

Sensibilité à la suffusion, de l'échantillon à l'ouvrage

Suffusion susceptibility, from the specimen to the earth structure

D. Marot¹, F. Bendahmane¹, R. Gelet¹, V.T. Le^{1,2}, L. Zhang¹, C. Zhong¹

¹ Université de Nantes, Institut GeM (UMR CNRS 6183), Saint-Nazaire, didier.marot@univ-nantes.fr

²The University of Danang -University of Science and Technology 54, Nguyen Luong Bang, Da Nang, Vietnam

Résumé

La surverse et l'érosion interne apparaissent comme les deux principales causes de la rupture des digues et barrages en remblais. Quatre processus d'érosion interne peuvent être distingués et cette étude porte sur la suffusion qui mobilise la fraction fine du sol. En considérant uniquement la distribution granulométrique et éventuellement la densité du sol, de nombreux critères granulométriques ont été proposés dans la littérature. Toutefois la suffusion étant une interaction fluide-solide, il convient évidemment de prendre aussi en compte la sollicitation hydraulique. Par ailleurs, la filtration de certaines particules détachées lors de la suffusion peut induire un colmatage du milieu poreux et donc une variation de la pression interstitielle et du débit d'écoulement. En conséquence, la sollicitation hydraulique est modélisée par la puissance dissipée par le fluide.

Les différentes campagnes de caractérisation expérimentale de la suffusion décrites dans la littérature, ont été menées sur des échantillons de tailles très diverses et différents historiques de chargement hydraulique qui peuvent être très différents des conditions de sollicitation in-situ. Enfin les essais de suffusion ont été très majoritairement réalisés sous écoulement vertical alors que sur site, la direction de l'écoulement peut être bien différente.

Le premier objectif de l'étude menée est donc de s'assurer que la caractérisation de la sensibilité à la suffusion n'est pas significativement affectée par des effets d'échelles spatiale et temporelle. A cause de la diversité des sols qui constituent les ouvrages hydrauliques et leurs fondations et de l'importance du linéaire de ces ouvrages, la sensibilité à la suffusion à l'échelle d'un ouvrage est extrêmement variable. Le deuxième objectif de l'étude est donc d'estimer à partir de paramètres physiques aisément mesurables la sensibilité des sols à la suffusion. Enfin le troisième objectif est d'identifier les zones les plus sensibles d'un ouvrage en confrontant la sensibilité des sols avec la distribution spatiale de la puissance.

Mots Clés

Erosion interne ; suffusion ; approche énergétique ; effet

d'échelles spatiale et temporelle ; analyse statistique

Abstract

Overtopping and internal erosion appear as the two main causes of failure for dikes and earth dams. Four processes of internal erosion can be distinguished and this study deals with suffusion which mobilizes the fine fraction of soil. By considering solely the grain size distribution and possibly the soil density, many criteria were proposed in literature. However, suffusion is an interaction between fluid and solid and of course, the hydraulic loading has to be considered. Moreover, the filtration of some detached particles can induce a clogging of the porous medium followed by a variation of the interstitial pressure and the seepage flow. In consequence, the hydraulic loading is modeled by the power expended by the interstitial fluid.

The different experimental campaigns dedicated to the suffusion characterization and described in literature were performed with different sample sizes and under different histories of hydraulic loading, which can be very different in comparison with in-site conditions. Furthermore, most suffusion tests were performed under vertical flow, whereas in-site flow direction may be horizontal. The first objective of this work is to verify that suffusion susceptibility characterization is not significantly influenced by spatial and time scale effects. Because of soil heterogeneities within earth structures and their foundations and owing to their large size, suffusion susceptibility can considerably vary at the structure scale. The second objective is then to estimate the suffusion susceptibility from easily measurable parameters. Finally, the third objective is to identify the most sensible zones in a structure by comparing soil susceptibility and spatial distribution of flow power.

Key Words

Internal erosion; suffusion; energy approach; spatial and time scale effects; statistical analysis.

Introduction

La surverse et l'érosion interne apparaissent comme les deux principales causes de la rupture des barrages et digues en remblais [1]. Quatre processus d'érosion interne peuvent être distingués : l'érosion de conduit, l'érosion régressive, l'érosion de contact et la suffusion [2]. Cette étude porte sur la suffusion qui mobilise la fraction fine du sol.

