

Étude de la sensibilité à l'érosion interne du système d'endiguement du val d'Authion via les essais HET

Authion levee system internal erosion sensitivity study using HET tests

R. Béguin¹, L. Saussaye², S. Patouillard³, E. Durand⁴, B. Bridoux⁴, Maxime Boucher¹

¹ geophyConsult, Chambéry, France, Remi.beguin@geophyconsult.com

² Cerema, équipe de recherche ENDUSM, Blois, France, lucile.saussaye@cerema.fr

³ DREAL Centre-Val de Loire, Orléans, France

⁴ Cerema, Blois, France

Résumé

Dans le cadre du programme de fiabilisation des digues du val d'Authion, émanant de l'étude de dangers des digues du val d'Authion de 2012, un certain nombre d'études ont été produites afin de diagnostiquer puis de renforcer les levées vis-à-vis des différents mécanismes de défaillance auxquels elles sont exposées. L'un des mécanismes étudiés est l'érosion interne. La réalisation d'environ 80 essais Hole Erosion Test (HET) entre 2020 et 2022 a permis de s'intéresser spécifiquement au phénomène d'érosion de conduit pour les matériaux constituant le corps de digue et le sol de fondation des digues. L'article présente les différentes campagnes d'investigations menées et la synthèse des résultats des essais HET en termes de contrainte critique d'érosion τ_c et d'indice d'érosion I_e . Cette synthèse est conduite afin d'identifier les différentes réponses obtenues au cours des essais en fonction des structures des sols testés, ainsi que leur variabilité. Cet ensemble de données étant établi, il est comparé aux essais HET réalisés sur d'autres systèmes d'endiguement, au-delà de la Loire moyenne. Une décomposition par secteur est également proposée afin de déterminer s'il existe des tendances locales. La réflexion porte ensuite sur l'utilisation de ces données dans le cadre d'étude de diagnostic, y compris lors des études de dangers réglementaires des systèmes d'endiguement. L'utilisation des courbes de distribution cumulées de τ_c s'insère dans l'approche probabiliste requise pour ces études. Par ailleurs, les résultats des essais HET peuvent être interprétés pour évaluer la gamme de taille de défauts pouvant initier une érosion de conduit en fonction des crues ainsi que le temps de rupture d'une levée (ouverture de brèche). Les calculs tiennent compte des sollicitations hydrauliques appliquées aux levées, notamment des charges et des gradients hydrauliques, et des paramètres physiques et mécaniques des sols, dont leur sensibilité à l'érosion de conduit.

Mots-clés

diagnostic, érosion interne, érosion de conduit, contrainte critique d'érosion, indice d'érosion

Abstract

Following 2012 Authion levee system hazards study, a reliability improvement program has been put in place. Thus, several assessment studies and works enable to reinforce levees against failure mechanisms were ordered. On Loire levees, one significant mechanism is internal erosion.

Between 2020 and 2022, 80 Hole Erosion Tests (HET) were made on Authion system to better understand concentrated leak erosion susceptibility of levee core and foundation materials. This article reminds Authion geotechnical surveys and HET methodologies and summarizes their results in terms of critical erosion stress τ_c and erosion index I_e . It shows results variability as function of levee layers (core or foundation), nature of material and testing difficulties and compares these results to contractor national HET database on levee systems, outside center Loire levees context.

The influence of tested samples localization on HET results is also reviewed. The next paragraph is dedicated to HET results usage in levee assessment studies including required levee systems hazards studies. Then, τ_c cumulative distribution curves are described and fit to probabilistic approaches suggested by current French hydraulic structures regulations. Additionally, HET results can be used to determine size range of defects leading to erosion initiation according to flood events and levee breach opening duration. Calculations are function of hydraulic exposures on levees, especially hydraulic charges et gradients but depend also of physical and geotechnical soil characteristics including HET ones.

Key Words

diagnosis, internal erosion, concentrated leak erosion, critical erosion stress, erosion index

Introduction

Le val d'Authion est localisé sur la rive droite de la Loire dans les départements d'Indre-et-Loire (37) et de Maine-et-Loire (49). Le système d'endiguement de ce val protège une population importante évaluée à 63 000 habitants et 16 500 salariés (val de classe A selon l'arrêté inter préfectoral D3/2009 n°443 du 24 juillet 2009).

Suite à l'étude de dangers [1], les tronçons de digue présentant les probabilités de rupture les plus significatives ont été identifiés. Elle a permis de définir les niveaux détaillés dans le Tableau 1.

