

Évaluation de l'érodabilité de la rehausse fusible d'un déversoir de la Loire moyenne par essais d'érosion à jets mobiles

Erodibility assessment of one spillway's earthen fuseplug in the middle Loire using mobile jets erosion tests

L. Saussaye¹, C. Chevalier², S. Patouillard³, E. Durand⁴, B. Bridoux⁴

¹ Cerema, équipe de recherche ENDSUM, Blois, France, lucile.saussaye@cerema.fr

² GERS-SRO, Université Gustave Eiffel, Champs-sur-Marne, France, christophe.chevalier@univ-eiffel.fr

³ DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France, sebastien.patouillard@developpement-durable.gouv.fr

⁴ Cerema, Blois, France

Résumé

Les systèmes d'endiguement de la Loire moyenne sont équipés de déversoirs, mis en place suite aux grandes crues du XIX^e siècle. Ce sont des structures particulières permettant de contrôler l'entrée de l'eau dans la zone protégée lors des crues et limiter la charge sur les ouvrages plus à l'aval. En ce sens, ce sont des structures clé de la stratégie de lutte contre les inondations. Certains déversoirs sont équipés d'une rehausse ou « banquette fusible » en terre dont l'objet est de retarder le déclenchement de l'entrée d'eau jusqu'à produire un effet de chasse qui permettrait d'écrêter la crue. Le diagnostic d'un déversoir de ce type inclut le diagnostic de la rehausse, initialement fusible. Dans le cadre du diagnostic de 3 déversoirs sur 2 systèmes d'endiguement de la Loire moyenne, à Jargeau, Montlivault et Blois (déversoir de la Bouillie), la sensibilité à l'érosion in situ de leur rehausse est évaluée avec des essais de type Mobile Jets Erosion Test (MoJET), qui permettent de tester le sol en place avec la possibilité de répéter l'essai. L'appareil MoJET se compose notamment d'une partie mécanique active, l'unité d'érosion, équipée de 6 buses projetant des jets d'eau de 0,5 mm de diamètre perpendiculairement à la surface du sol. Ces 6 jets d'eau tournent pendant l'essai. L'effluent chargé de sol érodé est recueilli à différents pas de temps pendant les 12 minutes que dure l'essai. La masse de sol sec, c'est-à-dire la masse de sol érodée, en fonction du temps est utilisée pour évaluer qualitativement l'érosion. Dans cet article, les essais effectués pour vérifier la fusibilité réelle de la rehausse du déversoir de Jargeau sont présentés. Les essais MoJET sont réalisés sur plusieurs profils et à différentes profondeurs afin d'analyser la variabilité des résultats obtenus. Les résultats sont analysés au regard des caractéristiques physiques des sols (teneur en eau, analyse granulométrique et valeur au bleu du sol) et de leur compacité, évaluée par des mesures de densité in situ au densitomètre à membrane et/ou par des sondages au pénétromètre dynamique léger. La présence d'une couche de terre végétale, herbacée, sur le fusible, limite l'érodabilité des matériaux meubles qui le constituent (érosion externe). Sous cette surface végétalisée, la rehausse est plus ou moins érodable en fonction de la profondeur (érosion interne), amenant une réflexion sur son efficacité et sur le maintien des conditions de fusibilité de ce composant particulier des déversoirs.

Mots-clés

déversoir, rehausse, fusible, érodabilité, essai MoJET

Abstract

The levees systems of the Middle Loire are equipped with spillways, installed following the major floods of the 19th century. These structures are designed to control the entry of water into the protected area during floods and limit the load on downstream structures. Some spillways are equipped with an earthen "fuseplug", to delay the onset of water inflow until a flushing effect is produced. Diagnosis of a spillway includes diagnosis of the earthen fuseplug. As part of the diagnosis of 3 spillways on 2 dike systems of the Middle Loire, at Jargeau, Montlivault and Blois (Bouillie spillway), the sensitivity of their spillway to in situ erosion is assessed using Mobile Jets Erosion Test (MoJET). The MoJET apparatus comprises an active mechanical part, the erosion unit, equipped with 6 nozzles projecting jets of water 0.5 mm in diameter perpendicular to the surface of the soil. These 6 water jets rotate during the test. The effluent loaded with eroded soil is collected at different time steps during the 12-minute test. The mass of dry soil, *i.e.* the mass of eroded soil, as a function of time is used to qualitatively assess erosion. In this article, the tests carried out to verify the actual fusibility of the bank of the Jargeau spillway are presented. The MoJET tests were carried out on several profiles and at different depths in order to analyse the variability of the results obtained. The results are analysed in terms of the physical characteristics of the soils (moisture content, particle size distribution, and soil methylene blue value) and their compactness, assessed by in situ density measurements using a membrane densitometer and/or a light dynamic penetrometer. The presence of a layer of herbaceous topsoil on the fuseplug limits the erodibility of the loose materials which it is made of (external erosion). Under this vegetated surface, the fuseplug is more or less erodible depending on the depth (internal erosion), leading us to reflect on its effectiveness and on maintaining the conditions of collapsibility of this particular component of the spillways.

