

RESISTANCE A L'ÉROSION PAR SURVERSE DES BARRAGES EN REMBLAIS : ESSAIS DE CARACTERISATION DES PROCESSUS D'ÉROSION DES BARRAGES EN REMBLAIS CONSTITUES DE MATERIAUX GROSSIERS

*Resistance to overflow of earth-fill dams: laboratory tests to
characterize erosion processes of levees constituted of coarse
materials*

Hanna HADDAD, Christophe PICAULT, Lucas MONTABONNET, Hendrik STOTER, Sébastien ROUX
CNR-CESAME, 4 rue de Chalon-sur-Saône, 69007, Lyon
h.haddad@cnr.tm.fr ; c.picault@cnr.tm.fr

MOTS CLEFS

OVERCOME ; érosion externe ; surverse ; essais en laboratoire ; matériaux grossiers.

KEY WORDS

OVERCOME; External erosion; Overflowing; Laboratory tests; coarse materials.

RÉSUMÉ

La réévaluation des débits caractéristiques du Rhône à prendre en compte dans les études de sûreté conduit, dans certaines conditions d'exploitation dégradées, à un risque de surverse des barrages latéraux en remblais du fleuve. Ce phénomène peut conduire à la rupture de l'ouvrage. Compte tenu de cet enjeu de sûreté, le projet de recherche européen OVERCOME (OVERflowing EROsion of COarse Material Embankment) a été initié en 2018 afin d'évaluer la résistance à la surverse de ce type d'ouvrages. Ce projet réunit CNR, EDF (CIH/LNHE), UPMadrid, HRWallingford et INRAE et vise à identifier les paramètres principaux qui pilotent ce processus d'érosion.

Dans ce cadre, CNR conduit, au sein de son laboratoire d'hydraulique, une série d'essais de surverse à grande échelle sur un barrage en remblais de 2.35 m de hauteur. L'ouvrage représenté (de 8 m de long d'amont en aval, 4 m de large et de pente 2/1) est constitué de matériaux graveleux typiques des alluvions du Rhône. La construction est similaire à celle des ouvrages réels (compactage par couches). Pendant les essais, les ouvrages ont été soumis à une lame d'eau déversante de 5 cm au-dessus de la crête. Lors de l'ensemble des essais, les phénomènes d'érosion de surface puis d'érosion sous forme de marches d'escaliers (géométrie similaire au headcut) ont été observés successivement. Un des critères d'évaluation de la résistance de l'ouvrage a été la durée du processus, entre le début de surverse et la rupture complète. Deux états de densité ont été testés (1.95 et 2.1) et ont conduit à des durées significativement différentes (respectivement 5 et 10 min). L'état de compacité du remblai apparaît donc comme un paramètre déterminant dans la résistance à la surverse de l'ouvrage.

Trois essais ont été réalisés et ont permis de collecter un jeu de données très riche (caractéristiques hydrauliques et géométrie instantanée au cours de l'érosion). Cette communication présente les premières analyses et comparaisons entre les essais 1 et 2. En perspective, l'exploitation complète du jeu de données permettra d'affiner les conclusions et de définir des essais complémentaires dans le cadre du programme.

ABSTRACT

Predicting overflowing erosion of levees and embankment dams is one of the major difficulties in assessing the safety of these structures. Although it has been identified as the main failure mechanism, the methods and tools available to engineers to characterize it deterministically are still very limited. In particular, no numerical modelling tool validated to the required level is yet available to characterize the erosion process in geometric and temporal terms, taking into account the behavior of the soil material constituting the embankment and its foundation and the hydraulic loadings specific to levees. Given this safety issue, the European research project

OVERCOME (OVERflowing EROsion of COarse Material Embankment) was initiated in 2018 to assess the overflow resistance of this type of structure. The project brings together CNR, EDF (CIH/LNHE), UPMadrid, HRWallingford and INRAE and aims to characterize the physical erosion processes, identify the main parameters driving this erosion process and to improve the robustness and accuracy of prediction tools.

In this context, a series of large-scale overflow tests are conducted at CNR-CESAME laboratory on a 2.35 m high embankment dam. The structure represented (8 m long, 4 m wide and 2H/1V slope) is made of coarse material (typical of Rhone River embankments). The construction is similar to that of real structures (compaction of each layer). During the tests, the structures were subjected to a 5 cm overflow water level above the crest. During all tests, surface-like erosion was observed and followed headcut-like erosion. One of the criteria used to assess the resistance of the structure was the duration of the test, from the onset of overtopping to complete failure. For the first two tests, two states of density were tested (1.95 and 2.1), leading to different test durations (5 and 10 min respectively). Density then appears to be a decisive parameter in the structure's resistance to overtopping.

Three tests have been carried out for now and provided a large dataset (hydraulic characteristics and instantaneous geometry during the erosion process). This paper presents the initial analyses and comparisons between test 1 and 2. The full dataset will be used to refine the conclusions and define further tests within the framework of the program.

1. INTRODUCTION

La prédiction de l'érosion par surverse des digues de protection contre les crues et des barrages latéraux en remblais constitue l'une des difficultés majeures dans l'analyse de la sûreté de ces ouvrages. La moitié des cas de rupture par érosion est due à de l'érosion par surverse [1]. Néanmoins, les méthodes pour caractériser l'érosion par surverse restent très limitées à ce jour. Les modèles numériques actuels ne sont pas validés avec des données de cas réels ou d'essais à grandes échelles et le jugement « à dire d'expert » est largement utilisé, faute de mieux [2].

L'état de l'art actuel distingue deux types de mécanismes d'érosion lors de la surverse d'un ouvrage (Figure 1) [3] :

- Le 1^{er} mécanisme dénommé « Headcut erosion » (érosion par marches d'escaliers) s'applique aux sols fins cohésifs (argiles et limons). L'érosion se caractérise par la formation de chutes d'eau successives sur le parement aval. Pendant ce processus d'érosion, les marches sont de plus en plus profondes, atteignant et sapant la base de l'ouvrage et une érosion régressive par effondrements successifs de colonnes de sol se met en place jusqu'à atteindre la crête amont de la digue et la formation de la brèche. Le modèle numérique WinDAM [4] intègre ce mode d'érosion et a fait l'objet de validation sur des cas réels de rupture de barrages réservoirs [5].
- Le 2^{ème} mécanisme d'érosion de surface s'applique aux sols granulaires fins (sables) uniformes. L'érosion progresse selon des plans subhorizontaux, qui écrête progressivement le remblai, jusqu'à atteindre la base de l'ouvrage. Ce mécanisme d'érosion de surface a été décrit par de nombreux travaux expérimentaux, mais n'a pas été confirmé par des essais à grande échelle ni sur des cas réels de rupture d'ouvrages.