TABLEAU 1. Niveaux de protection apparent et niveaux de sûreté des tronçons étudiés.

Tronçons	Niv* 1 ^{ère} surverse (crête de digue)	Niv* de sûreté (risque de rupture faible)
Levée Amont (37 et 49)	6,40 m - 30,54 mNGF - 5 750 m ³ /s (T170)	5,95 m - 30,09 mNGF - 5 250 m ³ /s (T70)
Levée Aval (49)	6,30 m - 30,44 mNGF - 5 600 m ³ /s (T100)	5,95 m - 30,09 mNGF - 5 250 m ³ /s (T70)
Belle-Poule (49)	5,95 m - 30,09 mNGF - 5 250 m ³ /s (T70)	5,75 m - 29,89 mNGF - 5 250 m ³ /s (T50)

*Niveau mesuré à l'échelle de Saumur

Un programme de travaux de fiabilisation [2], établi par la DREAL Centre-Val de Loire, vise à rehausser le niveau de sûreté à hauteur du niveau de protection apparent. Les travaux consistent soit à rendre plus étanche la levée soit à l'épaissir et sont répartis en 12 opérations situées entre les Coteaux-sur-Loire et La Chapelle-sur-Loire (37) et entre Varennes-sur-Loire et La Daguenière (49). L'objectif de ces confortements est de réduire le risque d'érosion interne :

- l'étanchéification correspond à la réalisation d'écrans étanches ;
- l'épaississement correspond soit à l'adoucissement de la pente du talus côté val et la mise en place d'un massif drainant, soit, pour les secteurs où les talus ont déjà été adoucis, à la mise en place d'un massif drainant.

Les travaux envisagés ont fait l'objet d'un avant-projet [3][4] intégrant des études géotechniques de niveau G2 AVP pour justifier les solutions de confortement de la levée. Au cours du diagnostic de la levée, parmi les 4 mécanismes d'érosion interne classiquement étudiés, les études géotechniques se sont intéressées à l'évaluation du risque d'érosion de conduit via la réalisation d'un certain nombre d'essais HET (Hole Erosion Test).

Cet article présente la synthèse des résultats HET sur l'ensemble du système d'endiguement, ainsi que leur analyse par formation lithologique et par secteur.

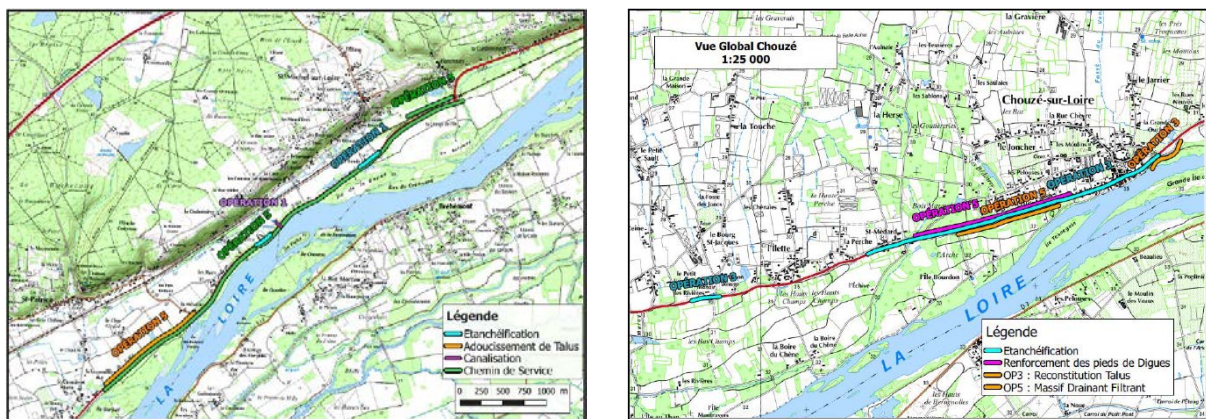


FIGURE 1. Exemple de localisation des opérations de travaux sur le val d'Authion [3].

Matériels et méthodes

Localisation des sites et géométrie des levées

La Figure 1 présente un extrait des plans de localisation des opérations de travaux [3]. La hauteur des levées est comprise entre 2,0 et 7,4 m, pour une moyenne de l'ordre de 4,6 m. Le fruit du talus côté Loire est compris entre 2H/1V et 3H/1V, celui du talus côté val entre 1,4H/1V et 4H/1V. La largeur en crête est comprise entre 9 et 10 m, avec ponctuellement des sections très étroites.