Key Words

spillway, bank, fuseplug, erodibility, MoJET

Introduction

Les levées¹ de la Loire ont une origine très ancienne et de nombreuses crues ont submergé ces levées, provoqué des brèches et affecté les habitants des vals depuis au moins le XII^e siècle. Leur histoire est liée à celle des déversoirs telle qu'elle est relatée dans un article relatif aux déchargeoirs, déversoirs et à la gestion des surverses [1]. Après chaque événement générant des ruptures, la tendance a été de reconstruire en relevant le niveau des levées au-dessus de celui de la dernière crue ; cette tendance historique est d'ailleurs également constatée sur de nombreux cours d'eau d'Europe et du reste du monde. Avec le resserrement du lit au niveau des ponts, les villes se sont trouvées très vulnérables aux inondations et aux surverses au-dessus des digues. C'est ainsi que les constructeurs de la fin du XVI^e siècle ont imaginé de dériver les eaux du fleuve en amont des villes pour contourner les zones urbanisées. Le déchargeoir de la Bouillie à Blois a été conçu dans ce contexte en 1584. Compte tenu de son efficacité, l'ouvrage a été conservé, agrandi et amélioré au cours des siècles avec notamment la mise en place d'une rehausse souhaitée par les riverains pour retarder l'entrée d'eau dans le val. En 1867 et à la suite des trois grandes crues de la fin du XIX^e siècle sur la Loire, l'ingénieur Comoy va diriger un programme de construction de nouveaux déversoirs sur l'ensemble du val de Loire. Sur les 19 déversoirs programmés, 8 seront réalisés dont les déversoirs de Jargeau et de Montlivault. Ces déversoirs sont des ouvrages en maçonnerie de grande taille souvent munis de fusibles. Le fusible est une rehausse au-dessus du déversoir qui permet de contenir l'écoulement dans le lit mineur et qui, ensuite, cède lorsque le niveau d'eau dépasse son sommet. Par rapport à un déversoir à seuil fixe, cela permet au moment du déversement d'avoir une section d'écoulement plus importante (effet de chasse) et ainsi d'écarter la crue.

Déversoir de Jargeau

Le déversoir de Jargeau est situé en rive gauche de la Loire, en amont d'Orléans. Il a été construit entre 1878 et 1882. Il s'étend sur 715 m de long.

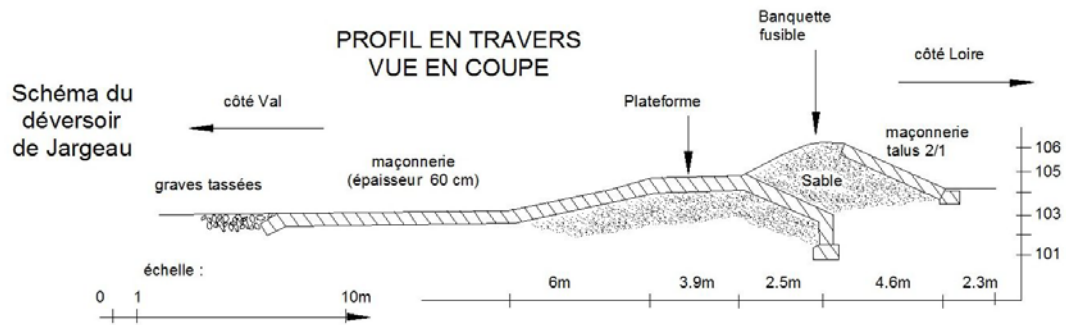
Dans son principe de fonctionnement, pour que le déversement des eaux de la Loire dans le val ne se fasse qu'au moment où le niveau d'eau est déjà important et qu'un important volume soit substitué rapidement, le déversoir est équipé, sur 575 m, d'une rehausse en terre d'environ 1,70 m, dite fusible (Figure 1). Cette rehausse doit en effet, sous l'action de la lame d'eau déversante, s'éroder et s'effacer. Cette rehausse est constituée d'un matériau sableux et équipée d'un perré en pierres non jointoyées côté Loire. Depuis sa construction, un tapis végétal s'est développé en surface et les matériaux ont évolué depuis leur mise en place. Pour cette raison, la capacité d'érosion de la rehausse doit être ré-évaluée.