Pour les sols à granulométrie étalée constitués à la fois de limons, sables et graviers, ce qui est notamment le cas des barrages latéraux de CNR, les mécanismes d'érosion lors de la surverse ne sont pas étudiés dans la littérature. C'est dans l'objectif d'améliorer la connaissance sur ce type d'ouvrages ainsi que les outils de prédiction pour les ingénieurs, que le projet européen OVERCOME s'est lancé. Une meilleure compréhension des mécanismes et cinétiques de rupture permettrait d'affiner les paramètres à prendre en compte dans l'analyse des risques. Ainsi, dans le cadre de ce projet, une série d'essais à plusieurs échelles (digue de 0,5 m à 2,5 m), en laboratoire et sur un ouvrage réel, ainsi que des développements numériques sont réalisés.

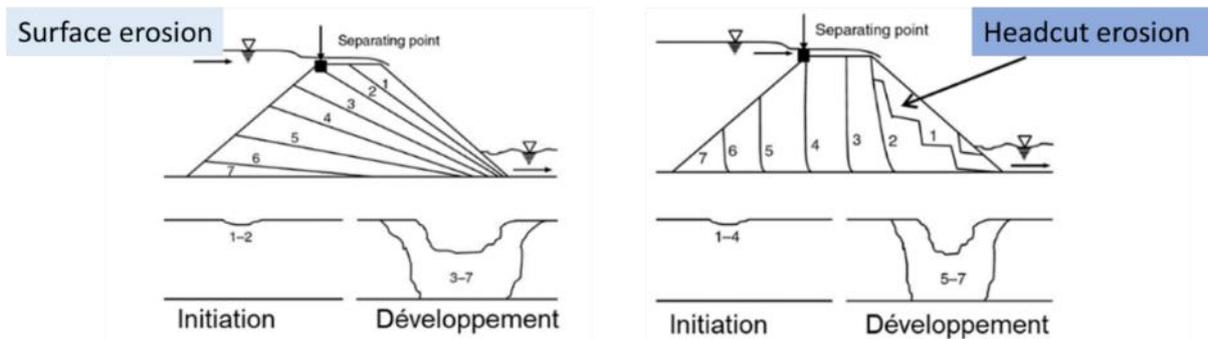


Figure 1 : Mécanismes d'érosion de surface et d'érosion par « headcut », tiré de [2].

Dans ce contexte, CNR conduit au sein de son laboratoire d'hydraulique, une série d'essais de surverse à grande échelle sur un barrage en remblai d'environ 2,3 m de hauteur. Trois essais ont été réalisés à ce jour avec une légère variation de teneur en matériaux fins et de compactage de la digue entre les différents essais. Dans cette communication, la méthodologie mise en place est présentée, ainsi que les premiers résultats obtenus pour les 2 premiers essais réalisés.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Caractéristiques des ouvrages construits en laboratoire

2.1.1. Construction

Les ouvrages construits sont composés de matériaux provenant d'un stock de sables graviers localisé à proximité d'un barrage latéral CNR, sur la commune de Montfaucon près de Montélimar. Pour la construction, les matériaux ont été placés par couches successives d'environ 30 cm à l'aide d'une pelle mécanique puis compactés à l'aide d'une plaque vibrante pour obtenir la densité visée. Afin d'éviter au maximum l'infiltration d'eau dans la digue, une couche de Kaolinite d'environ 3 cm est appliquée sur l'ensemble du parement amont. Ce matériau assure l'étanchéité sans ajout de cohésion au sol.

2.1.2. Propriétés physiques de l'ouvrage construit

Pour la construction des remblais, deux stocks ont été livrés au laboratoire. Des mesures granulométriques ont été réalisées sur ces stocks de matériaux (Figure 2), le stock 2 présentant un taux de fines plus important que le stock 1. Le remblai de l'essai 1 était constitué uniquement du stock 1 et le remblai de l'essai 2 était composé d'un mélange à part égales des deux stocks. La digue construite pour l'essai 1 est ainsi composée d'environ 70% de graviers et 30% de sables (Figure 2), alors que celle de l'essai 2 contient des limons représentant environ 5% du sol employé. Des contrôles au cours de la construction ont été réalisés, par essais au gamma densimètre sur différentes couches, puis en crête de digue au moyen d'essais au pénétromètre dynamique léger à énergie variable (essais PANDA). Sur ces derniers on constate que la résistance des matériaux évolue en fonction de la profondeur dans l'ouvrage et fluctue entre 4 et 10 MPa.

