

ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

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

Jean-Robert Courivaud^{1,*}, Laurent del Gatto¹, Kamal El Kadi Abderrezzak², Christophe Picault³, Mark Morris⁴ et Stéphane Bonelli⁵

¹ EDF-CIH, La Motte Servolex, France

² EDF R&D LNHE, Chatou, France

³ CNR-CACOH, Lyon, France

⁴ HR Wallingford, Oxfordshire, UK

⁵ INRAE, Aix-en-Provence, France

Résumé – La prédiction de l'érosion par surverse des digues de protection contre les crues et des barrages en remblai constitue l'une des difficultés majeures dans l'analyse de la sûreté de ces ouvrages. Bien qu'identifié comme étant le mécanisme de rupture dominant de près de la moitié des ruptures de digues fluviales, les méthodes et outils dont disposent les ingénieurs pour le caractériser, de manière déterministe, restent encore très limités. Notamment, la caractérisation du processus d'érosion, en termes géométriques et temporels, prenant en compte le comportement des matériaux constitutifs du remblai et de sa fondation et les spécificités des sollicitations hydrauliques sur les digues, n'est encore à la portée d'aucun outil de modélisation numérique validé au niveau requis. Les ingénieurs doivent donc, pour l'instant, se contenter d'approches recourant largement à l'empirisme : critères dits «de jugement d'expert» ou formules empiriques. Ces approches très simplifiées sont connues pour présenter de fortes incertitudes et ne pas garantir des résultats systématiquement du côté de la sécurité. C'est dans le but final d'améliorer significativement la robustesse et la précision des outils de prédiction de l'érosion par surverse pour les ingénieurs, qu'EDF et CNR ont décidé de lancer le projet de recherche Overcome. L'objectif de ce projet est d'inclure au sein de la plateforme numérique open source TELEMAT-2D des modules représentant différents types de processus physiques en lien avec les ruptures par surverse de digues, basés sur une approche expérimentale multi-échelles très poussée. Cette communication présente les tous premiers résultats de l'un des premiers sujets investigués par ce projet : la description des mécanismes physiques d'érosion par surverse des remblais constitués de sol grossiers à granulométrie étalés. Ces sols sont présents dans une grande partie des digues situées en zones montagneuses ou dans les vallées situées juste en aval. Une première série d'essais de surverse à petite échelle a été menée au laboratoire de l'Université Polytechnique de Madrid, en réalisant des remblais homogènes de 55 cm de hauteur à partir de trois matériaux différents : un sable assez uniforme, un gravier de granite et un sol alluvionnaire à granulométrie étalée, issu du site CNR de Montfaucon. Si les essais avec le remblai en sable ont confirmé le mécanisme attendu d'érosion de surface, il a été assez surprenant de voir des différences significatives de mécanisme d'érosion entre les matériaux de Montfaucon et graviers de granite. Dans le matériau de Montfaucon, le mécanisme s'apparente à de l'érosion de surface, tandis qu'avec le gravier de granite, le mécanisme d'érosion débute avec du « Headcut migration » puis évolue à la fin en érosion de surface. Par ailleurs, le sol de Montfaucon s'est avéré quatre fois moins érodable que le gravier de granite. Ces premiers résultats appellent à être confirmés par des essais de répétabilité à petite échelle et des essais à plus grande échelle.

Mots clés : surverse / érosion externe / matériaux grossiers / modélisation / essais expérimentaux

Abstract – **The Overcome project: understanding and modelling overflowing erosion processes in levees and embankment dams constituted of gap-graded coarse materials.** 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 in almost half of all levee failures, the methods and tools available to engineers to characterize it deterministically are still very limited. In