Prélèvement d'échantillons intacts par sondages carottés

Les campagnes d'investigations se basent sur la réalisation d'un sondage carotté descendu à 15 m de profondeur tous les 200 m, avec prélèvement d'échantillons intacts (au moins 1 échantillon par formation), en fonction de la place disponible pour mettre en place la sondeuse géotechnique ou de la présence de réseaux par exemple. Le choix des échantillons pour la réalisation des essais HET est effectué lors de l'ouverture des carottes. L'un des premiers critères de sélection est l'intégrité de la carotte (cf. paragraphe suivant).

L'essai de Hole Erosion Test

Le HET a été développé pour reproduire le processus d'érosion de conduit se développant dans des défauts préexistants dans les sols fins (fissures, terriers, racines, contact d'ouvrages rigides traversants notamment des conduites...). Le dispositif, le protocole et la méthode de modélisation utilisés pour cette campagne sont ceux développés par l'Inrae [1][2], en s'inspirant de précédents appareillages [3]. L'essai consiste à faire un trou de 6 mm dans un échantillon cylindrique de sol de diamètre ~80 mm et de longueur ~150 mm, généralement retaillé à partir d'une carotte. Un écoulement est imposé dans l'échantillon, dont le débit est ajusté par l'opérateur pour générer une érosion significative. L'agrandissement du trou par érosion de ses parois est suivi par des mesures de débit, pression différentielle et turbidité. Ces données sont interprétées en faisant l'hypothèse d'une loi d'érosion linéaire qui relie le taux d'érosion ε (m/s) à la contrainte hydraulique appliquée sur le sol τ (Pa) par la relation donnée dans l'Equation 1 :

$$\varepsilon = C_e / \rho_d * (\tau - \tau_c) \quad (1)$$

avec les paramètres suivants d'érodabilité du sol : le coefficient d'érosion C_e (s/m) qui caractérise la cinétique d'érosion, la contrainte critique τ_c (Pa) caractérisant l'initiation de l'érosion et ρ_d la masse volumique apparente sèche du sol (kg/m^3). Le coefficient d'érosion variant de plusieurs ordres de grandeurs, l'index d'érosion I_e lui est généralement préféré (Equation 2).

$$I_e = -\log(C_e) \quad (2)$$

Sélection des échantillons à tester au HET

Des portions de carottes sous gaine d'environ 1 m de long ont été présélectionnées pour la réalisation des essais HET, d'après les besoins des études de diagnostic. Au sein de ces gaines, la portion de matériaux effectivement testée au HET a été choisie en concertation entre geophyConsult et le commanditaire (le plus souvent le BE géotechnique missionné) :

- dans les matériaux jugés les « plus érodables » par l'opérateur (de façon à délivrer des résultats conservatifs) mais hors zone purement sableuse (dont l'absence de cohésion abouti systématiquement à des échecs et/ou résultats partiels) ;
- dans les matériaux les plus aptes aux essais sur échantillons intacts, c'est-à-dire sans fissures,

zones déstructurées, éléments grossiers, structure en agrégat, cohésion insuffisante pour manipuler l'échantillon...

Lorsque les essais intacts n'étaient pas possibles sur les échantillons sous gaine, les essais ont été réalisés sur échantillon remanié. L'échantillon a ainsi été écrêté par tamisage à 5 mm puis recompacté par damage manuel, en conservant la teneur en eau naturelle de sol. La densité cible a été prise égale à la densité naturelle mesurée sur la carotte.

Méthode d'essais d'identification des sols

Les essais d'identification en laboratoire 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) ou des limites d'Atterberg (limite de liquidité w_l , limite de plasticité w_p , indice de plasticité I_p) (selon les normes NF P94-051 et NF P94-052-1).

Résultats

Matériaux constitutifs des levées du val d'Authion

Les matériaux constitutifs du corps de digue sont principalement des matériaux fins de type sable limoneux à argileux ou limon. Ils sont majoritairement de classes GTR A1 ou B5, plus ponctuellement A2, B4 ou B6.

Les sols de fondation des levées sont les alluvions modernes de la Loire. Ces matériaux, principalement sablo-limoneux et argilo-sableux (parfois riches en matière organique -jalle-), sont hétérogènes. Les alluvions inférieures sont sableuses à graveleuses.

Le substratum, situé approximativement entre 10 et 16 m de profondeur, présente différents faciès, tels que des argiles grises à vertes, du calcaire (tuffeau) et du schiste.