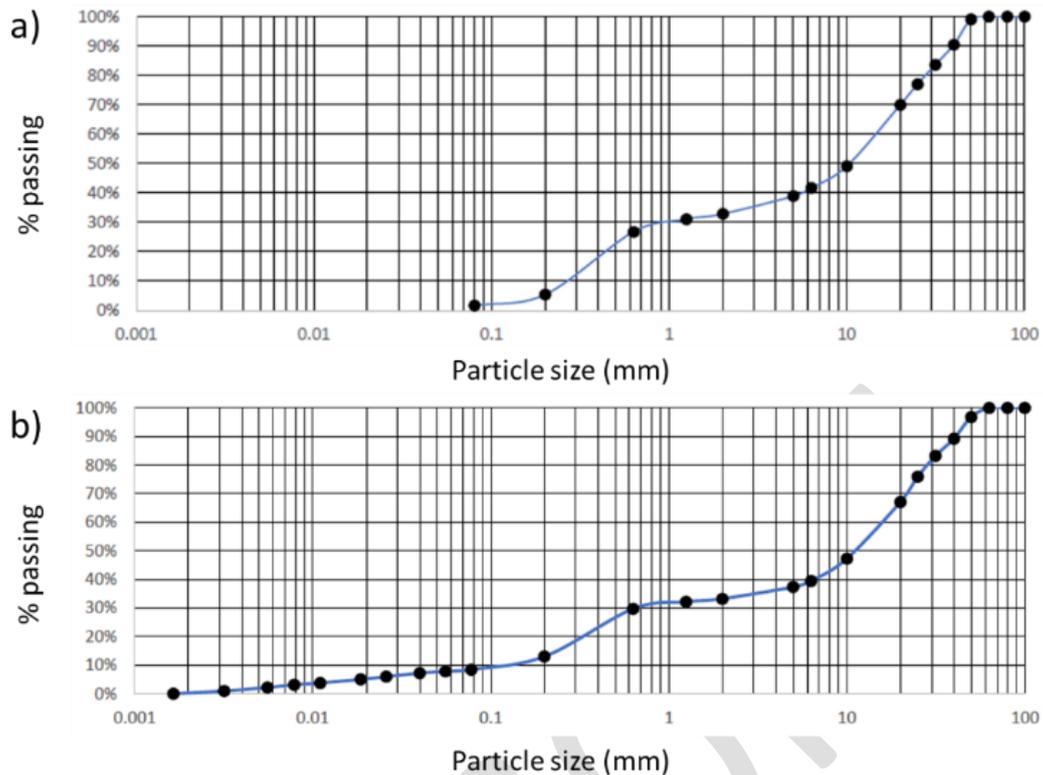


Figure 2 : Distribution granulométrique des matériaux de Montfaucon utilisés pour la digue construite en laboratoire, a) stock 1 et b) stock 2.

2.1.3. Géométrie de l'ouvrage construit

Le remblai construit mesurait 2.37 m de haut, 4 m de large et 8.5 m de long, avec des pentes amont et aval égales à 1V/2H (Figure 3). Le parement amont n'est pas intégralement reproduit afin de gagner de la place dans l'enceinte utilisée pour les essais : il est remplacé en pied par un muret vertical jusqu'à l'altitude $z=0.85$. En effet, la partie la plus à l'amont a été considérée moins importante dans le mécanisme de formation de la brèche qui se développe depuis l'aval (Figure 3 a,b). Une échancrure centrale (Figure 3c) a été creusée en crête de l'ouvrage, d'une profondeur de 0.15 m par rapport à la crête, d'une largeur de 2 m et d'une longueur de 1.4 m. Les pentes latérales de l'échancrure étaient de 1/1. Le volume total de matériaux dans l'enceinte de l'ouvrage est de 48 m³.

Lors d'un essai, l'objectif est de simuler un niveau d'eau constant d'environ 5 cm au-dessus de l'échancrure. Pour cela, la vanne latérale à l'amont de l'échancrure d'une largeur de 2 m est utilisée afin de fixer le niveau d'eau dans le réservoir pendant l'essai (Figure 3b). Ainsi, en début d'essai, un débit maximal (environ 250 L/s) est injecté à l'amont et la vanne est positionnée à une certaine cote pour évacuer le sur débit et obtenir le niveau d'eau souhaité à l'amont. Une partie du débit injecté est dévié par le dessus de la vanne et passe par le canal de suralimentation. Lorsque la brèche a lieu, la digue s'érode avec agrandissement de l'échancrure dans la crête et le niveau d'eau à l'amont chute. A partir de ce moment, le débit dévié par la vanne est transféré à la digue et l'ensemble du débit injecté à l'amont passe ensuite par la brèche dans l'ouvrage.

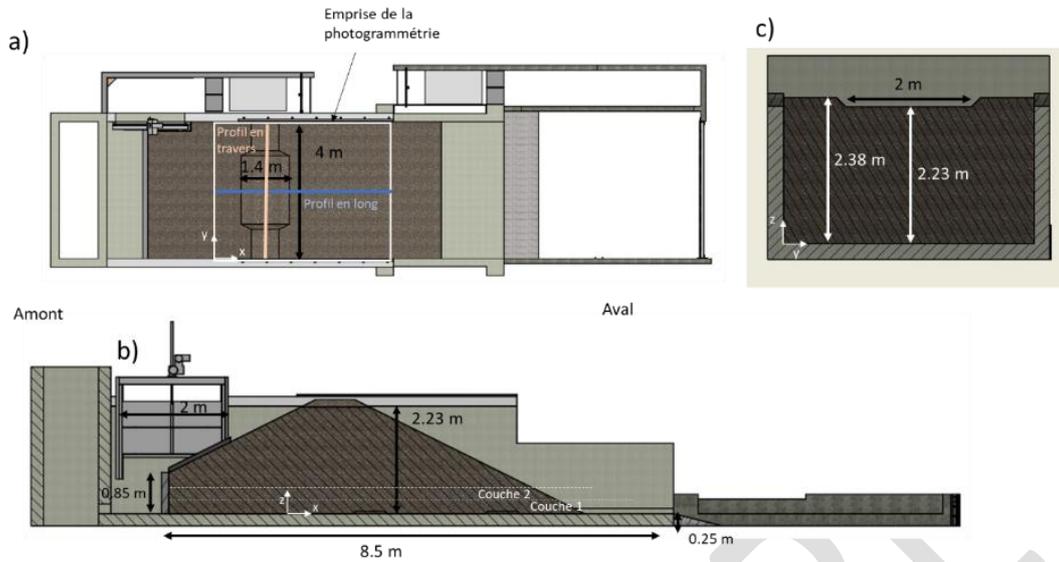


Figure 3 : Géométrie de l'ouvrage, a) vue du dessus, b) vue de côté et c) détail au niveau de l'échancrure.

2.2. Instrumentation

Durant les essais, les débits, les niveaux d'eaux, les vitesses d'écoulement ainsi que la topographie ont été mesurés (Figure 4). L'ensemble des données, à l'exception des photos et des vidéos, ont été réalisées à l'aide d'un système d'acquisition et de visualisation dont la fréquence a été fixée à 2 Hz (2 mesures par seconde).

