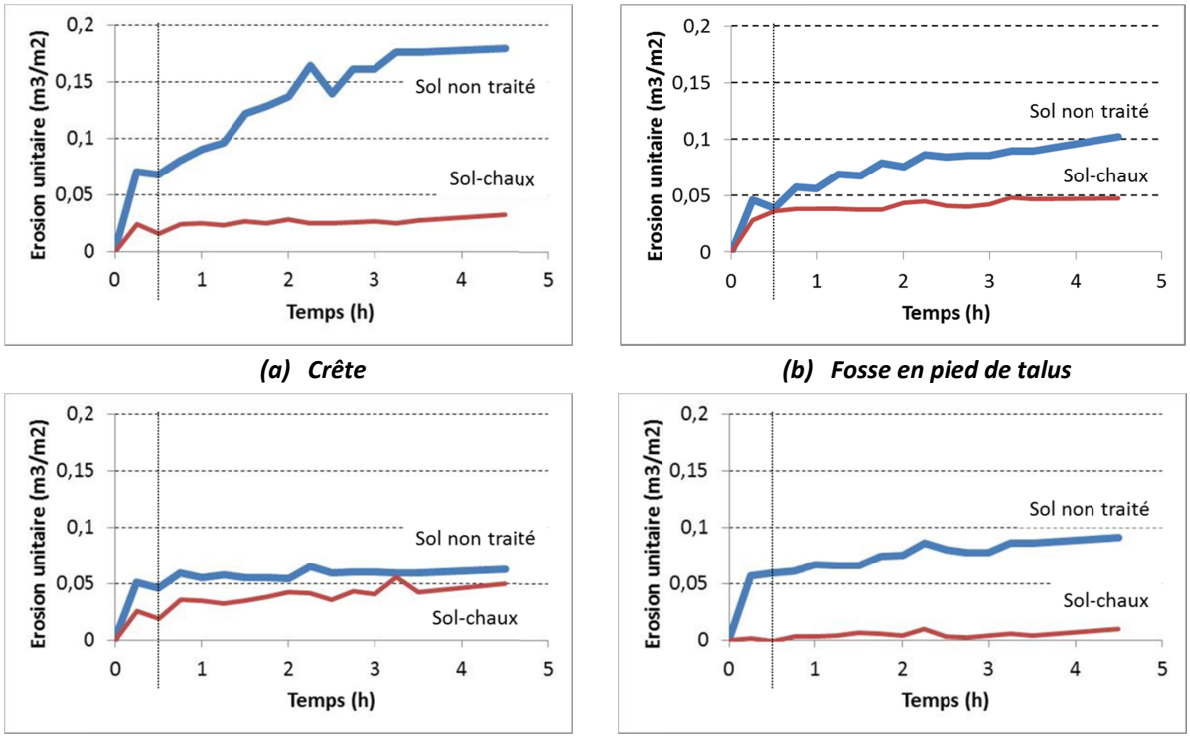
Le cumul des différentes phases à débit croissant a causé moins d'érosion que le 1er essai initial. Afin de mieux mettre en évidence la résistance du sol lui-même, qui apparaît supérieure à celle de la couche superficielle, les évolutions avec le temps de l'érosion unitaire sont tracées à partir de la fin de l'essai 1-initial, Figure 11 où l'on compare les zones pour chaque sol, et Figure 12 où l'on compare les sols pour chaque zone.

Pour le sol non traité, la Figure 12 montre que 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 importance est probablement 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 avec une vitesse initiale forte comme le montre la Figure 5, et une agitation importante. Cette condition hydraulique est donc plus sévère qu'une surverse sur une grandeur longueur de crête. 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.



(a) Sol non traité *(b) Sol-chaux*

Figure 9 – Volumes érodés par mètre carré en fonction du temps. Comparaison de l'érosion sur la crête, le haut de talus, le bas de talus et le pied de talus pour chaque sol.