Observations lors de la réalisation des essais HET

Sur les 84 essais réalisés, 48 se sont déroulés de façon nominale, sans observations particulières. Sur le reste des essais, les observations récurrentes peuvent se diviser en 3 grandes catégories. D'abord, les essais pour lesquels le manque de cohésion ou des fragilités ont engendré un effondrement de l'échantillon durant la préparation de l'essai ou durant l'essai lui-même. Ensuite, les échantillons hétérogènes avec des veines, des passées sableuses ou des gravillons qui ont pu engendrer un conduit très irrégulier, des détachements de blocs ou même l'apparition de conduits secondaires. Enfin, des échantillons lâches et/ou très plastiques qui ont flué lors de la mise en pression, provoquant une sortie du sol à travers la bague de maintien ou un colmatage du trou.

Lorsque l'essai était inexploitable, si suffisamment de sol similaire était disponible, l'essai était répété si possible sur sol intact, sinon sur échantillon remanié. Le remaniement permet d'homogénéiser les sols, de retirer les gravillons, de casser les agrégats et mène généralement à un résultat interprétable. Cependant, la structure naturelle du sol a été perdue.

Au final, un essai interprétable a été obtenu sur la majorité des gaines (84 sur 90). Les échecs concernent majoritairement des zones trop sableuses, où on peut faire raisonnablement l'hypothèse d'une forte érodabilité du sol (τ_c proche de 0 Pa et $I_e < 1$). Pour ce type de sols, c'est la possibilité d'existence d'un défaut ouvert et la tenue du toit du conduit durant son développement qui conditionnent la possibilité d'une rupture d'ouvrage plutôt que l'érodabilité du sol.

Synthèse des résultats

L'ensemble des résultats exploitables est présenté sur la Figure 2. Chaque point représente un résultat d'essai, défini par la contrainte critique en abscisse et l'indice d'érosion en ordonnée. Les sols les plus résistants sont en bas à droite du graphique, les plus érodables en haut à gauche. On constate que les paramètres obtenus possèdent une étendue de variation proche de celle de la base de données geophyConsult sur les ouvrages hydrauliques. Une corrélation entre la contrainte critique et l'indice d'érosion est observée sur les données du val d'Authion, similaire à celle observée sur la base de données. Un ajustement linéaire reliant l'indice d'érosion au logarithme de la contrainte critique illustre cette corrélation, sur le val d'Authion, selon l'Équation 3 :

$$Ie = 0.8748 \log(\tau_c) + 1.5505 \quad (3)$$

Sa qualité est moyenne ($R^2 = 0,692$) et il faut prendre en compte le fait que l'ajustement est réalisé sur le logarithme des paramètres déduits de la courbe d'érosion (C_e et τ_c).

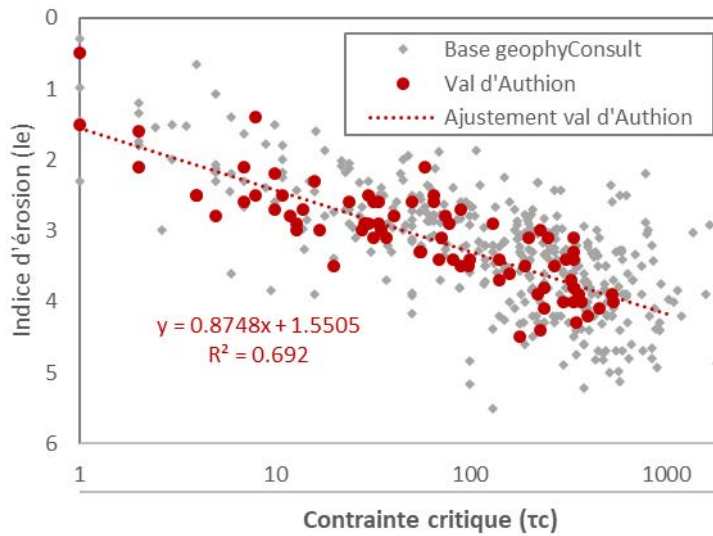


FIGURE 2. Résultats interprétables des essais HET du val d'Authion et comparaison à la base de données de geophyConsult. L'ajustement indiqué utilise le logarithme de la contrainte critique.