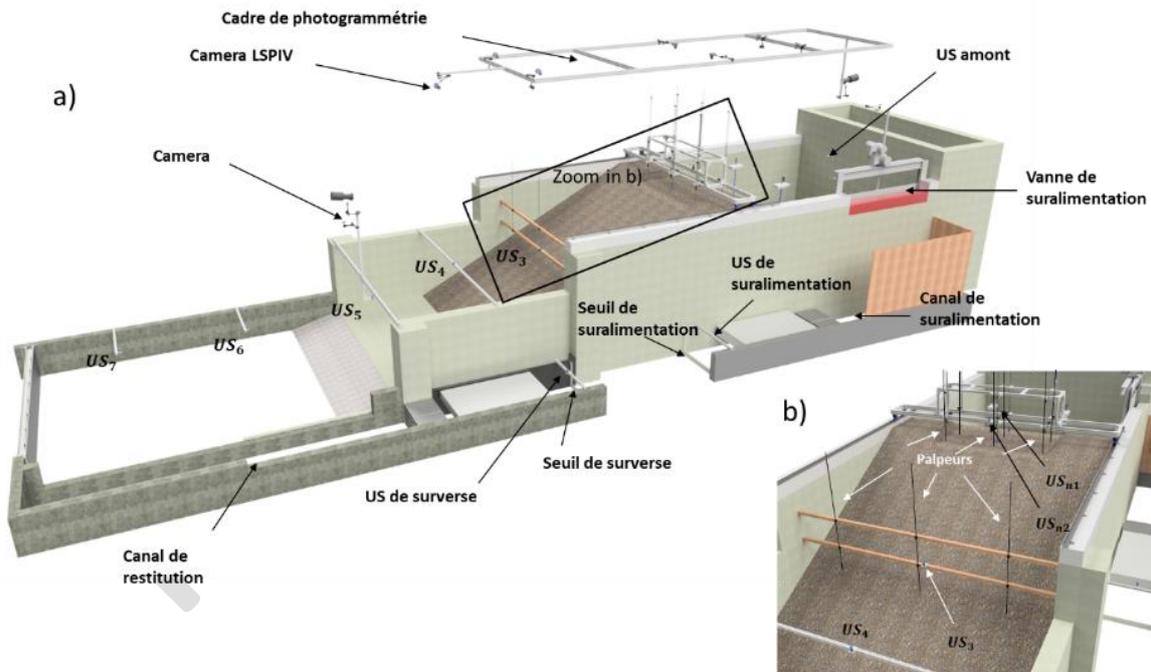


Figure 4 : Schéma 3D du modèle construit en laboratoire et l'instrumentation mise en place : a) Vue d'ensemble et b) détail vu du talus aval de la digue avec le chariot de mesure positionné au niveau de l'échancrure.

2.2.1. Débit entrant et débits sortants

Les débits ont été mesurés à 3 endroits sur le modèle (Figure 4) :

- Un débitmètre électromagnétique permet d'obtenir le débit entrant dans le modèle $Q_{entrant}$
- Le débit de surverse Q_{surv} a été mesuré par un seuil jaugeur à l'aval du modèle dans le canal de restitution.

- Le débit de suralimentation $Q_{suralim}$ a été mesuré par un seuil jaugeur dans le canal de suralimentation à l'aval de l'électrovanne qui fait office de trop plein du réservoir amont.

Les deux seuils jaugeurs sont des déversoirs rectangulaires à plaque mince avec une contraction latérale de 10 cm et une pelle de 10 cm. Une courbe de tarage permet d'obtenir le débit en fonction de la hauteur d'eau au-dessus du seuil pendant l'essai.

2.2.2. Niveaux d'eau

La cote de la surface libre est mesurée à différents points par des sondes à ultrasons (US) (Figure 4) :

- La sonde positionnée dans le réservoir amont (US amont) permet de contrôler le niveau d'eau amont pendant l'essai (fixé à environ 5 cm par rapport à l'échancrure).
- Deux sondes (US_{n1} et US_{n2}) sont sur le charriot central au-dessus de l'échancrure.
- Une série de sondes (US_3 , US_4 , US_5 , US_6 et US_7) est positionnée le long du talus aval et dans le bassin à l'aval de la digue, afin d'obtenir un profil en long central.
- Les sondes au niveau des seuils jaugeurs (US de surverse et US de suralimentation) permettent d'obtenir les hauteurs d'eau à partir desquelles les débits sortants sont calculés.

2.2.3. Vitesses d'écoulement sur le parement aval

Les vitesses d'écoulements sur le parement aval de la digue ont été évaluées par la méthode LSPIV (« Large Scale Particle Image Velocimetry »). Il s'agit d'une méthode non-intrusive qui permet de déterminer les champs de vitesses de surface sur la base d'une séquence d'images séparées par des pas de temps réguliers. Quatre cibles ont été placées pour ortho-rectifier les images et les vitesses sont estimées dans le plan de pente 1/2 du parement aval (Figure 5). Ainsi, lorsque les vitesses d'écoulement ne sont pas dans ce plan (par exemple lors de la formation de marches d'escaliers ou de cascades), les vitesses ont probablement été sous-estimées.

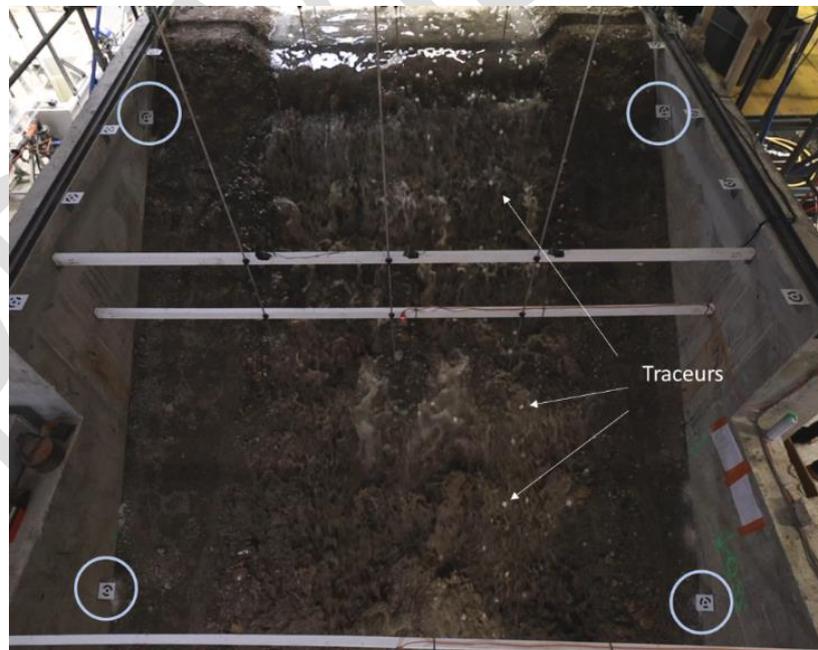


Figure 5 : Vue du parement aval de l'ouvrage depuis la caméra utilisée pour la LSPIV. Les 4 cibles utilisées pour ortho-rectifier les prises de vues sont entourées en bleu.