* Auteur de correspondance : jean-robot.courivaud@edf.fr

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. For the time being, therefore, engineers have to make do with empirical approaches: so-called “expert judgement” criteria or empirical formulae. These highly simplified approaches are known for their high discrepancies and their inability to guarantee systematically conservative results. It was with the ultimate aim of significantly improving the robustness and accuracy of overflowing erosion prediction tools for engineers that EDF and CNR decided to launch the Overcome research project. The aim of this project is to include, within the TELEMAC-2D open-source digital platform, modules representing different types of physical processes associated with levee overflowing, based on a highly advanced multi-scale experimental approach. This paper presents the very first results of one of the first subjects investigated by this project: the description of the physical mechanisms of overflowing erosion of embankments constituted with coarse gap-graded soils. These soils are found in a large proportion of levees located in mountain areas or in valleys just downstream. An initial series of small-scale overflow tests was carried out in the laboratory of the Polytechnic University of Madrid, using homogeneous embankments 55cm high constituted with three different materials: fairly uniform sand, granite gravel and alluvial coarse gap-graded soil from the CNR site at Montfaucon. While the tests with the sand embankments confirmed the expected surface erosion mechanism, it was quite surprising to see significant differences in the erosion mechanism between the Montfaucon and granite gravels materials. In the Montfaucon material, the mechanism resembles surface erosion, whereas with the granite gravel, the erosion mechanism begins with “headcut migration” and then evolves into surface erosion. In addition, the Montfaucon soil proved to be four times less erodible than the granite gravel. These initial results need to be confirmed by additional small-scale repeatability tests and larger-scale tests.

Keywords: overflowing / external erosion / coarse materials / modelling / laboratory testing

1 Le contexte et la finalité du projet Overcome

La prédiction de l'érosion par surverse des digues de protection contre les crues et des barrages en remblai constitue l'une des difficultés majeures dans l'analyse de la sûreté de ces ouvrages. Bien que les processus de rupture incluent très souvent plusieurs mécanismes de défaillance agissant de manière concomitante (érosion, instabilité mécanique), l'érosion par surverse est identifiée comme étant le mécanisme de rupture dominant de près de la moitié des ruptures de digues fluviales. Cette même proportion se retrouve également pour les ouvrages en remblai classés comme des barrages : digues à charge permanente, remblais de canaux ou barrages réservoir.

Néanmoins, les méthodes et outils dont disposent les ingénieurs pour caractériser, de manière déterministe, l'érosion d'une digue fluviale soumise à un écoulement de surverse, restent encore très limités. La caractérisation du processus d'érosion, en termes géométriques et temporels, prenant en compte le comportement des matériaux constitutifs du remblai et de sa fondation et les spécificités des sollicitations hydrauliques sur les digues, n'est encore à la portée d'aucun outil de modélisation numérique validé au niveau requis (*i.e.*, validé avec des données de cas réels de rupture ou d'essais à grande échelle). Les ingénieurs doivent donc, pour l'instant, se contenter d'approches recourant largement à l'empirisme : critères dits « de jugement d'expert » ou formules empiriques basées sur des régressions linéaires établies à partir de jeux de données de ruptures. Ces approches très simplifiées sont connues pour présenter de fortes incertitudes et ne pas garantir des résultats systématiquement du côté de la sécurité. Toutefois, elles restent largement utilisées par la profession, faute de mieux et aussi du fait de la rareté des données « de

terrain » (*i.e.* données de ruptures de digues) qui permettraient de mieux les évaluer et d'améliorer progressivement leur capacité prédictive.

C'est dans le but final d'améliorer significativement la robustesse et la précision des outils de prédiction de l'érosion par surverse pour les ingénieurs, qu'EDF et CNR ont décidé d'unir leurs moyens, en lançant le projet de recherche Overcome. L'objectif de ce projet est d'inclure au sein de la plateforme numérique open source TELEMAC-2D des modules représentant différents types de processus physiques en lien avec les ruptures par surverse de digues, basés sur une approche expérimentale multi-échelles très poussée. En complément de leurs propres moyens de recherche et d'essais, EDF et CNR s'appuient, dans le cadre de ce projet, sur le laboratoire d'HR Wallingford, l'Université Polytechnique de Madrid (UPM) et l'INRAE.

2 L'état de l'art actuel, les besoins des ingénieurs et les besoins de recherche

L'objectif principal des ingénieurs vis-à-vis du risque d'érosion par surverse des digues est de prédire l'évolution du débit qui franchit la digue au cours du temps. Ce débit est très lié, notamment, à l'évolution de la géométrie de la digue au cours du temps, cette évolution géométrique étant elle-même gouvernée par la perte de matériau constitutif du corps de digue et éventuellement de sa fondation. De manière générale, cette perte de matériau peut résulter de différents mécanismes de défaillance, qui peuvent agir de manière concomitante ou séquentielle et qui sont l'érosion externe, l'érosion interne et l'instabilité mécanique. Toutefois, l'ensemble de ces mécanismes de défaillance n'est pas systématiquement mobilisé dans tous les cas de rupture.