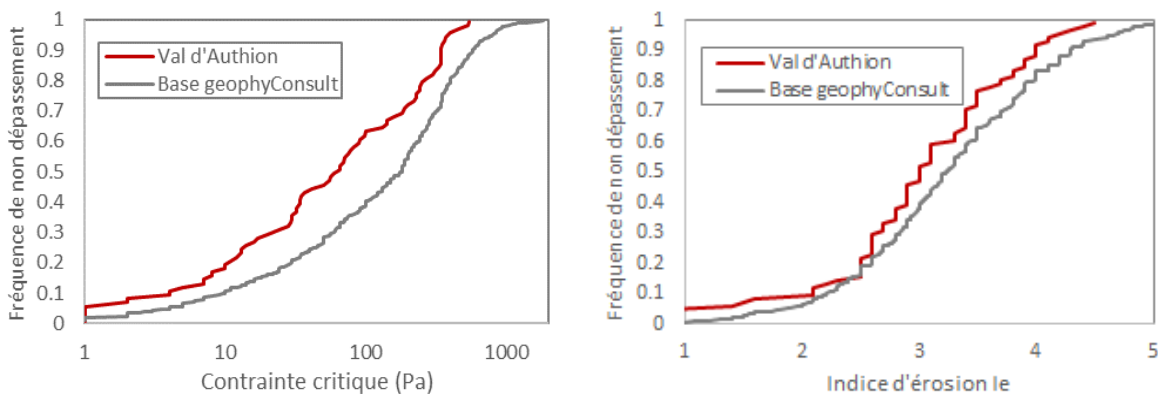


FIGURE 3. Courbes de fréquence de non-dépassement obtenues pour les contraintes critiques et les indices d'érosion des essais HET du val d'Authion et de la base de données geophyConsult.

Ces mêmes données peuvent aussi être représentées en termes de fréquence de non-dépassement, afin de comparer plus finement les jeux de données (Figure 3). Cette représentation permet de comparer les médianes (fréquence = 0,50) ainsi que l'étalement des distributions. On note une résistance légèrement plus faible sur les données du val d'Authion par rapport à la base de données. La dispersion est similaire, sauf pour les valeurs de résistance les plus élevées, non présentes dans les données du val d'Authion.

Les échantillons ont ensuite été dissociés entre deux parties distinctes de l'ouvrage investiguée : le corps de digue (remblai) ou le sol de fondation (fondation) (Figure 4). Les résistances sont légèrement meilleures en fondation, même si les distributions restent similaires.

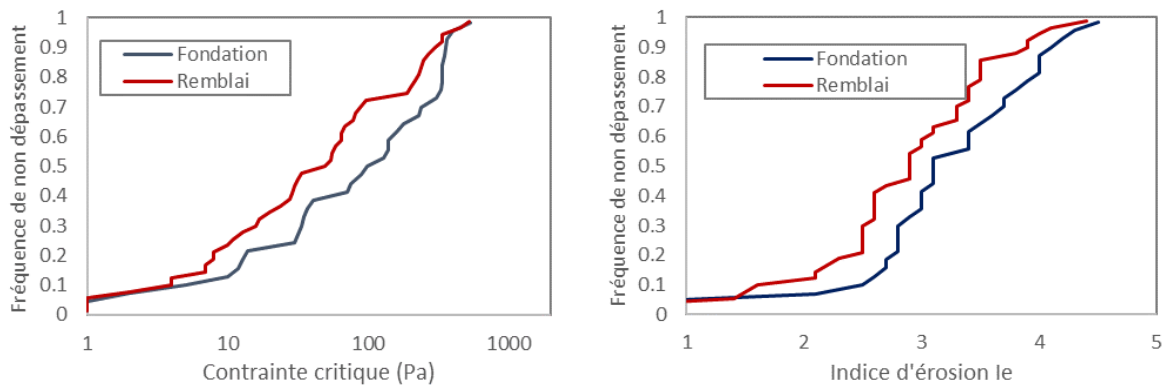


FIGURE 4. Courbes de fréquence de non-dépassement obtenues pour les contraintes critiques et les indices d'érosion des essais HET du val d'Authion, dissociés entre remblai et fondation.