2.2.4. Topographie

La topographie en temps réel a été évaluée par photogrammétrie. Pour cela, six appareils photo reflex ont été placés sur un cadre au-dessus de l'ouvrage (Figure 4) et ont été synchronisés. A l'aide de

multiples cibles placées dans le modèle, l'analyse des photos permet de former un modèle numérique de terrain à chaque pas de temps (une photo toutes les 6 secondes pour l'essai 2). L'emprise de la photogrammétrie s'étend d'environ 0.5 m à l'amont du bord amont de l'échancrure à 3.5 m à l'aval du bord aval de l'échancrure (Figure 3a).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Description générale des essais

Les deux essais réalisés ont été similaires et se sont déroulés en quatre phases successives : i) remplissage du réservoir amont, ii) surverse et érosion de surface (ou érosion de type 1), iii) érosion de type headcut (ou érosion de type 2) et iv) formation et évolution de la brèche.

La phase de remplissage (phase 1) du réservoir à l'amont a été réalisée lentement afin d'éviter de déplacer, soulever ou éroder la couche de Kaolinite en surface et l'infiltration dans le corps de l'ouvrage. Un débit de l'ordre de 20 à 40 L/s est ainsi appliqué au début. Lorsque le niveau d'eau atteint le niveau du seuil de la vanne de suralimentation latérale, le débit est augmenté au maximum, soit environ 240 L/s et la vanne de suralimentation est ajustée jusqu'à obtenir un niveau d'eau d'environ 5 cm au-dessus de l'échancrure. Cette première phase d'initialisation de l'essai a duré environ 30 min pour chacun des essais. Le moment de début de surverse (dès que l'eau passe par-dessus l'échancrure) est considéré comme le temps initial de l'essai t_0 . Lors de l'essai 1, la quantité de Kaolinite appliquée sur le parement amont s'est avérée insuffisante et une infiltration de l'ordre de 10 L/s a eu lieu dans le cœur de l'ouvrage. Le haut de l'ouvrage (crête et échancrure) s'est alors affaissé de presque 10 cm par tassement général du corps de l'ouvrage, du fait de ces écoulements internes. Cet aléa de contrôle de l'étanchéité risque de créer une dynamique d'érosion plus rapide due à la combinaison d'une érosion externe et d'une érosion interne. Néanmoins, étant donné la faible valeur du débit d'infiltration comparé aux débits de surverse et de brèche (supérieur à 250 L/s), le biais dû à l'infiltration est considéré faible dans notre cas.

A partir de t_0 , une phase d'érosion de surface (phase 2) sur le parement aval de l'ouvrage a eu lieu pour les deux essais. Ce mécanisme d'érosion est caractérisé par une érosion plutôt uniforme du parement aval de la digue en conservant la pente initiale. Il n'y a pas à ce stade une formation de marches d'escaliers ni de cascades lors de l'érosion (Figure 6). Cette phase a duré environ 1 min pour les deux essais.



Figure 6 : Photographies du parement aval de l'ouvrage lors de la phase 1 : a) pendant l'essai 1 à $t=0:30$ et b) pendant l'essai 2 à $t=0:36$.

Pour les deux essais, à partir d'environ une minute depuis le début de la surverse ($t=1:00$), une phase d'érosion qui s'apparente à de l'érosion par headcut démarre (phase 3). Il s'agit d'une érosion du

parement aval de la digue avec apparition de marches d'escaliers. Ces marches se forment vraisemblablement au niveau des interfaces des couches successives de construction de l'ouvrage. Les couches sont effectivement plus consolidées en surface qu'au cœur de chacune d'entre elles. Ainsi, pour les deux essais, 5 à 7 marches ont pu être observées en début de la deuxième phase de l'essai (Figure 7). La phase 3 de l'érosion se poursuit verticalement avec des marches d'escaliers qui s'épaississent et qui se combinent pendant les essais, jusqu'à l'obtention de quelques marches de grande hauteur (Figure 8). En parallèle à l'érosion verticale, une érosion horizontale régressive se met en place pendant les deux essais. Les deux essais ont différé en termes de durée de la phase 3 : celle-ci a duré environ 2 min pour l'essai 1 et environ 7 min pour l'essai 2.

Lorsque l'érosion régressive atteint le parement amont de l'ouvrage, la brèche a lieu (phase 4). Celle-ci a eu lieu à environ $t=2:40$ pour l'essai 1 et $t=8:30$ pour l'essai 2 (Figure 9). Suite à la brèche, une érosion rapide de l'ouvrage a lieu pendant environ 1 min après la brèche pour les deux essais avant d'obtenir une pente d'équilibre et de mettre fin aux essais.

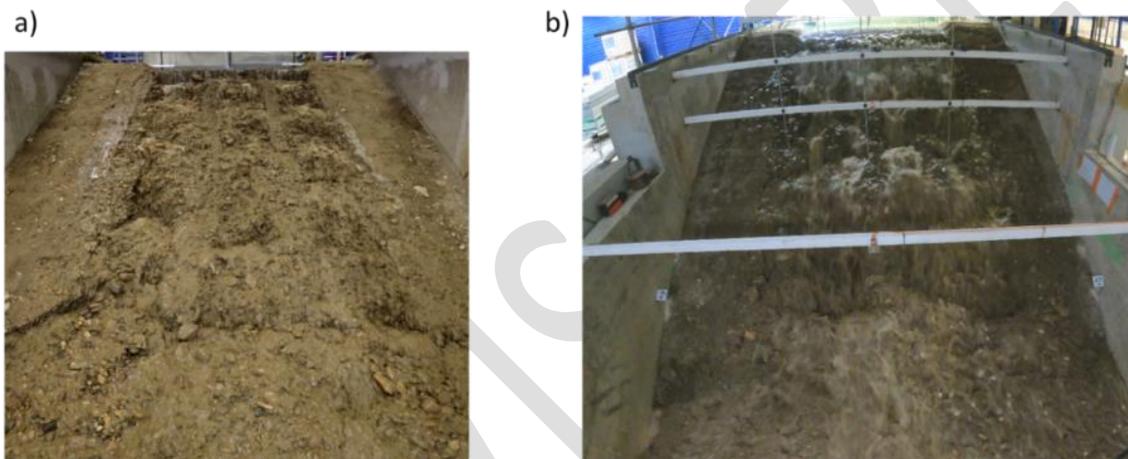


Figure 7 : Photographies du parement aval de l'ouvrage lors de la phase 2 : a) pendant l'essai 1 à $t=2:00$ b) pendant l'essai 2 à $t=1:36$.