Fell et Fry [2] définissent trois critères qui doivent être satisfaits pour que la suffusion s'initie. Le premier critère qui est géométrique, considère que la taille des particules fines doit être inférieure à la taille des constriction qui séparent les grains de la fraction grossière. Selon le deuxième critère qui prend en compte le chargement mécanique, les particules fines ne doivent pas emplir entièrement l'espace poral. Le troisième critère repose sur l'hypothèse de modéliser le chargement hydraulique par la vitesse de l'écoulement qui doit être suffisante pour initier le déplacement de particules fines. En considérant les deux premiers critères, de nombreux critères granulométriques ont été proposés dans la littérature, notamment par Kenney et Lau [3], Wan et Fell [4], Chang et Zhang [5]. Indraratna et al. [6] ont proposé de considérer aussi la densité du sol pour définir la taille des constriction. Toutefois la suffusion étant une interaction fluide-solide, il convient évidemment de prendre aussi en compte la sollicitation hydraulique. Suivant cet objectif, Skempton et Brogan [7] ont proposé de définir l'initiation du processus par l'accroissement de la conductivité hydraulique et de déterminer le gradient hydraulique correspondant qui est nommé gradient critique. Toutefois la filtration de certaines particules détachées lors de la suffusion peut induire un colmatage du milieu poreux et donc une diminution de la conductivité hydraulique et du débit d'écoulement [8]. En conséquence, Marot et al. [9] considèrent à la fois la différence de charge hydraulique et le débit de l'écoulement pour caractériser la sollicitation hydraulique. Ils expriment la puissance dissipée par le fluide à l'aide de l'équation suivante :

$$P_{flow} = (\gamma_w \Delta z + \Delta P) Q \quad (1)$$

avec γ_w le poids volumique de l'eau, Δz la différence d'altitude entre les sections amont et aval ouvertes à l'écoulement, ΔP la différence de pression entre ces deux mêmes sections et Q le débit volumique de l'écoulement.

La conductivité hydraulique ainsi que le taux d'érosion sont mesurés au cours des essais et un état dénommé permanent est atteint lorsque la conductivité hydraulique se stabilise et que le taux d'érosion décroît. A l'état permanent, l'énergie dissipée par l'écoulement E_{flow} est calculée par intégration temporelle de la puissance. L'indice de résistance à l'érosion correspondant est exprimé par :

$$I_a = -\log \left(\frac{\text{Masse érodée sèche cumulée}}{E_{flow}} \right) \quad (2)$$

A la différence du gradient hydraulique critique qui représente l'initiation du phénomène à un état donné, l'indice

de résistance à l'érosion englobe l'ensemble du processus de suffusion indépendamment de son historique.

A partir de cette approche et des résultats d'essais sur différents types de sols, six catégories de sensibilité à la suffusion sont proposées en fonction de la valeur de l'indice de résistance à l'érosion : de très résistant à très érodable [9]. Les différentes campagnes de caractérisation expérimentale de l'initiation et du développement de la suffusion décrites dans la littérature, ont été menées sur des échantillons de tailles très diverses. L'historique de chargement hydraulique appliqué lors de la réalisation d'un essai de laboratoire peut en outre être très différent des conditions de sollicitation in-situ. Enfin ces essais de suffusion ont été très majoritairement réalisés sous écoulement vertical alors que sur site, la direction de l'écoulement peut être bien différente. Pourtant il convient de noter que l'influence potentielle de ces paramètres sur la sensibilité à la suffusion n'est pas bien établie. L'objet de l'étude paramétrique menée est donc d'investiguer l'influence du volume des échantillons testés, de l'historique de chargement hydraulique et de la direction de l'écoulement.

A cause de la diversité des sols qui constituent les ouvrages hydrauliques et leurs fondations et de l'importance du linéaire de ces ouvrages, la sensibilité à la suffusion est extrêmement variable. Le nombre d'essais de suffusion réalisés risque donc d'être beaucoup trop limité pour prendre en compte cette variabilité. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire d'optimiser les campagnes de caractérisations expérimentales. Suivant cet objectif, une étude statistique est menée pour estimer, à partir de paramètres physiques aisément mesurables la sensibilité des sols à la suffusion.