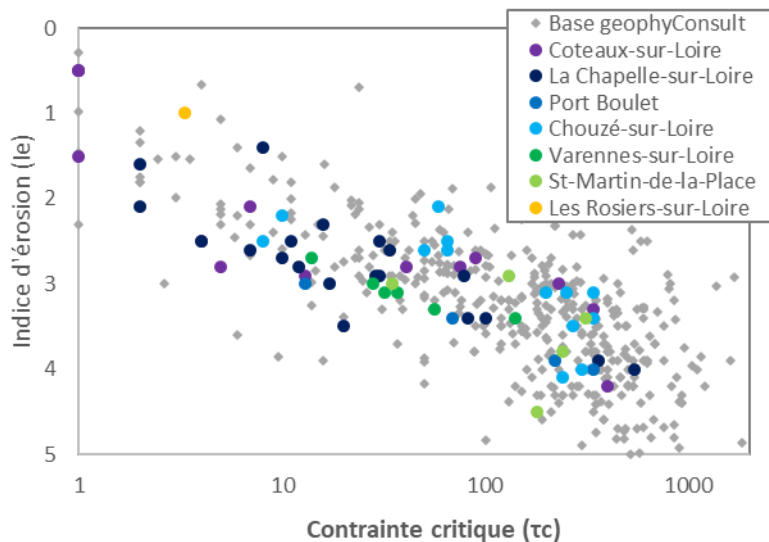


FIGURE 5. Résultats des essais HET dissociés par localisation le long de la levée d'Authion, de l'amont vers l'aval.

Au niveau des zones géographiques de prélèvement le long de la levée d'Authion (présentées sur de l'amont à l'aval sur les Figure 5 et Figure 6), les résistances sont plus dispersées et légèrement plus faibles en partie amont (Coteaux-sur-Loire et La Chapelle-sur-Loire) et légèrement meilleures et plus resserrées à Port Boulet, Saint-Martin-de-la-Place et Les Rosiers-sur-Loire.

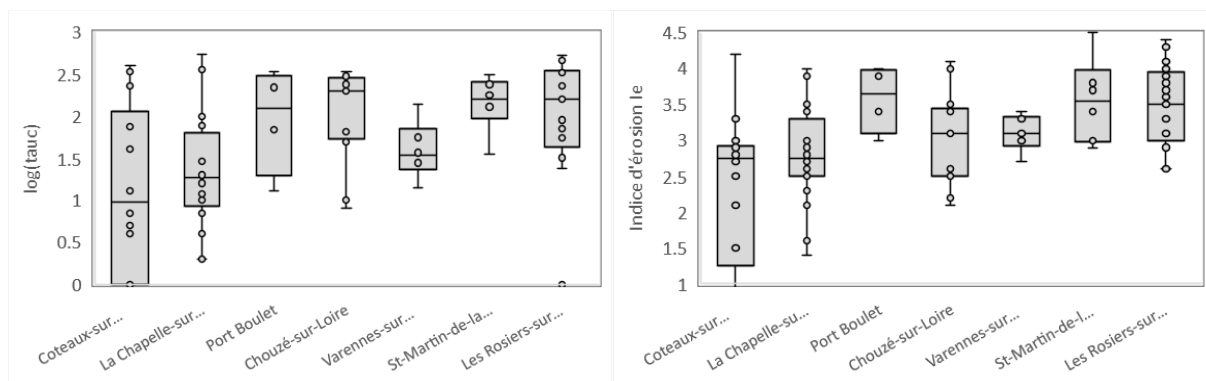


FIGURE 6. Diagramme à « moustache » représentant les résultats HET dissociés par localisation le long de la levée d'Authion.

En termes de type de sol, la description visuelle proposée par l'opérateur au moment de la réalisation du HET est disponible mais peu fiable, car uniquement visuelle. De nombreuses identifications ont été réalisées sur les échantillons sous gaines, mais seulement 10 échantillons HET (sur 84) ont pu être associés à des identifications réalisées sur la même couche lithologique. En conséquence, les profils géologiques issus de la synthèse des reconnaissances ont été utilisés pour associer une dominante de type de sol aux échantillons HET testés. En utilisant cette classification, on note une meilleure résistance pour la dominante argileuse comme attendu (Figure 7).