¹ levée = digue de protection contre les crues. Dénomination locale dans le contexte ligérien, qui a donné naissance au terme anglais *levee*, utilisé aux États-Unis (depuis la Louisiane) et désormais dans un contexte international (cf. International Levee Handbook).

(a)



(b)



(c)

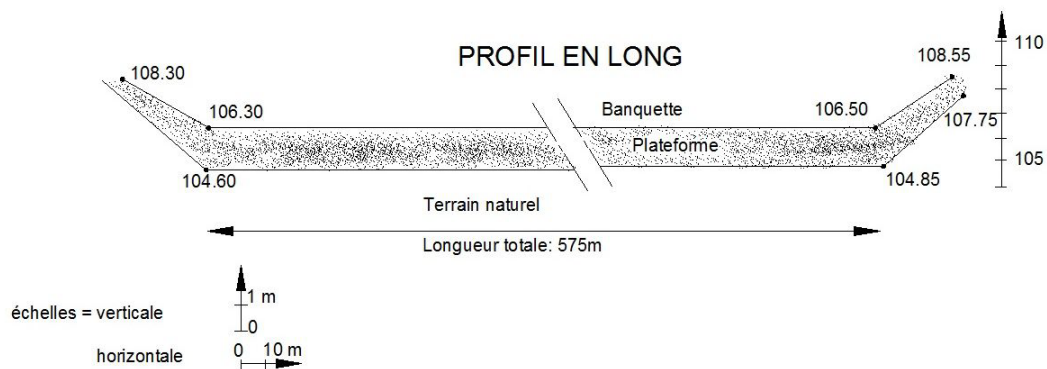


FIGURE 1. Vue du déversoir vers l'amont (a), profil en travers (b) et profil en long (c) du déversoir de Jargeau.

1. Matériels et méthodes

Essais de caractérisation des sols in situ

Le diagnostic de la rehausse du déversoir de Jargeau a consisté en la réalisation de sondages implantés selon des profils en travers :

- sondages à la tarière manuelle (TAM) afin d'identifier la nature des matériaux traversés et de procéder aux prélèvements d'échantillons pour la réalisation d'essais en laboratoire ;
- sondages au pénétromètre dynamique léger de type PANDA (SPd) afin d'évaluer les caractéristiques mécaniques des terrains constituant le fusible (selon la norme NF EN 22476-2) ;
- mesures de densité in situ des sols de surface au densitomètre à membrane (d) (selon la norme NF P94-061-2).

Essais de caractérisation physique des sols en laboratoires

Les essais d'identification des sols constitutifs de la rehausse comprennent :

- la détermination de la teneur en eau naturelle w_n (selon la norme NF P94-050) ;
- une analyse granulométrique par tamisage (selon la norme NF P94-057) ;
- une détermination de la valeur au bleu du sol (VBS) (selon la norme NF P94-068).

Essai d'érodabilité à l'érodimètre à jets mobiles (essai MoJET)

L'érodimètre à jets mobiles MoJET (pour "Mobile Jets Erosion Test") [2] est constitué :

- d'une partie mécanique active, appelée érodeur, initialement élaborée par Hénensal et Duchatel [3] (Figure 2a) ;
- d'un dispositif d'alimentation en eau à débit contrôlé et de différents organes de service (Figure 3).

Comme représenté à la Figure 2a, l'eau utilisée transite par la partie supérieure de l'érodeur pour sortir par six buses ou gicleurs. Ces derniers, qui ont un diamètre de 0,5 mm, sont portés par un bras mobile, en rotation à vitesse constante. Cette rotation s'effectue dans une chambre circulaire de diamètre 15,2 cm appelée chambre d'érosion. L'ensemble est déposé sur une trousse coupante équipée d'un bac récupérateur pour être utilisé pendant l'essai. Lors de l'essai, l'érodeur projette six jets d'eau de caractéristiques semblables et perpendiculairement au sol ou à l'échantillon de sol dont on veut mesurer la sensibilité à l'érosion. Le sol n'est pas totalement submergé. Il s'agit d'un essai non destructif et peu invasif pour la surface testée. La Figure 2b illustre l'état de la surface du sol avant et après essai.