La dernière étape de la méthodologie proposée consiste à réaliser une étude de cas en confrontant, à l'échelle d'un ouvrage réel, la puissance dissipée et l'indice de résistance à l'érosion afin d'identifier les zones les plus sensibles de cet ouvrage.

Présentation des prototypes utilisés

Dans le cadre de cette étude, trois des six prototypes développés au sein de notre équipe de recherche pour caractériser différents processus d'érosion sont utilisés : l'érodimètre triaxial, l'oedoperméamètre et l'érodimètre multidirectionnel. Ces dispositifs sont détaillés respectivement par [10], [11], [12] et font l'objet d'un bref descriptif ci-après.

L'érodimètre triaxial comprend une cellule triaxiale modifiée (cf. Figure 1), alors que la cellule de l'oedoperméamètre (cf. Figure 2) et celle de l'érodimètre multidirectionnel (cf. Figure 3) sont de type cylindrique rigide. En plus de la nature différente de la contrainte latérale appliquée aux échantillons testés, ces dispositifs sont également complémentaires par la gamme de taille des échantillons testés (cf. Tableau 1). Par ailleurs, l'érodimètre multidirectionnel permet l'application d'un écoulement suivant deux directions : verticale

descendante et horizontale.

TABLEAU 1: DIMENSIONS DES ECHANTILLONS

	Diamètre (mm)	Hauteur (mm)
Erodimètre triaxial	50	de 50 à 100
Oedoperméamètre	285	de 350 à 600
Erodimètre multidirectionnel	80	de 300 à 400

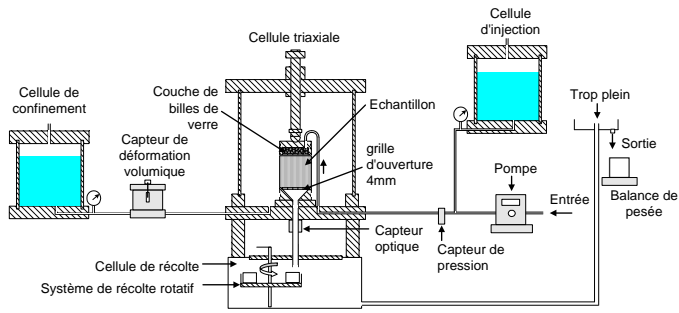


FIGURE 1: SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ERODIMETRE TRIAXIAL.

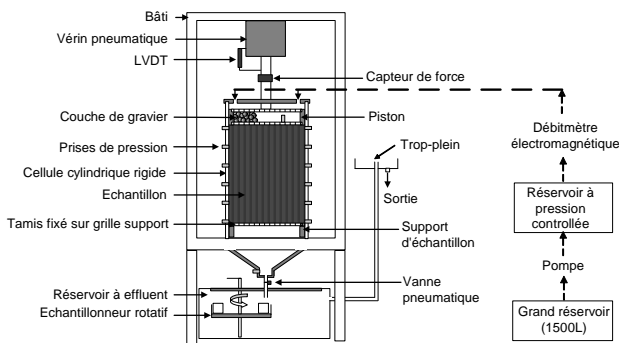


FIGURE 2: SCHEMA DE PRINCIPE DE L'OEDOPERMEAMETRE.

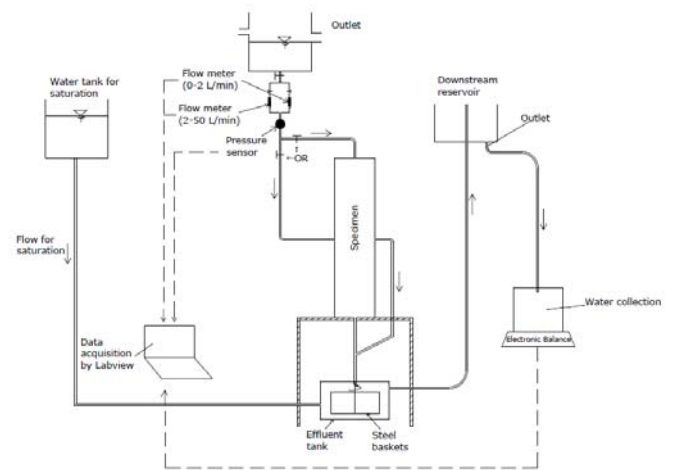


FIGURE 3: SCHEMA DE PRINCIPE DE L'ERODIMETRE MULTIDIRECTIONNEL.