(a) Crête *(b) Fosse en pied de talus*

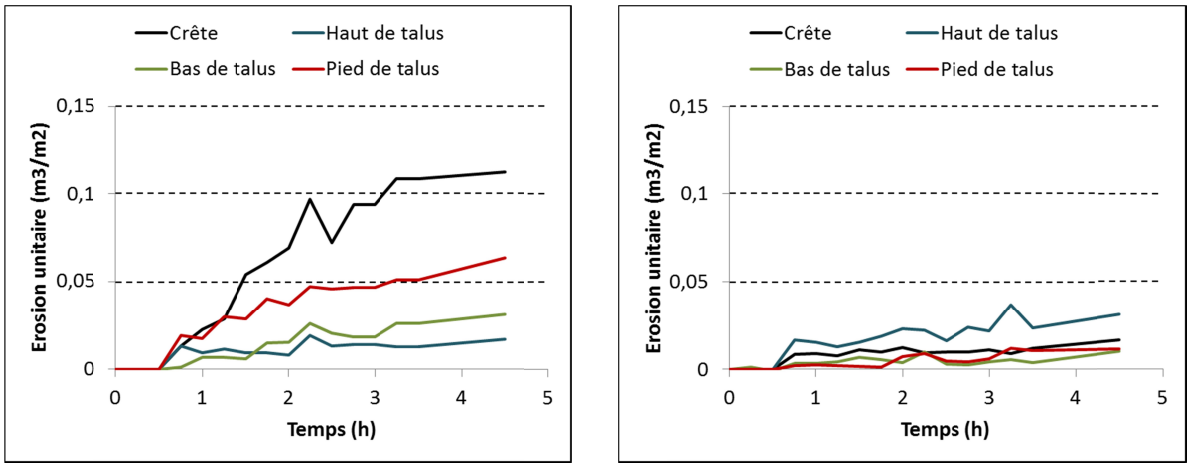
(c) Talus partie haute *(d) Talus partie basse*

Figure 10 – Volumes érodés par mètre carré en fonction du temps. 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).

Les données de la Figure 10 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 :

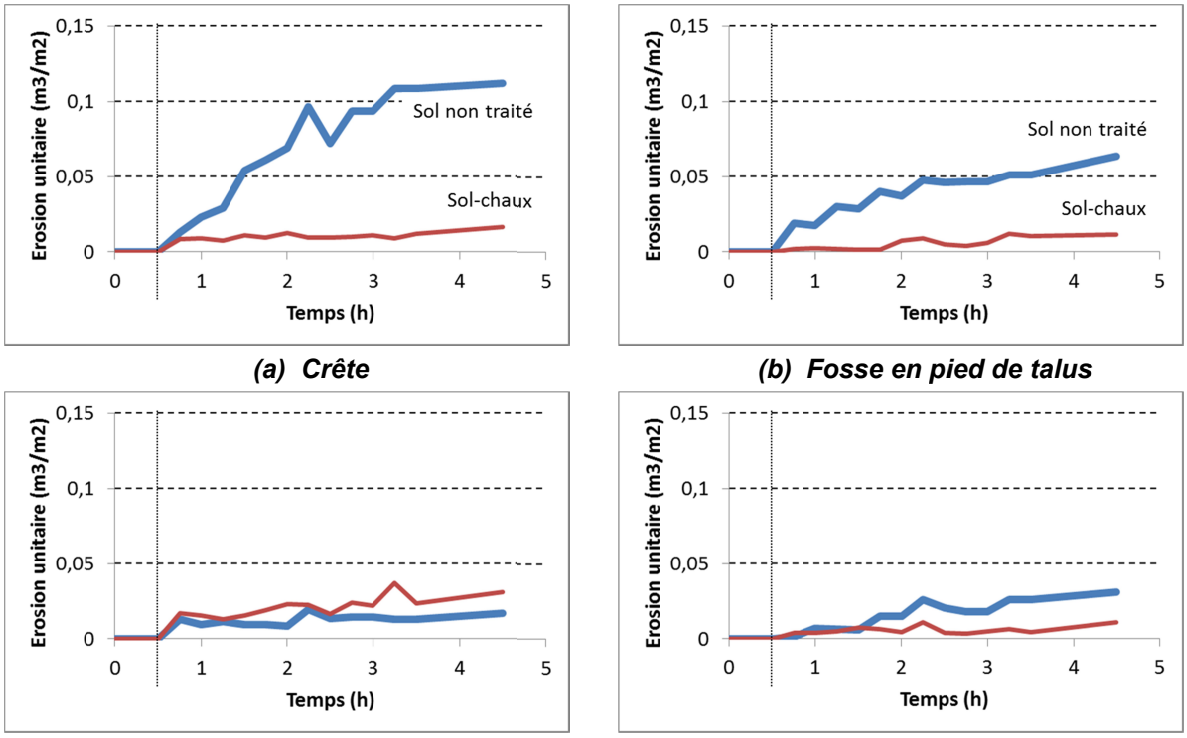
- en crête, l'érosion du sol non traité est 6 à 7 fois plus importante que celle du sol-chaux ;
- en pied de talus, là où se développe la fosse d'érosion, l'érosion du sol non traité est 5 à 10 fois plus importante que celle du sol-chaux ;
- en partie basse du talus, l'érosion du sol non traité est 3 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 ; des 4 zones, c'est ici que l'action hydraulique est la moins forte.