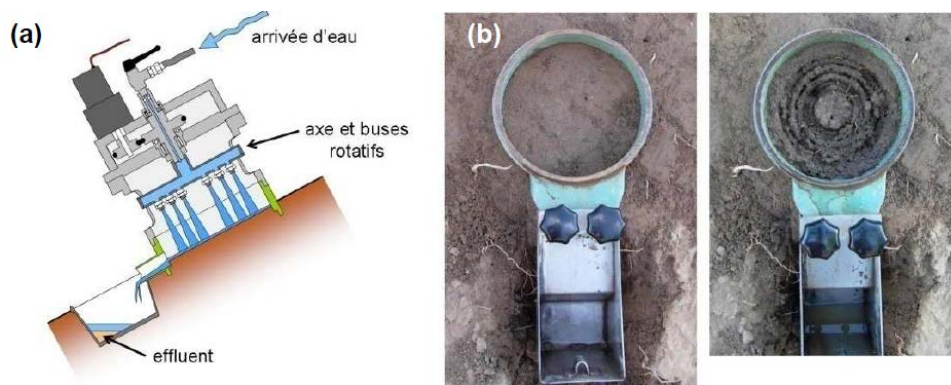


FIGURE 2. Essai MoJET : (a) schéma et positionnement de l'érodeur, (b) photos d'un sol testé avant et après essai.



FIGURE 3. Dispositif global de l'essai MoJET.

La première étape du protocole d'essai est de préparer le sol (notamment en enlevant des agrégats) afin d'obtenir une surface plane. Une trousse coupante est enfoncée de manière à isoler la zone testée et de placer le récipient de recueil. L'angle d'inclinaison est mesuré et l'érodeur est ensuite placé sur la trousse coupante puis connecté à la pompe et au réservoir d'eau.

Le sol est alors soumis à l'action des jets avec les paramètres d'essai suivants :

- débit d'eau constant d'environ 600 mL/min (maintenu à l'aide d'une pompe) ;
- durée de l'essai de 12 minutes avec recueils intermédiaires des effluents chargés à 1, 2, 4, 6, 8, 10 et 12 minutes.

L'effluent est passé à l'étuve pour déterminer la masse sèche de matériau érodé par l'érodimètre. Cette charge solide sert à caractériser l'érosion, la masse totale érodée étant mesurée au cours du temps. Une autre courbe caractéristique est obtenue en considérant le taux d'érosion moyen obtenu en divisant la masse sèche érodée à chaque intervalle de temps par la durée de ce dernier.

Afin de diagnostiquer la rehausse du déversoir de Jargeau, il a été effectué une campagne de sondages géotechniques à partir de 10 profils avec la réalisation d'essais MoJET aux profils notés P3 et P7 (14 essais au total incluant deux essais de répétabilité par profondeur).

2. Résultats

Identification des sols de la rehausse

La rehausse du déversoir est constituée d'un matériau sableux, classé B5 selon la norme NF P11-300, avec une fraction fine comprise entre 15 et 23 %, voire B2 lorsque celui-ci présente quelques cailloutis (TAM2, de 1,30 à 1,45 m). Au niveau des profils P3 et P7, les sols sont classés B5, avec une fraction fine comprise entre 18,8 et 22,6 % (Figure 4, Figure 5).