Pour les trois dispositifs, un vérin et un piston permettent d'appliquer sur l'échantillon une contrainte axiale contrôlée. Le piston, ainsi que l'entrée horizontale de l'érodimètre multidirectionnel sont perforés et comprennent une couche de gravier ou de billes de verre afin de diffuser uniformément le fluide injecté. L'embase des cellules, ainsi que la sortie horizontale pour l'érodimètre multidirectionnel, sont en forme d'entonnoir afin de collecter les particules érodées. La sortie de l'entonnoir est connectée via un tube en verre, à un réservoir doté d'un dispositif rotatif avec 8 paniers contenant un sac de toile d'ouverture $12\ \mu\text{m}$ pour la récolte de ces particules au cours de l'essai. Par ailleurs, autour du tube de verre, un capteur optique multi fréquentiel peut être positionné pour la mesure de la concentration de l'effluent en particules limoneuses ou argileuses [13]. Les échantillons sont positionnés sur une grille d'ouverture 10 mm surmontée d'un tamis d'ouverture variable (dans le cadre de cette étude l'ouverture est de 1,2 mm). La mesure du gradient hydraulique appliqué pour chacun des dispositifs est réalisée à l'aide d'un capteur différentiel connecté à deux prises de pression, l'une située à l'interface piston-échantillon et la seconde dans l'entonnoir susmentionné, ou entre l'entrée et la sortie de l'érodimètre multidirectionnel. Les gammes de débit injecté étant très étendues, deux débitmètres électromagnétiques sont utilisés pour chacun des érodimètres. L'acquisition des données pour les trois dispositifs est réalisée à l'aide d'un code sous format LabVIEW écrit par les auteurs, qui permet également le suivi de la conductivité hydraulique au cours des essais.

Etude paramétrique

Nature des sols testés et sensibilité potentielle

Une analyse par granulométrie laser a été menée sur les 6 sols testés (numérotés de 1 à 6) avec de l'eau déminéralisée

mais sans agent défloculant (cf. Figure 4).

Quatre sols ont une distribution discontinue et sont composés d'un mélange de sable et gravier (sols 1, 4 et 6) ou de limon, sable et gravier (sol 5). Deux sols ont une distribution continue : un sol non cohésif (sol 3) composé de limon, sable et gravier ainsi qu'un sable argileux (sol 2) composé de 25% de kaolinite Proclay et de 75% de sable de Fontainebleau.

Ces sols ont été sélectionnés car selon les critères de Kenney et Lau [3] et de Indraratna et al. [6] ils sont « instables ». Toutefois, les sols 2 et 4 apparaissent « stables » selon le critère de Chang et Zhang [5]. Enfin le critère de Wan et Fell [4] n'est applicable que pour le sol 3 qui est ainsi classé « stable ».

En conséquence, si l'étude de la distribution granulométrique est sans conteste une étape importante dans l'analyse de la sensibilité des sols à la suffusion, les résultats contradictoires susmentionnés montrent bien qu'il ne peut s'agir que d'une étape préalable à la mesure précise de la sensibilité par des essais adaptés.

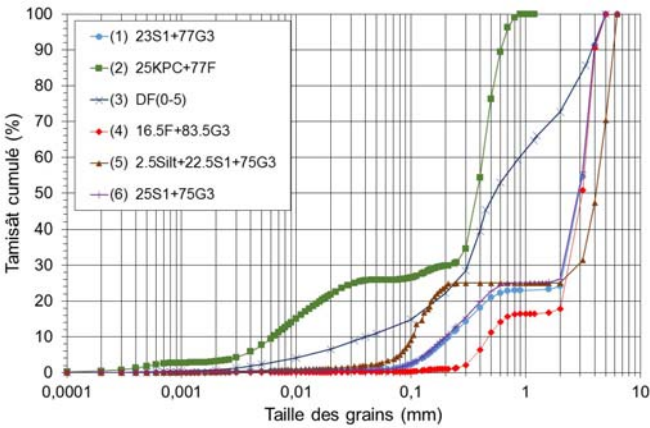


FIGURE 4: DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES SOLS TESTES.