La description la plus commune du mécanisme de rupture d'une digue subissant une surverse est représentée par l'enchaînement des étapes suivantes :

- érosion de la couche de protection du talus de digue côté val et de la crête, initiée au niveau d'une zone de plus faible altitude de la crête de digue et/ou de singularités sur le talus côté val (point de moindre densité de la couverture herbeuse, zone de concentration de l'écoulement de surverse, trou d'animal fouisseur,...) ;
- formation d'une brèche par érosion du corps de remblai, s'approfondissant jusqu'à sa base, sur une longueur dans l'axe de la digue de quelques mètres à la dizaine de mètres en général ;
- élargissement latéral de la brèche (selon l'axe de la digue) associé très fréquemment à une érosion dans la fondation (appelée fosse d'érosion). Cet élargissement a la particularité, dans le cas des digues de protection contre les inondations, d'être dissymétrique : l'érosion latérale se développe beaucoup plus sur le bord aval (dans le sens de l'écoulement) de la brèche que sur le bord amont. La fin de cette dernière étape d'élargissement latéral de la brèche et d'approfondissement d'une fosse d'érosion est gouvernée par les niveaux d'eau côté rivière et côté val : le processus d'érosion s'arrête lorsque les contraintes de cisaillement exercées par l'eau sur la digue ou sa fondation sont rendues suffisamment faibles par la diminution de la dénivelée entre les niveaux d'eau côté rivière et côté val.

La première étape d'érosion de la couche de protection du talus de digue côté val est très difficile à prédire car elle dépend généralement de singularités très localisées et d'emprises spatiales très limitées, qui sont, par nature, difficiles à identifier au sein de grandes surfaces de parement. Hormis les variations d'altitude de la crête de digue, qui sont facilement identifiables par des levés topographiques, les singularités de parement, ne le sont que par les examens visuels, et leur détection reste très aléatoire. De nombreux travaux de recherche ont déjà été menés sur la résistance de couvertures herbeuses de digues à la surverse (CIRIA, 2013) et certains projets très récents (projet Polder2C notamment) ont permis d'approfondir encore les connaissances sur ce sujet. Les résultats de certains de ces travaux ont été pris en compte dans des logiciels de calcul de l'érosion par surverse (code WinDAM par exemple), mais ces logiciels ne sont pas encore adaptés à la spécificité des sollicitations hydrauliques rencontrées sur les digues. La prise en compte, dans une démarche de modélisation déterministe, des différents types de singularités, qui peuvent générer l'initiation de l'érosion de la couche de protection d'une digue soumise à une surverse, n'est pas encore disponible pour la profession.

La seconde étape de formation de la brèche dans le corps du remblai dépend très fortement de la nature des matériaux constitutifs du remblai et des conditions hydrauliques côté rivière et côté val. Le moteur du processus de formation de brèche est le gradient hydraulique entre le talus côté rivière et le talus côté val de la digue (et non pas la hauteur de surverse). La nature des matériaux constitutifs du corps de remblai va, elle, gouverner le type de mécanisme d'érosion par surverse. Depuis le début des années 2000, deux types de mécanismes d'érosion par surverse ont été décrits suite à des travaux expérimentaux (Courivaud *et al.*, 2019) :

- le mécanisme appelé en anglais « Headcut migration », qui s'applique dans les sols fins cohésifs (argiles et limons), et qui est décrit par une érosion formant des marches d'escalier et de petites chutes d'eau sur le parement côté val et progressant à travers le remblai vers le talus côté rivière en formant des marches d'escalier et des chutes d'eau de plus en plus hautes, jusqu'à atteindre l'arête côté rivière de la crête de digue, puis attaquant le talus côté rivière de la digue, jusqu'à former une brèche dans une section complète du remblai. Ce mécanisme a été décrit à l'aide d'essais à grande échelle, réalisés au laboratoire de l'USDA/ARS/HERU de Stillwater (Oklahoma, USA). Ces travaux ont conduit au développement de l'essai de Jet Erosion Test (JET), qui permet de caractériser la résistance à ce type d'érosion des sols fins cohésifs, ainsi qu'au développement d'un modèle numérique (code WinDAM) qui représente l'érosion par surverse d'un barrage réservoir homogène constitué de matériaux fins. Ce code WinDAM a fait l'objet d'une validation approfondie (CEATI-DSIG, 2017) sur des cas réels de rupture de barrages réservoir et des essais à grande échelle, mais il n'est pas applicable aux digues, car il ne représente pas les spécificités de leurs sollicitations hydrauliques (dissymétrie de l'élargissement de la brèche), ni les spécificités de leurs processus d'érosion (création d'une fosse d'érosion) ;
- le mécanisme d'érosion de surface, qui s'applique dans les sables assez uniformes, et qui est décrit par une érosion selon des plans subhorizontaux, qui écrête progressivement le remblai, jusqu'à atteindre la base de la digue. Ce mécanisme d'érosion de surface a été décrit par de nombreux travaux expérimentaux, menés en laboratoire à petite échelle. Il n'a cependant pas été confirmé par des essais à grande échelle, ni sur des cas réels de rupture d'ouvrages en remblai (barrages ou digues). Contrairement au mécanisme de Headcut Migration, le mécanisme d'érosion de surface n'a pas fait l'objet de travaux conduisant à une caractérisation de la résistance à l'érosion des sols qui peuvent générer ce processus, ni à une modélisation numérique validée de manière approfondie sur des essais à grande échelle et des cas réels de rupture.