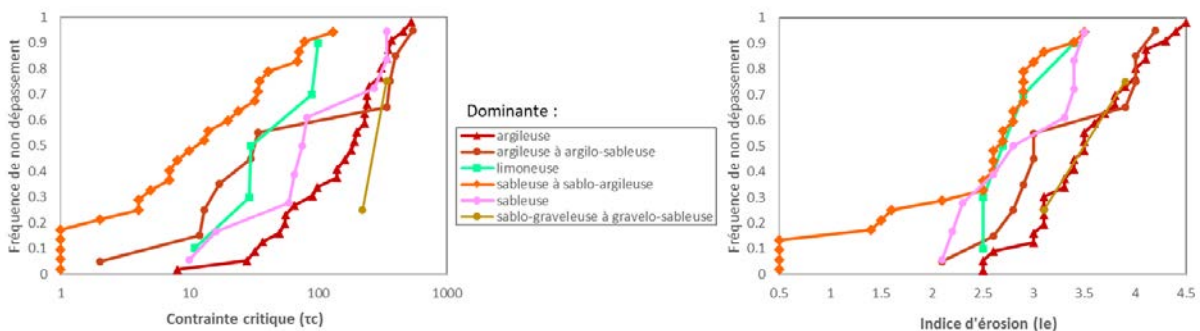


FIGURE 7. Courbes de fréquence de non-dépassement obtenues pour les contraintes critiques et indice d'érosion des essais HET du val d'Authion, dissociés par familles de sol.

La dominante sableuse à sablo-argileuse donne les résultats les plus faibles surtout car elle inclut les 5 essais où une érosion très rapide a été observée et des résultats arbitraires de sol très érodable attribués pour ces représentations. La dominante sablo-graveleuse à gravele-sableuse ne contient que 2 essais. Les autres dominantes (sableuses, argileuse à argilo-sableuse, limoneuse) ont des résultats globalement similaires.

Les essais remaniés ont été plus fréquents sur la dominante sableuse à sablo-argileuse (10 sur 26) que sur les autres classes et pourraient expliquer la moins bonne résistance obtenue sur cette classe. Le constat global est une faible dépendance au type de sol, contrairement à ce qu'on aurait pu attendre.

L'influence de la densité et de la teneur en eau sur les contraintes critiques a été analysée sur la

Figure 8. Aucune tendance forte ne ressort de cette analyse mais on peut noter que les teneurs en eau naturelles semblent globalement cohérentes avec les familles de sol (plus élevées pour les sols argileux que pour les sols sableux). On note que disposer des valeurs d'optimum Proctor normal aurait permis une analyse fine de l'influence de l'état hydrique et de compacité du sol.

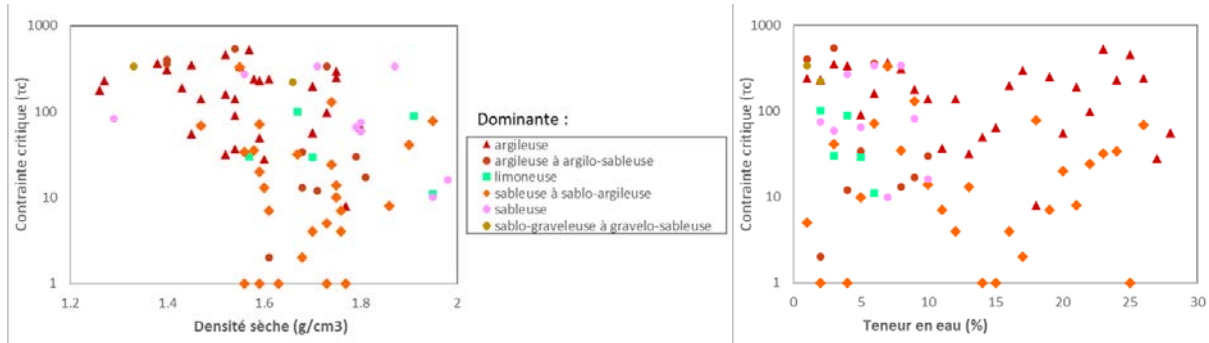


FIGURE 8. Contraintes critiques obtenues en fonction de la densité sèche et la teneur en eau des échantillons, dissociés par famille de sol.

Exemple d'application

D'après les résultats obtenus, une illustration d'exemple d'application est proposée, concernant la possibilité d'initiation d'une érosion de conduit sachant la présence d'un défaut traversant dans l'ouvrage. En fonction de la taille du défaut (ici supposé cylindrique), un gradient minimum nécessaire à l'initiation de l'érosion peut être déduit des contraintes critiques, selon l'Équation 4 :

$$i_c = \tau_c / \left(\frac{D}{4} \cdot \rho_w \cdot g \right) \quad (4)$$

avec D (m) le diamètre du défaut, ρ_w (kg/m^3) la masse volumique de l'eau et g (m/s^2) la gravité. À noter que cette relation néglige les pertes de charges singulières à l'entrée et à la sortie du conduit qui peuvent, suivant les configurations, être significatives et augmenter fortement le gradient « critique » calculé pour une contrainte critique donnée.