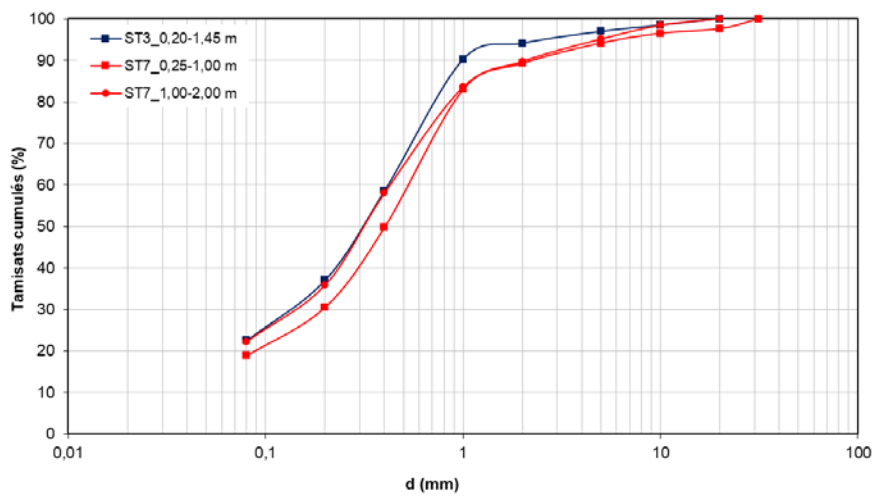


FIGURE 4. Courbes granulométriques des matériaux constitutifs de la rehausse aux profils étudiés.

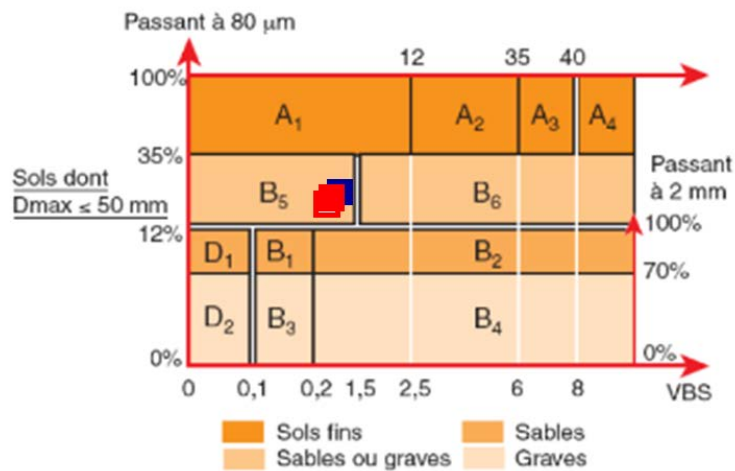


FIGURE 5. Classification des matériaux constitutifs de la rehausse aux profils étudiés.

Globalement, il est possible de distinguer 3 couches de résistances croissantes avec la profondeur, de 0,60 à 0,70 m d'épaisseur (Tableau 1).

TABLEAU 1. Caractéristiques pénétrométriques retenues pour les matériaux constitutifs de la rehausse.

Lithologie	Profondeurs (m)	Épaisseurs (m)	Résistance de pointe q_d (MPa)
Sable limoneux marron	0,00-0,60	0,60	$0 < q_d < 5$
	0,60-1,30	0,70	$0 < q_d < 15$ côté Loire $0 < q_d < 20$ côté val
	1,30-2,00	0,70	$5 < q_d < 25$

La densité des sols de surface, entre 0,20 et 0,30 m de profondeur, est de 1,46 et 1,52 pour les profils P3 et P7 (Tableau 2). Les teneurs en eau des échantillons prélevés pour les calculs de densité sont de 14,8 et 18,7 % respectivement. Elles sont plus faibles sur les échantillons prélevés à la tarière. La présence de débris végétaux (racines, matières organiques) en partie supérieure de la rehausse peut être à l'origine des écarts de densités et de teneurs en eau constatées.

TABLEAU 2. Masses volumiques et teneurs en eau naturelles des matériaux constitutifs de la rehausse aux profils P3 et P7.

Sondage	Profondeur (m)	Densité d (-)	Teneur en eau w (%)	Poids volumique apparent sec γ_d (kN.m^{-3})
d3	0,20-0,30	1,46	14,8	12,7
TAM3	0,20-1,45	-	9,6	-
d7	0,20-0,30	1,52	18,7	12,8
TAM7	0,25-1,00	-	9,3	-
	1,00-2,00	-	9,0	-

Erodabilité des sols de la rehausse

Les résultats des essais MoJET sur le profil P3 sont représentés sur les courbes de la Figure 6. Ces dernières montrent l'évolution en fonction du temps de la matière sèche érodée et celle de la masse moyenne érodée par unité de temps (taux moyen d'érosion).