Ces deux mécanismes sont illustrés sur la [Figure 1](#). Pour les remblais constitués de matériaux alluvionnaires grossiers, à granulométrie étalée, ce qui est notamment le cas des digues situées dans les vallées des zones de montagne ou à l'aval de ces secteurs montagneux, le ou les mécanisme(s) de formation de brèche par surverse n'ont toujours pas été décrits dans la littérature scientifique. Mécanisme de « Headcut migration » ? d'érosion de surface ? ou autre mécanisme ? La description des mécanismes physiques pour les sols grossiers à granulométrie étalée, qui est à la base de tout travail de modélisation, reste à faire.

La troisième étape d'élargissement latéral de la brèche (dans l'axe de la digue) et de formation d'une fosse d'érosion dans la fondation, n'a fait l'objet pour l'instant que de travaux expérimentaux de recherche limités à de petites échelles pour l'influence de la dissymétrie (Rifai *et al.*, 2020), et aucun travail n'a été identifié sur la fosse d'érosion. Pour les digues fluviales, la profession ne dispose encore d'aucun modèle numérique validé pour représenter ces mécanismes, quel que soit le type de matériau constitutif du corps de remblai.

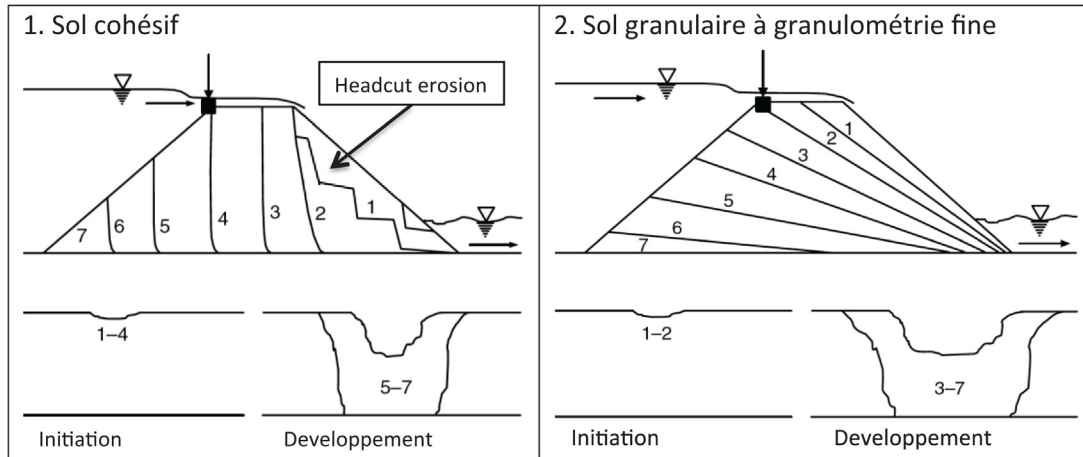


Fig. 1. Illustration des mécanismes d'érosion par surverse par « Headcut Migration » (à gauche) et par érosion de surface (à droite).
Fig. 1. Illustration of headcut migration (left) and surface erosion (right) mechanisms.