Influence de la longueur d'écoulement

Afin de tester l'effet d'échelle spatiale potentiel, les sols 1 à 5 sont testés dans les mêmes conditions de chargement hydraulique et mécanique, mais avec des échantillons de différentes tailles. Le nom de chaque échantillon commence par le numéro du sol dont il est constitué, la 1ère lettre désigne l'érodimètre utilisé (T : érodimètre triaxial, O : oedopérmaètre, N : érodimètre multidirectionnel), un second chiffre permet de distinguer les échantillons d'un même sol et testé avec un même dispositif.

Au cours des essais menés sur les sols à distribution continue (sols 2 et 3), la conductivité hydraulique n'a pas augmenté, il n'est donc pas possible d'interpréter ces essais à l'aide de la méthode de Skempton et Brogan [7]. Toutefois, lorsqu'il est possible de déterminer le gradient hydraulique critique, la Figure 5 permet de mettre en évidence que cette grandeur n'est pas intrinsèque et décroît avec la longueur de l'écoulement.

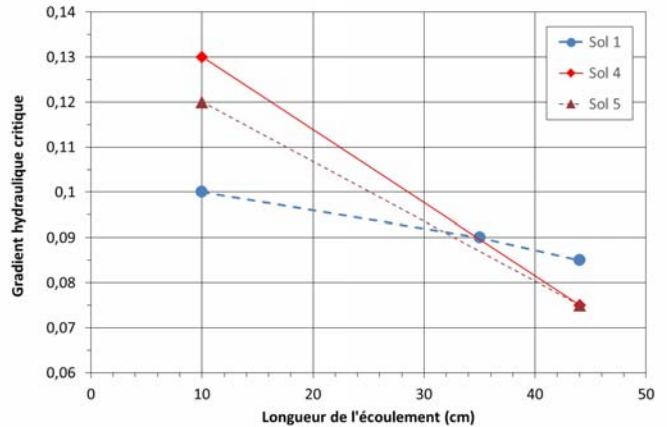


FIGURE 5: GRADIENT HYDRAULIQUE CRITIQUE EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ECOULEMENT.

Ces résultats confirment les résultats des essais de suffusion sous contrainte effective contrôlée [14]. Par ailleurs il importe de noter que cette décroissance du gradient critique avec la longueur de l'écoulement est en complète contradiction avec la gestion des risques des ouvrages. En effet, la comparaison de la valeur du gradient hydraulique mesurée à l'échelle d'un ouvrage, avec la valeur du gradient critique mesurée en laboratoire pourrait aboutir à la conclusion de l'absence de risque, mais la conclusion pourrait être opposée si le gradient critique était mesuré à l'échelle de l'ouvrage.

L'ensemble des essais réalisés peut être interprété par la méthode énergétique et la Figure 6 présente la masse érodée en fonction de l'énergie dissipée à l'état permanent.

Pour chacun des 5 sols testés, nous pouvons noter que la classification de sensibilité est la même, quelle que soit la taille de l'échantillon.

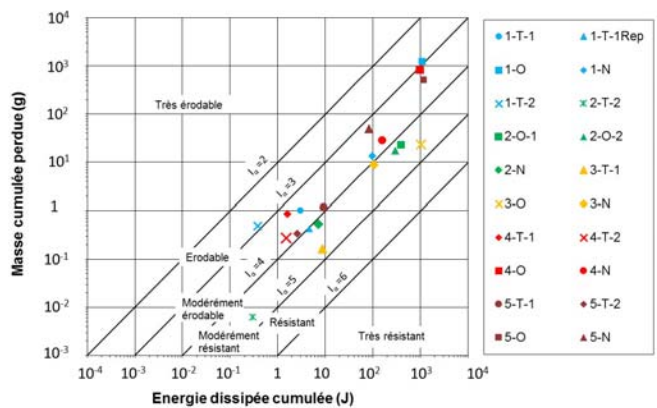


FIGURE 6: MASSE SECHE ERODEE EN FONCTION DE L'ENERGIE DISSIPEE A L'ETAT PERMANENT.