Une bonne répétabilité des essais est observée : les courbes relatives à chaque essai se regroupent selon la profondeur d'essai. Il est à noter que les deux essais effectués sur la surface de la rehausse (profondeur 0 cm), qui est entièrement végétalisée, présentent une grande résistance à l'érosion superficielle par rapport à l'ensemble des essais effectués en profondeur. Il est également observé

que le sol en profondeur (au-delà de 10 cm) est clairement le plus sensible à l'érosion : il présente à la fois l'érosion totale la plus importante et le taux d'érosion qui reste le plus élevé au fil du temps, notamment en fin d'essai.

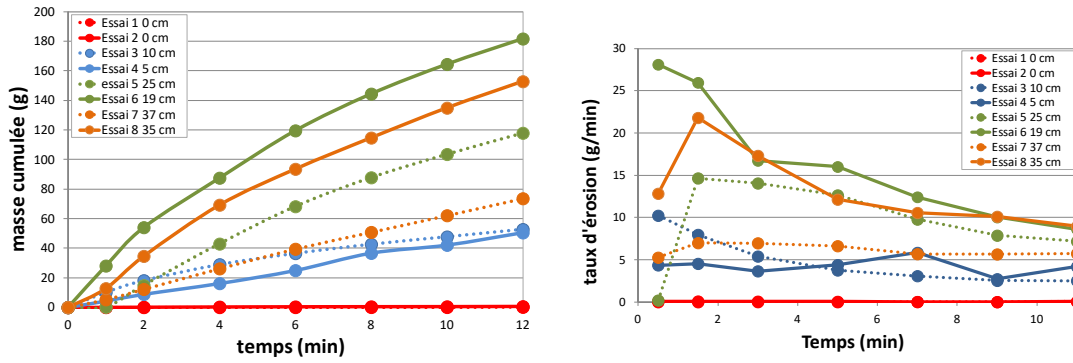


FIGURE 6. Essais MoJET sur le profil P3 : masse érodée cumulée et taux moyen d'érosion en fonction du temps pour les différents essais à 4 profondeurs différentes.

La Figure 7 présente la masse totale érodée durant les 12 minutes d'essai en fonction de la profondeur d'essai pour l'ensemble des essais effectués (2 répétabilités sur les 2 profils P3 et P7). Elle confirme une plus forte résistance à l'érosion près de la surface. Cette résistance décroît en profondeur avec une augmentation de la masse érodée au-delà de 10 cm.

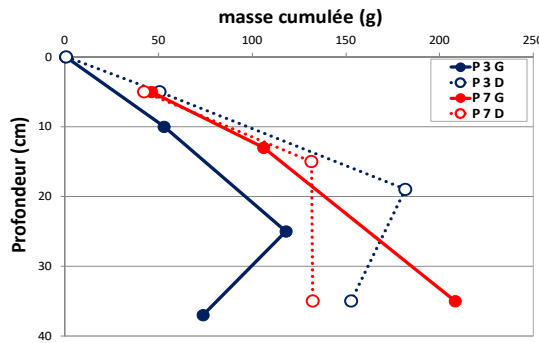


FIGURE 7. Évolution de la masse totale érodée en fonction de la profondeur d'essai sur l'ensemble des profils d'essais.

Des essais complémentaires de caractérisations des sols sur matériaux prélevés ont également été effectués : teneurs en eau et analyses granulométriques. En effet, lors d'une étude de sensibilité de sols à l'érosion, il est par exemple attendu que cette sensibilité augmente lorsque la teneur en fines des sols diminue. Les paramètres physiques des sols sont représentés à la Figure 8. Aucune relation directe n'est établie entre la sensibilité à l'érosion des matériaux de la rehausse et leurs paramètres physiques notamment par rapport à la fraction sableuse et à la fraction fine. La fraction fine des sols étant plutôt faible (inférieure à 25 %), son influence sur la dynamique d'érosion reste relativement faible.