Ce résumé rapide de l'état de l'art met donc en évidence les nombreux besoins de recherche pour répondre aux besoins pratiques de la profession : disposer d'outils simples à utiliser, représentant des mécanismes physiques bien décrits à l'aide de travaux expérimentaux approfondis et validés à partir de données d'essais à grande échelle et de cas réels de rupture. Ces besoins de recherche couvrent principalement les sujets suivants :

- description des mécanismes de formation de brèche : déterminer les frontières, en termes de types de matériaux et de sollicitation hydraulique, entre les mécanismes de « Headcut migration » et d'érosion de surface. Décrire les mécanismes de formation de brèche dans les remblais constitués de matériaux grossiers à granulométrie étalée et situer ces mécanismes par rapport aux frontières des mécanismes Headcut Migration et érosion de surface. Modéliser le mécanisme d'érosion de surface, ce qui signifie valider une loi d'érosion et définir comment les paramètres de résistance à l'érosion utilisés dans cette loi sont mesurés. Modéliser le(s) mécanisme(s) de formation de brèche décrit(s) pour les sols grossiers à granulométrie étalée (avec le même besoin de valider une loi d'érosion et de définir comment les paramètres de résistance à l'érosion utilisés dans cette loi peuvent être mesurés) ;
- modélisation de la dissymétrie de la brèche dans la phase d'élargissement de brèche des digues fluviales ;
- description et modélisation du mécanisme de formation d'une fosse d'érosion ;
- intégration des résultats les plus récents sur l'érosion de la couche de protection du parement côté val dans un code représentant la globalité du mécanisme de rupture par surverse d'une digue.

Le projet Overcome a pour finalité de traiter l'ensemble de ces questions. Mais étant donné l'ampleur des moyens et des délais nécessaires, ces différents objectifs de recherche ont dû être priorisés. Les sujets traités en priorité, mais qui nécessitent néanmoins un effort continu pendant plusieurs années, sont la description des mécanismes de formation de brèche, et en

particulier ceux liés aux sols grossiers à granulométrie étalée, et la modélisation de la dissymétrie de la brèche en phase d'élargissement.

3 L'architecture générale du projet Overcome

Le projet Overcome est structuré selon trois grands axes, qui sont présentés dans le [Tableau 1](#) ci-dessous.

La suite de cette communication présente les premiers résultats du programme d'essais à petite échelle, mené au laboratoire de l'UPM, pour la description des mécanismes de formation de brèche dans les remblais constitués de matériaux grossiers à granulométrie étalée.

4 Programme d'essais de laboratoire à petite échelle et premiers résultats

4.1 Présentation de la démarche expérimentale générale

L'analyse descriptive des mécanismes d'érosion par surverse de remblais constitués de matériaux grossiers à granulométrie étalée a débuté par un programme d'essais expérimentaux à petite échelle, qui s'inscrit dans un programme plus vaste d'essais expérimentaux multi-échelles. Etant donné que les sols considérés sont généralement des alluvions constituées majoritairement de sables, graviers et blocs, avec une fraction fine ($< 80 \mu\text{m}$) faible, comprise entre 0 et 10 %, mais dont l'influence est non négligeable, il n'était pas envisageable de réaliser ces essais à l'échelle, dans le sens hydraulique du terme, en conservant un nombre adimensionnel comme le nombre de Froude. Il a donc été choisi de réaliser ces essais en prenant toujours les mêmes matériaux sans écrêtement, tels qu'on peut les trouver sur les ouvrages réels. Le principe de l'approche multi-échelles est de réaliser des essais sur des ouvrages de dimensions différentes (petite,

Tableau 1. Architecture générale du projet Overcome.
Table 1. General architecture of the Overcome project.

Axe 1 : Description des mécanismes de formation de brèche	Axe 2 : Étude expérimentale de la dissymétrie de l'élargissement de brèche	Axe 3 : Modélisation numérique et intégration dans TELEMAC-2D
<p>Approche expérimentale multi-échelles :- essais en laboratoire à petite échelle (laboratoire UPM). $H_{\text{digue}} = 55 \text{ cm}$- essais en laboratoire à moyenne échelle (laboratoire UPM). $H_{\text{digue}} = 1 \text{ m}$- essais en laboratoire à grande échelle (laboratoire CNR). $H_{\text{digue}} = 2,3 \text{ m}$- essais expérimentaux à grande échelle en site ouvert (site de Laverné, Espagne). $H_{\text{digue}} = 2,5 \text{ m}$- essais expérimentaux à grande échelle sur ouvrage réel (digue CNR de Montfaucon)</p>	<p>Approche expérimentale :- essais en laboratoire à petite échelle (laboratoire EDF-LNHE)</p>	<p>- Intégration de la modélisation WinDAM dans TELEMAC-2D- Développement d'une modélisation numérique de la formation de brèche dans un remblai constitué de matériaux grossiers à granulométrie étalée, basée sur les résultats de l'axe 1 puis intégration de cette modélisation numérique dans TELEMAC-2D- Développement d'une modélisation numérique de l'élargissement de brèche dans les digues, représentant la dissymétrie de l'élargissement, basée sur les résultats de l'axe 2 et intégration de cette modélisation numérique dans TELEMAC 2D</p>

Tableau 2. Géométrie des remblais à petite échelle.
Table 2. Small-scale embankment geometry.