(a) Sol non traité ***(b) Sol-chaux***

Figure 11 – Volumes érodés par mètre carré en fonction du temps à partir de la fin de l'essai 1-initial. Comparaison de l'érosion sur la crête, 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) Talus partie basse*

Figure 12 – Volumes érodés par mètre carré en fonction du temps à 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).

IV OBSERVATIONS

Un profil en marches d'escalier s'est progressivement développé durant la surverse. La Figure 13a présente une vue latérale des canaux - le sol traité étant au premier plan - sur laquelle apparaissent clairement le profil en marches d'escalier et la fosse d'érosion en pied de talus. Au tout début de

l'essai, l'érosion a été très intense sur la crête du sol non traité (Figure 13b) 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. Ce comportement est illustré par les Figures 13c et 13d pour le sol non-traité. La Figure 13e montre comment le différentiel d'érosion entre le haut et le bas des couches s'est traduit par la formation de marches. La zone ayant subi l'érosion la plus localisée est le pied de talus aval des deux canaux (Figures 14b et 14c). 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. La fosse fait environ 50x30 cm^2 et a une profondeur maximale de 36.5 cm (Figure 14a).

Les fuites apparues sous les parois latérales ont provoqués une érosion du sol de part et d'autre des canaux. Ceci est visible sur la Figure 15. 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 15). 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 15). Sur les deux sols, l'érosion de la couche superficielle met en relief les couches de compactage.

V 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 première 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 de 30 cm en crête et des vitesses de 5 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. Une campagne d'une durée de 4h30 permet de quantifier l'érosion de la couche superficielle (le sol n'ayant pas été décapé pour l'essai), puis l'érosion du sol constitutif du corps de l'ouvrage. 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. Pour aller plus avant sur l'évaluation de la contrainte critique ou de la vitesse critique, et du coefficient d'érosion, il est nécessaire de réaliser des modélisations numériques pour interpréter les résultats obtenus, du fait de la complexité de l'écoulement aéré sur forte pente et des profils en marche d'escalier.

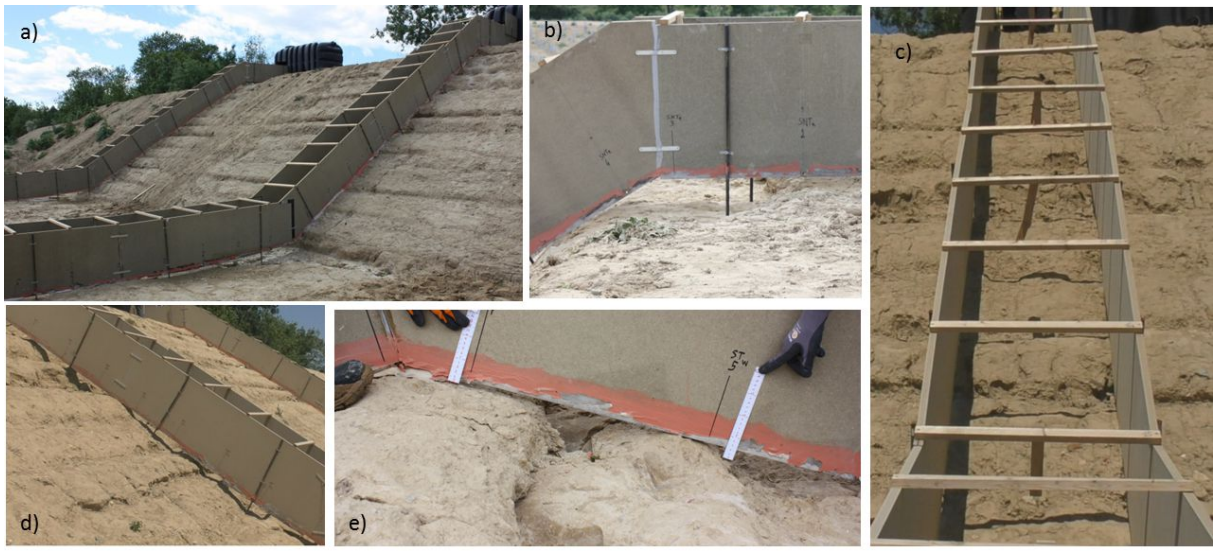


Figure 13 – Etat final des parements. Un profil d'érosion en marches d'escalier s'est développé durant les essais et une fosse d'érosion s'est formée sur les deux sols.