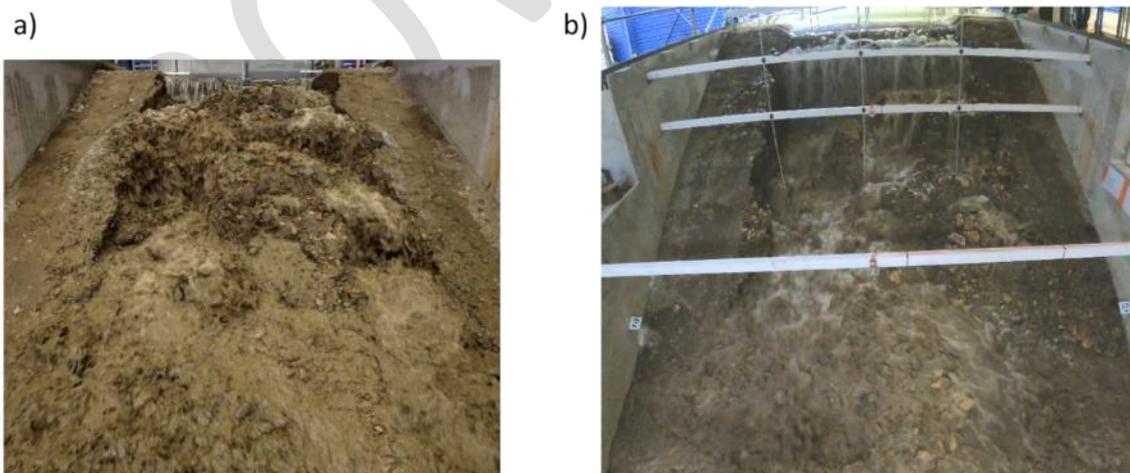


Figure 8 : Photographies du parement aval de l'ouvrage lors de la phase 2 : a) pendant l'essai 1 à $t=3:00$ et b) pendant l'essai 2 à $t=5:18$.

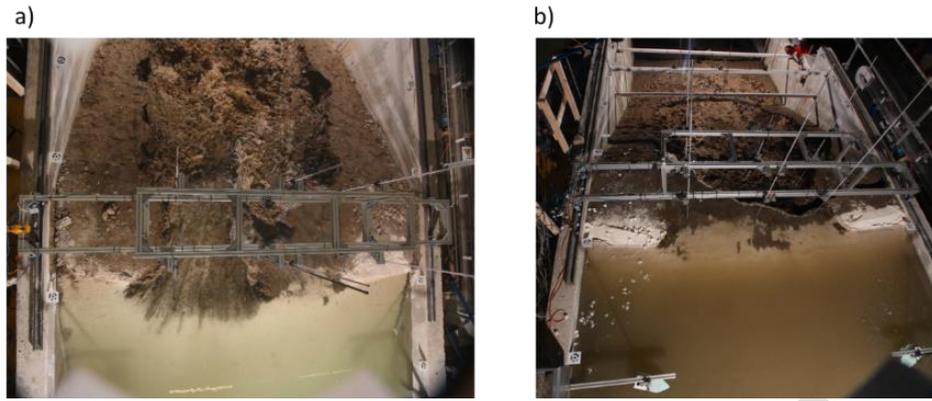


Figure 9 : Photographies du dessus de l'ouvrage au moment de la brèche, a) pour l'essai 1 et b) pour l'essai 2.

3.2. Evolution des débits et niveaux d'eau pendant les essais

Les hydrogrammes ainsi que le niveau d'eau dans le réservoir pour chaque essai sont présentés sur la Figure 10. Le niveau d'eau dans le réservoir atteint la hauteur de l'échancrure à $t=t_0$. Le débit augmente à partir de la phase 2 jusqu'à atteindre une valeur de stabilisation. Pour l'essai 2, une fois le niveau amont atteint, il a été maintenu à 5 cm au-dessus de la cote de l'échancrure et le débit de surverse s'est stabilisé à environ 60 L/s, avec une légère augmentation lors de la phase 3 (Figure 10b). Pendant l'essai 1, la hauteur d'eau amont a moins bien été contrôlée à cause de l'infiltration et du tassement lors du début de l'essai (Figure 10a). De plus, la brèche a eu lieu plus rapidement que lors de l'essai 2, ce qui n'a pas permis d'observer une stabilité de débit sur une période assez longue comme pour l'essai 2. Pendant la brèche, un pic de débit a lieu, dû à l'effet combiné de la baisse de la topographie en crête et du transfert du débit de suralimentation vers la surverse. Le pic de débit est d'environ 300 L/s pour l'essai 1 et 290 L/s pour l'essai 2.