Hauteur du remblai	0,55 m
Longueur du remblai	1,25 m
Largeur à la base	2,4 m
Largeur en crête	0,2 m
Fruit amont et fruit aval	2/1
Longueur de l'encoche	0,64 m
Hauteur de l'encoche	0,07 m

moyenne grande, cf. Tab. 1 ci-dessus), constitués des mêmes matériaux et de vérifier si les processus observés sont les mêmes aux différentes dimensions ou s'il y a des écarts, ce dernier cas signifiant une influence de la dimension de l'essai sur les mécanismes observés. La complémentarité des différentes dimensions d'essais est mise à profit : les essais à petite échelle, moins coûteux, peuvent être réalisés en plus grand nombre pour réaliser des tests paramétriques, tandis que les essais à grande échelle, très coûteux, sont réalisés en nombre limité, et sont destinés à confirmer la description des mécanismes observés à plus petite échelle et à fournir des données de validation pour les modélisations numériques.

4.2 Première série d'essais expérimentaux à petite échelle : conditions des essais

La première série d'essais expérimentaux à petite échelle a consisté à soumettre à un écoulement de surverse des remblais homogènes de section trapézoïdale dont la géométrie est représentée dans le Tableau 2. Une encoche a été réalisée dans la crête, afin de guider l'initiation du processus d'érosion au centre du remblai.

Les remblais ont été constitués de trois sols différents : un sable homogène (Cu compris entre 5 et 8), des graviers de granite concassé, et un matériau alluvionnaire venant du site CNR de Montfaucon, ce dernier matériau étant bien représentatif des matériaux grossiers à granulométrie étalée rencontrés sur un grand nombre de digues françaises. Les courbes granulométriques de ces trois matériaux sont présentées sur la Figure 2 (sable : Sand SSLT5 et Sand SSLT7, graviers de granite : Granite SSLT4 et Granite SSLT6, matériau alluvionnaire de Montfaucon : Montf. SSLT8 et Montf. SSLT9).

Les remblais ont été construits par couches de 10 cm d'épaisseur avant compactage. Tous les remblais ont été compactés avec la même énergie de compactage, le sol étant mis en place avec sa teneur en eau naturelle. Cette teneur en eau a été mesurée durant toute la phase de montée des remblais. Les densités des remblais ont été déterminées à partir de ces mesures de teneur en eau et de courbes, établies pour chaque sol, donnant la densité en fonction de la teneur en eau, elles-mêmes établies à partir de tests spécifiques. Les densités obtenues sont comprises entre 90 % et 97 % de l'OPN. Les densités et teneurs en eau mesurées pour les trois sols sont présentées dans le Tableau 3.

Chacun des trois sols utilisés a fait l'objet d'une identification géotechnique complète. Il est également prévu, mais pas encore réalisé, d'effectuer une caractérisation de leur résistance mécanique à l'aide d'essais triaxiaux (en utilisant des cellules triaxiales de diamètre 300 mm pour le gravier de granite et le sol de Montfaucon), ainsi qu'une caractérisation de leur résistance à l'érosion par surverse, à l'aide d'essais LJET (Large Jet Erosion Test).

L'étanchéité des remblais a été assurée par un masque mince sur le parement amont. La difficulté était de trouver un matériau à la fois suffisamment étanche pour éviter que des percolations importantes à travers le remblai viennent perturber les essais et assez friable pour ne pas perturber l'écoulement de surverse à la limite entre ce revêtement et le