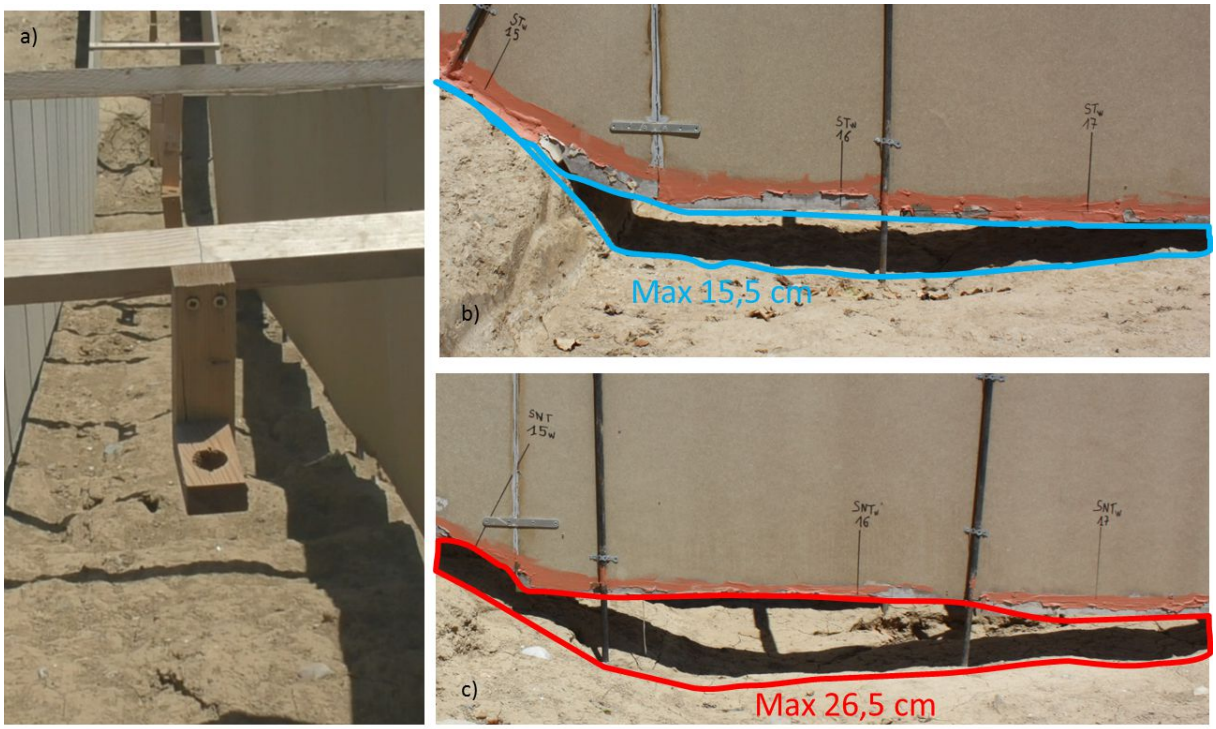


Figure 14 – Vue de la fosse d'érosion du canal naturel (a) et détail des fosses d'érosion pour le sol traité (b) et le sol naturel (c).



Figure 15 – Vue du sol après la campagne d'essais. Les fuites ont provoqués une érosion du sol de part et d'autre des canaux. 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 (gauche). Au contraire, le sol-chaux est moins érodable, et les écoulements de fuites s'étalent plus largement de part et d'autre du canal (droite). Sur les deux sols, l'érosion de la couche superficielle met en relief les couches de compactage.

VI REMERCIEMENTS

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

VIIREFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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.

Bonelli S. (2013). — *Erosion in geomechanics applied to dams and levees*, Wiley.

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.

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.

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.

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.

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE) (2015). - *Référentiel technique digues maritimes et fluviales*, 190 p.

Nerincx N., Bonelli S., Cornacchioli F., Fry J.-J., Herrier G., Mercier F., Nicaise S., Puiatti D., Richard J.-M., Tachker P. (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.

Nerincx 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.

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.

Robbins B. A., Wibowo J. L. (2012). - Field Jet Erosion Tests of Treated Clay Levee Embankments, ICSE6 Paris - August 27-31.

Thornton C., Hugues S., Scholl B. (2012). - Full-Scale Testing of Levee Resiliency During Wave Overtopping, ICSE6 Paris - August 27-31.

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.

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.

Wan C.F., Fell R. (2004). - Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(4):373-380