Donc contrairement à la valeur du gradient hydraulique critique, la classification de la sensibilité à la suffusion n'est pas influencée par la taille de l'échantillon.

Influence de l'historique de chargement hydraulique

Des essais sur le sol 6 ont été menés à l'aide de l'érodimètre triaxial suivant deux historiques de chargement hydrauliques, dénommé « a » et « b » et représentés sur la Figure 7. La deuxième lettre du nom des échantillons désigne le chargement hydraulique.

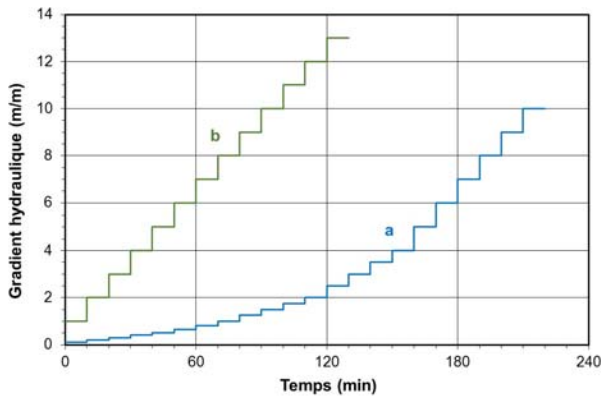


FIGURE 7: HISTORIQUES DE CHARGEMENTS HYDRAULIQUES APPLIQUES.

Avec l'objectif de déterminer de manière systématique l'initiation de la suffusion, le gradient critique d'initiation de la suffusion est associé à la première augmentation relative de 10% de la conductivité hydraulique. Le gradient critique apparaît plus élevé dans le cas du chargement hydraulique « b » (cf. Figure 8). Le sol apparaît donc plus résistant à l'initiation du phénomène lors d'un accroissement plus rapide du chargement hydraulique. Cette influence de l'historique de chargement hydraulique a aussi été observée par Luo et al. [15] qui ont notamment conclu qu'un chargement à long terme amène une réduction du gradient hydraulique nécessaire au développement de la suffusion.

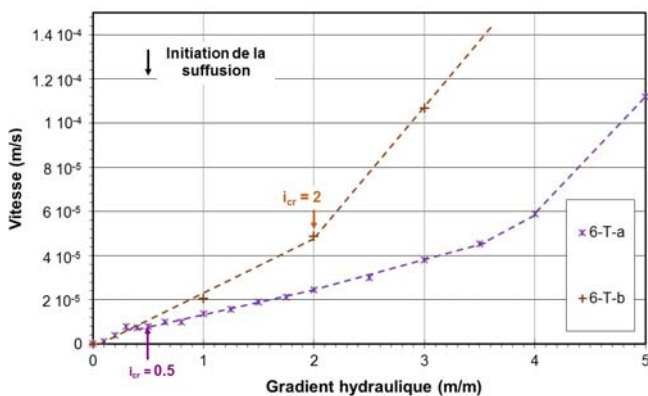


FIGURE 8: VITESSE D'ÉCOULEMENT EN FONCTION DU GRADIENT HYDRAULIQUE.

L'évolution de la masse érodée sèche en fonction de l'énergie dissipée est différente pour les deux historiques de

chargement hydraulique (cf. Figure 9). Toutefois, à l'état permanent (signalé par un point noir sur la Figure 9) les valeurs de l'indice de résistance à l'érosion sont très proches : 3,29 et 3,64 respectivement pour les chargements « b » et « a ». Cela permet une même classification de ce sol, quel que soit le chargement appliqué, en l'occurrence modérément érodable.