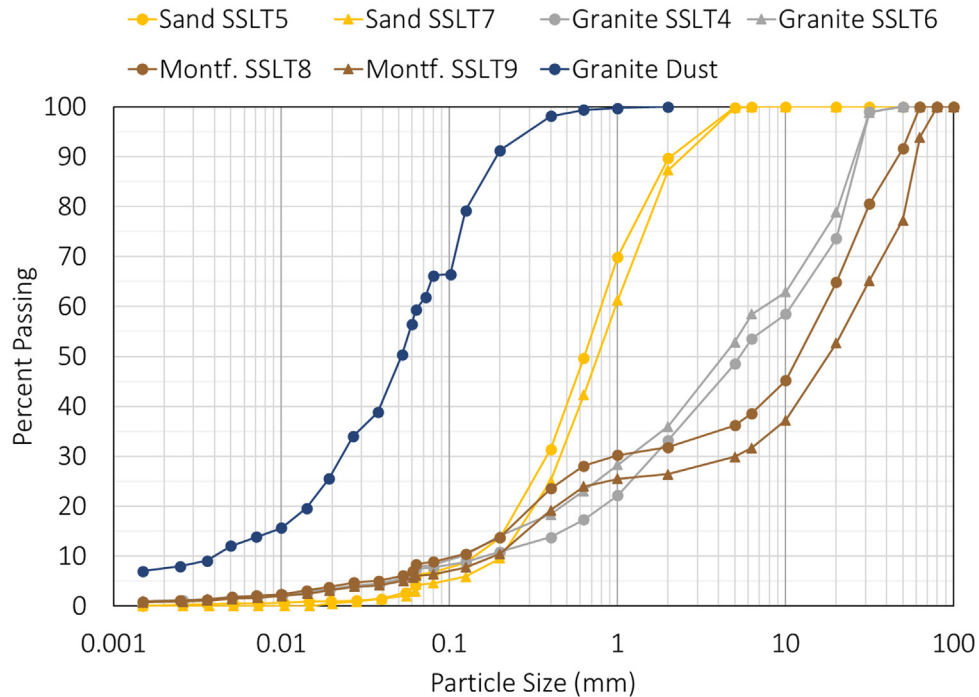


Fig. 2. Granulométrie des matériaux utilisés pour construire les remblais à petite échelle.
Fig. 2. Grain size of materials used to build small-scale embankments.

Tableau 3. Densités et teneurs en eau des sols utilisés.
Table 3. Densities and water contents of the soils used.

Sol	Densité (kg/m ³)	Teneur en eau (%)
Sable	1,76	14,1
Gravier de granite	2,10	7,8
Sol de Montfaucon	2,13	6,8

matériau de remblai situé juste en aval. Après plusieurs essais, la solution qui a donné satisfaction est une fine couche de poussière de granite appliquée sur tout le parement amont (la granulométrie de ce matériau est représentée par la courbe « Granite dust » sur la Figure 2).

Tous les essais ont été effectués à débit entrant constant, ce débit étant compris entre 1,7 L/s et 11,3 L/s. L'instrumentation comprenait des mesures de niveau d'eau amont et un système de mesures photogrammétriques à l'aide de six appareils photos disposés selon deux profils longitudinaux (dans le sens de l'axe du remblai). Les mesures photogrammétriques avaient pour objectif de suivre l'évolution de la géométrie du remblai au cours du processus d'érosion. Bien que produisant des fluctuations significatives dans la détection de l'interface eau/sol, ces mesures photogrammétriques se sont avérées utiles. Un système potentiellement plus performant, basé sur des mesures Lidar, sera évalué prochainement pour la suite des essais.

4.3 Première série d'essais expérimentaux à petite échelle : premiers résultats

Les essais effectués avec le remblai en sable confirment le mécanisme d'érosion de surface dans ce type de matériau (Fig. 3). Alors que les matériaux de Montfaucon et graviers de granite présentent des courbes granulométriques assez proches, leurs profils d'érosion semblent assez différents : pour le gravier de granite, le mécanisme s'apparente au début à celui d'un Headcut, puis évolue à la fin vers une érosion de surface (Fig. 3). Pour le matériau de Montfaucon, c'est le mécanisme d'érosion de surface qui semble dominer durant tout l'essai (Fig. 4). Par ailleurs, le matériau de Montfaucon s'est avéré être quatre fois moins érodable que le gravier de granite. L'explication de cette différence d'érodabilité reste à trouver. Ces premiers résultats appellent à être confirmés par des essais de répétabilité à petite échelle ainsi que par des essais à moyenne et grande échelle.