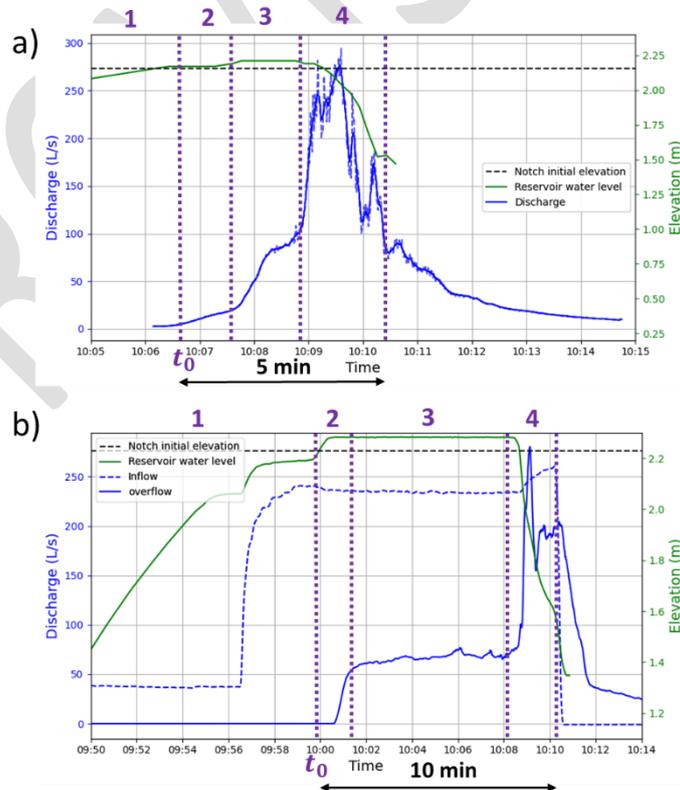


Figure 10 : Hydrogramme et évolution du niveau d'eau dans le réservoir pendant a) l'essai 1 et b) l'essai 2. Les quatre phases de chaque essai sont matérialisées par les traits pointillés violets. Pour l'essai 1, le débit entrant n'est pas tracé car des problèmes techniques ont été rencontrés.

3.3. Evolution de la topographie de l'ouvrage pendant les essais

L'évolution de la topographie lors des essais a été évaluée par analyse de la photogrammétrie. La topographie à chaque pas de temps est extraite le long des profils longitudinaux et en travers centraux (matérialisés en Figure 3a). La dynamique temporelle d'évolution de la topographie le long des profils d'intérêt est présentée en Figure 11 et Figure 12. D'après les mesures, la première phase d'érosion de type I est similaire entre les deux essais (courbes bleues). Sur la deuxième phase d'érosion de type II, même si l'on observe des « marches d'escaliers » dans les deux cas, la dynamique est très différente entre les deux essais. Lors de l'essai 1, l'érosion régressive s'est rapidement propagée longitudinalement vers l'échancrure amont. Lors de l'essai 2, l'érosion n'a concerné que le parement aval jusqu'à environ $t=6:00$ et au contraire de l'essai 1, l'érosion était plutôt verticale et une cascade d'environ 80 cm s'est formée (Figure 8b). Cette cascade s'est ensuite propagée vers l'amont. Cette dynamique très différente entre les deux essais peut être partiellement expliquée par le biais de l'érosion interne observée sur l'essai 1.

Les volumes de remblai érodés ont été également comparés pour les deux essais. Lors de l'essai 1, 2 m^3 de remblais ont été déplacés pendant les phases 2 et 3 (pendant environ 3 min) et 6 m^3 pendant la phase 4 (pendant environ 1 min). Cela correspond à des taux d'érosion respectifs de l'ordre de 0.66 m^3/min et 6 m^3/min . Pour l'essai 2, les volumes respectifs sont de 4 m^3 (pendant environ 9 min) et 6 m^3 (pendant environ 2 min) ce qui correspond à des taux d'érosion respectifs de l'ordre de 0.44 m^3/min et 3 m^3/min .

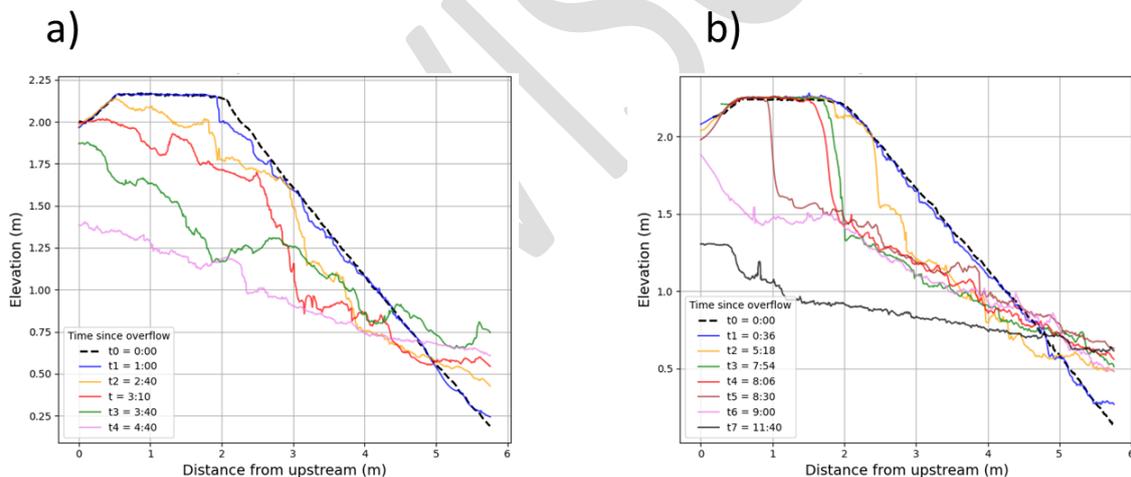


Figure 11 : Evolution de la topographie (donnée de photogrammétrie) le long des profils longitudinaux pendant a) l'essai 1 et b) l'essai 2.

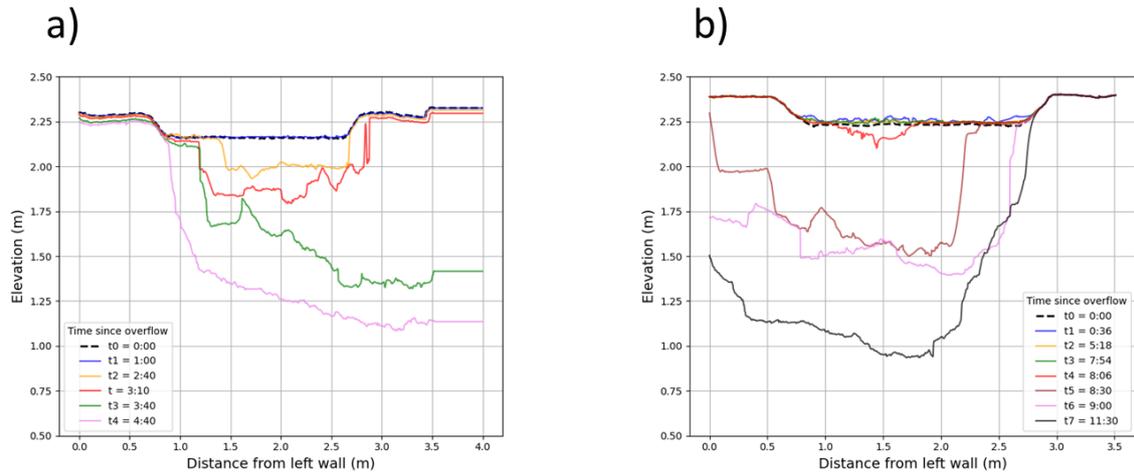


Figure 12 : Evolution de la topographie (donnée de photogrammétrie) le long des profils en travers pendant a) l'essai 1 et b) l'essai 2.