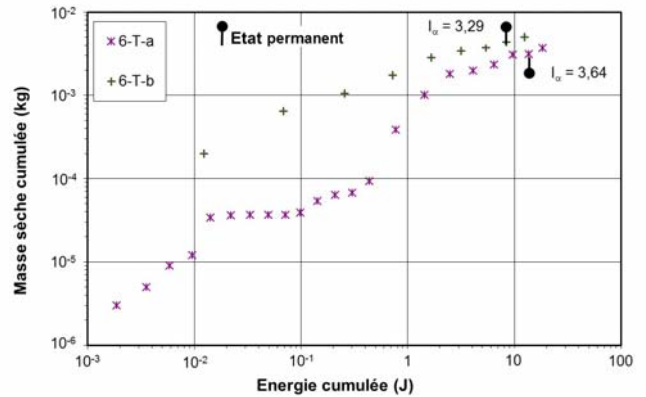


FIGURE 9: MASSE SECHE CUMULEE EN FONCTION DE L'ENERGIE CUMULEE (ESSAIS 6-T-A & B).

Des essais sur les 5 autres sols ont également été réalisés avec plusieurs historiques de chargement hydraulique : gradient constant, gradient croissant par palier et débit imposé [16]. Cette influence de l'historique de chargement sur la valeur du gradient hydraulique critique et l'unicité des valeurs de I_a , quel que soit cet historique de chargement ont également été obtenues.

Influence de la direction de l'écoulement

A l'aide de l'érodimètre multidirectionnel, 2 échantillons du sol 3 ont été sollicités avec un écoulement horizontal (essai 3-N-H) et un écoulement vertical descendant (3-N-V). Ces échantillons ont été fabriqués par pistonnage et couches successives de 5 cm d'épaisseur pour limiter l'anisotropie du sol et en visant la même densité sèche initiale.

Dans ce dispositif, le volume de sol sollicité par l'écoulement horizontal est inférieur au volume de sol sollicité sous écoulement vertical. La masse érodée sèche est donc plus limitée dans le cas de l'essai sous écoulement horizontal (cf. Figure 10) mais l'énergie dissipée également.

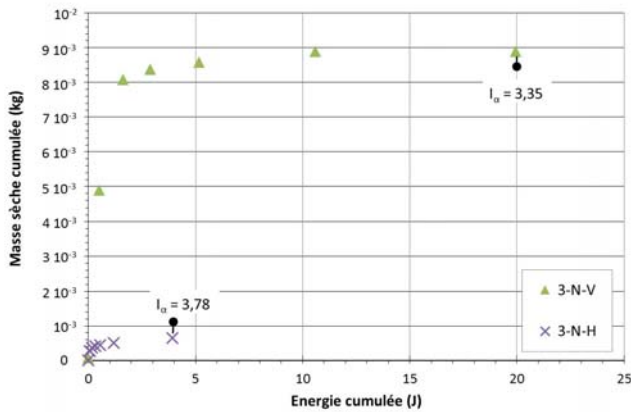


FIGURE 10: MASSE SECHE CUMULEE EN FONCTION DE L'ENERGIE CUMULEE (ESSAIS 3-N-V & H).

L'indice de résistance à l'érosion est déterminé à l'état permanent pour les deux essais et sa valeur est comprise entre 3,35 (3-N-V) et 3,78 (3N-H). Pour les deux directions d'écoulement, la classification de ces échantillons est donc identique (modérément érodable). Les sols 1, 2 et 4 ont également été testés par Le [12] suivant les 2 directions d'écoulement et l'unicité de classification a également été obtenue.

Synthèse de l'étude paramétrique

L'indice de résistance à l'érosion I_α est calculé à l'état permanent ce qui permet de prendre en compte l'ensemble des étapes du processus de suffusion quelle que soit sa cinétique. L'influence sur I_α , de la taille des échantillons, de l'historique de chargement et de la direction de l'écoulement apparaît très limitée. Cette approche basée sur I_α est donc adaptée pour étudier, à l'échelle d'un ouvrage réel, la sensibilité des sols qui le constituent.