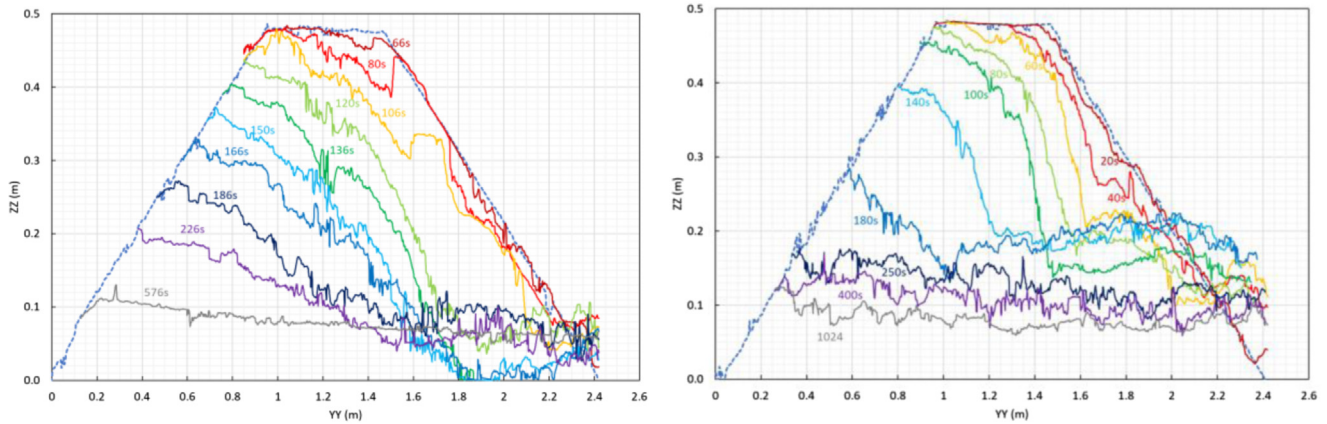
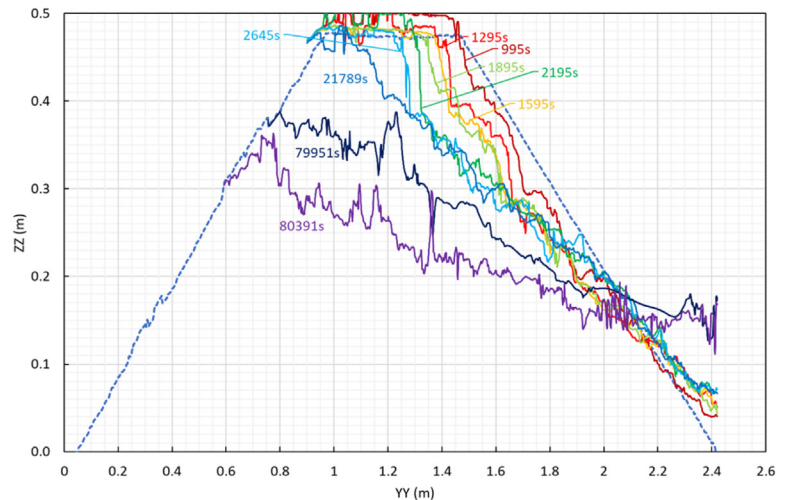


Fig. 3. Profils d'érosion du remblai en sable (gauche) et du remblai en graviers de granite (droite).
Fig. 3. Erosion profiles of sand fill (left) and granite gravel fill (right).



Fig. 4. Essai de surverse du remblai en matériau de Montfaucon.
Fig. 4. Overflow test on the Montfaucon embankment.



5 Conclusion

Le programme du projet Overcome a débuté par l'étude des remblais constitués de matériaux grossiers à granulométrie étalée. Les premiers résultats d'essais de laboratoire à petite échelle ont été présentés. Ils seront suivis d'autres essais et de modélisations numériques avec comme finalité la mise à disposition de la profession d'outils validés pour prédire l'érosion par surverse des digues.

Références

- CEATI-DSIG. 2017. Evaluation of numerical models for simulating embankment dam erosion and breach processes. Dam Safety Rep No. DSO-2017-02. Denver (Colorado): US Dept. of the Interior, Bur of Reclamation. London: CIRIA.
- CIRIA. 2013. The International Levee Handbook.
- Courivaud JR, Deroo L, Bonelli S. 2019. Érosion externe des barrages et des digues, *Colloque CFBR : «Justification des barrages : État de l'art et Perspectives»*. Chambéry (France): Édition CFBR, 14 p.
- Rifai I, El Kadi Abderrezzak K, Hager WH, *et al.* 2020. Apparent cohesion effects on overtopping-induced fluvial dike breaching. *J Hydraul Res* 59: 75–87. doi: [10.1080/00221686.2020.1714760](https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1714760).

Citation de l'article : Jean-Robert Courivaud, Laurent del Gatto, Kamal El Kadi Abderrezzak, Christophe Picault, Mark Morris, Stéphane Bonelli. 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. Rev. Fr. Geotech. 2024, 178, 6.