4. CONCLUSION, ENSEIGNEMENTS, DISCUSSION ET PERSPECTIVES DE TRAVAIL

Plusieurs enseignements peuvent être tirés des premiers essais réalisés. Tout d'abord, un jeu de données riche et intéressant a été récolté lors de ces essais permettant d'observer et d'analyser les mécanismes d'érosion lors de la surverse sur ce type d'ouvrages. Malgré quelques ajustements nécessaires qui ont été réalisées entre les essais 1 et 2 (application de plus de Kaolinite sur le parement amont, meilleure gestion du niveau d'eau amont à l'aide de la vanne latérale et ajout d'instruments de mesure en milieu de parement aval), les deux essais ont pu être intercomparés de manière satisfaisante. Pour les deux essais, deux types d'érosion successifs ont eu lieu, d'abord de l'érosion similaire à de l'érosion de surface puis de l'érosion similaire à du headcut. Lors de l'essai 2, les matériaux ont été plus compactés et présentaient une teneur en matériaux fins légèrement plus importante que l'essai 1. Cela a influencé significativement la durée et la dynamique de l'érosion des remblais. Le remblai de l'essai 2 était plus résistant et la phase d'érosion de type II était 3 à 4 fois plus longue que celle de l'essai 1. Les auteurs rappellent qu'il existe également un biais de comparaison avec l'infiltration observée lors de l'essai 1, mais ce paramètre semble être d'un second ordre comparé à la différence de densité et teneur en eau des matériaux.

D'un point de vue métrologique, les essais ont permis de comparer les technologies permettant de mesurer les variables d'intérêt. En particulier, l'évaluation de la topographie de l'ouvrage en temps réel lors de l'essai n'est pas aisée dans un écoulement turbulent et concentré en matières en suspension. Des mesures locales de la topographie de l'ouvrage ont été réalisées par l'utilisation de 9 palpeurs sur l'ouvrage (uniquement 6 pour l'essai 1) permettant chacun de mesurer le fond en un point (Figure 4). Par comparaison aux mesures des sondes ultrasons et à la photogrammétrie, il a été mis en évidence que la photogrammétrie mesure plutôt la cote de la surface libre que la cote du fond à partir du moment où de l'érosion a lieu. Afin de corriger ce biais, des modélisations numériques (CFD) sont en cours de développement. Néanmoins, même avec ce biais, la photogrammétrie permet d'avoir de la donnée spatiale sur une large emprise et fournit une évaluation qualitative de l'évolution de la topographie lors des essais.

Ces essais apportent des premières briques de compréhension des mécanismes d'érosion lors de la surverse et de la formation de brèche pour les remblais constitués de matériaux grossiers à granulométrie étalée. Ce jeu de données apporte des données de calibration et validation des outils numériques. En effet, des premières simulations numériques des essais 1 et 2 ont été réalisées à l'aide du logiciel EMBREA. Par ailleurs, un modèle CFD à l'aide du logiciel OPENFOAM a été construit et des

simulations de l'essai 2 ont été réalisées. Ce modèle peut directement être comparé et calibré avec les données de topographie, de hauteur d'eau et de vitesses d'écoulement obtenues lors de l'essai. Il présente l'avantage d'extraire les variables d'intérêt à chaque pas de temps et de manière distribuée sur l'ensemble de l'emprise du modèle. Il permet également d'acquérir la contrainte hydraulique au fond dont la mesure est impossible sur un fond mouvant pendant un essai. Enfin, le modèle CFD permet d'avoir la cote de fond du remblai et de corriger le biais de la photogrammétrie qui donne plutôt la cote de la surface libre. A son tour, le modèle CFD permet de calibrer un modèle plus simple et moins coûteux en temps tel qu'EMBREA. Ces travaux sont en cours et les résultats ne sont pas disponibles à ce jour. L'ensemble de ces outils permettraient de mieux évaluer la probabilité du risque ainsi que la forme, la durée et le pic de l'hydrogramme de brèche, qui sont des données d'entrée indispensables pour l'évaluation de la sûreté et dans une analyse de risques.

Ces premiers résultats fournissent des éléments de description des mécanismes d'érosion et de formation de brèche pour un matériaux donné et une échelle fixée. Dans quelle mesure ces résultats sont exportables à un ouvrage de taille différente ? La dynamique d'érosion semble fortement dépendante du compactage des matériaux et de leur teneur en matériaux fins. Quelles sont les frontières en termes de caractéristiques du remblai pour lesquelles les mécanismes d'érosion sont similaires ? Ces questions feront l'objet d'investigations dans le cadre du projet OVERCOME, en particulier à travers une inter-comparaison entre ces essais, les essais à plus petite échelle réalisés à UPM et les essais à plus grande échelle prévus.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'ensemble de l'équipe qui a participé à la construction et à la déconstruction de l'enceinte d'essai et des remblais et aux modifications nécessaires entre les différents essais. Par ailleurs, l'entreprise Sites est remerciée pour l'appui à l'instrumentation du système de photogrammétrie et à l'analyse réalisée pour en extraire les modèles numériques de terrain.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] ICOLD, Bulletin 99 update (statistical analysis of dam failures), 2019.
- [2] Courivaud J.-R. et al., Le projet OVERCOME : comprendre et modéliser les processus d'érosion par surverse des digues et barrages en remblai constitués de matériaux grossiers à granulométries étalées, Colloque CFBR 27-29 mars 2024.
- [3] Courivaud J.-R., Deroo L., Bonelli S. (2019). Erosion externe des barrages et des digues, Colloque CFBR 27-28/11/2019
- [4] Temple D.M., Hanson G.J., and Neilsen M.L. (2006) WinDAM - Analysis of overtopped earth embankment dams, In Proc. of the ASABE Annual Conference, Paper Number 062105
- [5] CEATI-DSIG (2017). Evaluation of Numerical Models for Simulating Embankment Dam Erosion and Breach Processes. Dam Safety Rep No. DSO-2017-02, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, CO