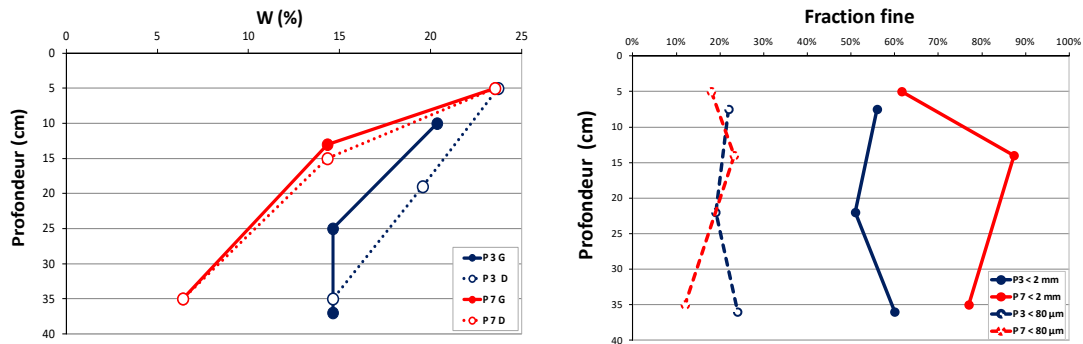


FIGURE 8. Évolution (à gauche) de la teneur en eau et (à droite) de la granulométrie (fraction 0/2 mm et 0/80 µm) en fonction de la profondeur d'essai sur les 2 profils d'essais.

Discussion

Le matériau constitutif de la rehausse du déversoir de Jargeau est un sable limoneux marron, généralement de classe GTR B5.

La rehausse est constituée en 3 couches, de 0,60 à 0,70 m, distinctes vis-à-vis de leurs résistances de pointe. À partir de 0,60 m de profondeur et jusqu'à 1,30 m de profondeur, les résistances de pointe mesurées sont comprises entre 0 et 15 MPa côté Loire et entre 0 et 20 MPa côté val. Elles sont supérieures au-delà de 1,30 m de profondeur.

La campagne d'essais MoJET sur la rehausse du déversoir de Jargeau aboutit aux conclusions suivantes :

- la rehausse n'est pas érodable en surface, en raison de la présence d'un tapis végétal dense, qu'il convient de supprimer lors du réaménagement du déversoir si l'on souhaite que l'érosion s'initie sur ce fusible. Dans ce cas, il faut également prévenir tout développement ultérieur significatif de la végétation (consignes à reporter dans le dossier d'ouvrage) ;
- la sensibilité à l'érosion des matériaux constitutifs de la rehausse tend à augmenter avec la profondeur (matériaux moins sensibles à l'érosion entre 0 et 10 cm de profondeur qu'entre 13 et 37 cm de profondeur) ;
- il n'existe pas de distinction nette de la sensibilité à l'érosion des matériaux de la rehausse entre 13 et 37 cm de profondeur ; ces matériaux sont qualifiés de moyennement à très érodables ;
- aucun lien direct n'a été établi entre la sensibilité à l'érosion des matériaux de la rehausse et leurs paramètres physiques, teneur en eau, fraction sableuse et fraction fine. Ces paramètres, mesurés sur des échantillons remaniés, ne tiennent pas compte du vieillissement du matériau constitutif de la rehausse in situ (développement potentiel d'une faible cohésion, non évaluée in situ et en laboratoire).

L'abaissement du fusible est en cours d'étude, pour un chantier prévu fin 2023-début 2024. Les résultats de la campagne d'essais MoJET vont permettre au maître d'œuvre d'améliorer la conception du projet vis-à-vis des niveaux d'eau modélisés.

Par ailleurs, il serait désormais utile de présenter également les résultats de la campagne d'essais MoJET obtenus sur les rehausses des déversoirs de Montlivault [1, 4] et de la Bouillie à Blois, cités au début de l'article, et de les analyser par une étude comparative avec ceux du déversoir de Jargeau.

Références

- [1] Maurin J., Patouillard S., Tourment R. (2013). *Les déchargeoirs au XVII^e siècle, les déversoirs au XIX^e et quelles perspectives pour la gestion des surverses au XXI^e siècle*. Congrès SHF Événements extrêmes d'inondation 2013, Lyon, France, 13-14 novembre 2013, 9 p.
- [2] Reiffsteck P., Haghghi I., Chevalier C. (2012). *Erodibility diagnostic of existing hydraulic earthworks by mobile jets erosion test*. 6th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-6), Paris, France, 27-31 août 2012, pp. 166-173.
- [3] Henensal P., Duchatel F. (1990). *L'érodimètre à jets mobiles*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol. 167, pp. 47-53.
- [4] Chevalier C., Reiffsteck P., Haghghi I., Durand E. (2011). *Déversoir de Montlivault – Caractérisation de la banquettes fusible en terre par le dispositif d'Erodimètre à Jets Mobiles (MoJET)*. Journées Techniques Diagnostic et Surveillance des digues : de la recherche à la pratique, 16-17 novembre 2011, Orléans, France.