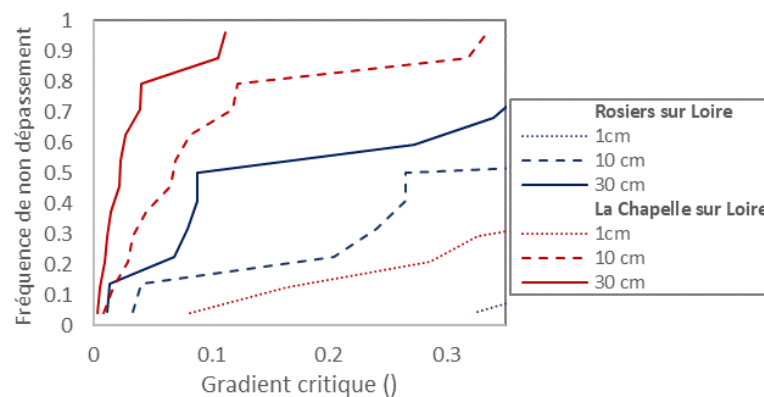


FIGURE 9. Fréquence de non-dépassement du gradient « global » initiant l'érosion de conduit (calculé en négligeant les pertes de charges singulières) déduit des contraintes critiques obtenues lors des essais HET, pour les échantillons de remblai de deux zones géographiques de prélèvement, en fonction du diamètre de défauts traversants.

En appliquant cette relation sur la distribution de contraintes critiques obtenue sur les échantillons des remblais (hors fondation) de deux zones géographiques (Les Rosiers-sur-Loire et La Chapelle-sur-Loire), on obtient les courbes de la Figure 9. Pour les gradients attendus lors des crues de la Loire ($\approx 0,05$ à $0,2$), on peut en déduire des estimations du risque d'initiation en fonction de la taille des défauts attendus. Pour estimer des probabilités de rupture, on prendra soin d'analyser la représentativité des essais par zone d'étude et de confronter les résultats de ces courbes expérimentales aux observations historiques et résultats d'expertises existantes.

Discussion

Les résultats des HET sur les sols de la levée d'Authion sont dispersés et aucune tendance forte ne se dégage des analyses présentées. Ceci pourrait s'expliquer par une forte variabilité des sols en place, en partie ressentie par les opérateurs lors des essais (présence de passés sableuses dans l'argile à l'intérieur des échantillons...). Ceci rend peu fiable l'association d'un type de sol à l'échantillon testé, les identifications étant toujours réalisées sur des parties proches mais différentes de la carotte. Une autre piste d'explication est la variabilité de la résistance à l'érosion des sols, illustrée par l'étendue de variation des paramètres de la loi d'érosion, de plusieurs ordres de grandeurs : quelques pourcents de fraction argileuse supplémentaires, de densité ou une structure différente peuvent faire varier fortement les résultats.

Ces résultats montrent la difficulté de définir une valeur « caractéristique » des paramètres d'érosion à utiliser dans une étude sur une partie de l'ouvrage et l'intérêt d'utiliser des distributions de paramètres.

Remerciements

Les auteurs remercient Ginger CEBTP pour la mise à disposition des données de sondages et d'essais géotechniques in situ et en laboratoire, ainsi que des profils en long, ayant permis d'établir les corrélations entre les résultats des essais HET et la nature lithologique des terrains rencontrés sur certaines opérations d'Indre-et-Loire et de Maine-et-Loire.

Références

- [1] DREAL Centre (2014). Étude de dangers des levées de Loire du val d'Authion, digues de classe A.
- [2] DREAL Centre-Val de Loire (DETL) (2016). Levées de Loire du val d'Authion – Projet global de fiabilisation – Plan Loire Grandeur Nature IV (2015-2020).
- [3] Antea Group (2019). Conception et suivi des travaux de fiabilisation de la levée de protection du val d'Authion en Indre-et-Loire – Synthèse de l'Avant-Projet – Rapport n°197509/A du 14 février 2019.
- [4] Antea Group (2019). Conception et suivi des travaux de fiabilisation de la levée de protection du val d'Authion en Maine-et-Loire – Synthèse de l'Avant-Projet – Rapport n°1A 96528/B du 24 mai 2019.
- [5] Bonelli S., Brivois O. (2008). The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 32: 1573-1595
- [6] Benahmed N., Bonelli S. (2012). Investigating concentrated leak erosion behaviour of cohesive soils by performing Hole Erosion Tests, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 16(1):43-58.
- [7] Wan C.F., Fell R. (2004). Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* - ASCE 30(4): 373-380.