Etude statistique de la susceptibilité à la suffusion

En raison du grand linéaire des ouvrages en terre et des hétérogénéités des sols, il est très difficile de caractériser la sensibilité à la suffusion des différents sols. Néanmoins, une analyse statistique peut être effectuée afin d'optimiser la campagne expérimentale. A l'aide de l'érodimètre triaxial, un programme expérimental a été réalisé pour étudier la sensibilité à la suffusion de 31 échantillons de sols non plastiques ou de faible plasticité [17].

A partir d'une étude bibliographique des critères granulométriques susmentionnés et des études paramétriques réalisées sur la suffusion [10], [18], quatorze paramètres physiques ont été sélectionnés. Une analyse statistique multivariée a permis d'aboutir à une corrélation entre l'indice de résistance à l'érosion et l'ensemble de ces paramètres. Toutefois certains paramètres apparaissaient difficiles à

mesurer pour un usage en ingénierie et certains pouvaient être corrélés entre eux. Une analyse statistique en composantes principales a alors été effectuée afin d'identifier les principaux paramètres, tout en privilégiant les paramètres aisément mesurables sur les ouvrages existants. En distinguant les sols de distributions granulométriques discontinue et continue, deux corrélations sont proposées pour estimer l'indice de résistance à l'érosion.

Pour les sols à distribution granulométrique discontinue, l'analyse de 21 échantillons conduit à l'estimation suivante de I_α :

$$I_\alpha = -37,62 + 0,67 \gamma_d + 0,64 \varphi + 0,09 \text{ Finer KL} - 0,03 \text{ VBS} - 1,43 P + 0,63 G_r + 0,76 d_5 - 0,97 d_{60} + 0,61 d_{90} \quad (R^2 = 0,88) \quad (3)$$

avec γ_d : le poids volumique sec ; φ : l'angle de frottement interne ; *Finer KL* : le pourcentage de fines correspondant à la valeur minimale du rapport H/F du critère de Kenney et Lau [3] ; *VBS* : la valeur au bleu de méthylène ; *P* (pourcentage < 63 μ m) et *Gr* sont issus du critère de Chang et Zhang [5] avec $Gr = d_{max}/d_{min}$ avec d_{max} et d_{min} les diamètres caractéristiques de la fraction lacunaire ; d_5 , d_{60} et d_{90} : les diamètres à respectivement 5%, 60% et 90% de tamisât cumulé ; R^2 : coefficient de corrélation.

L'analyse de 10 échantillons à distribution continue conduit à :

$$I_\alpha = -26,34 + 0,43 \gamma_d + 0,66 \varphi - 0,16 \text{ Finer KL} + 1,15 \text{ VBS} + 0,37 P + 6,82 d_5 - 1,26 d_{60} \quad (R^2 = 0,99) \quad (4)$$

Ainsi à partir de la détermination du poids volumique sec, de la distribution granulométrique, de la valeur au bleu de méthylène et de l'angle de frottement interne, il est possible d'estimer la sensibilité à la suffusion. Par ailleurs en donnant la possibilité de mesurer uniquement les paramètres utilisés dans les équations (3) et (4), cette approche permet d'optimiser les campagnes de caractérisation avec l'optique de mieux prendre en compte la variabilité des sols en place.

Etude à l'échelle d'un ouvrage réel

A l'échelle de l'ouvrage, il importe certes de représenter au mieux la variabilité des sols en présence, mais il convient aussi de prendre en compte la variation spatiale du chargement hydraulique. En effet même si nous considérons un barrage dont le niveau d'eau du réservoir évolue peu, la sollicitation hydraulique appliquée sur une couche de sol donnée dépend de la position de cette couche et de la conductivité hydraulique du sol.

Pour exprimer la puissance dissipée dans les couches de sol constituant le noyau d'un barrage, nous utilisons l'équation (1), la loi de Darcy ainsi que 3 hypothèses : (i) la perte de charge dans le filtre amont est négligée, (ii) la charge dans le filtre aval est négligée et (iii) l'écoulement est supposé horizontal dans la couche de sol considérée. Ainsi la

puissance dissipée par l'écoulement dans une couche peut être exprimée par :

$$P_{flow} = \frac{K_{sat} \gamma_w h^3 S}{L_{AB}} \quad (5)$$

avec K_{sat} : la conductivité hydraulique du sol, h : la charge hydraulique amont, S la section de la couche considérée et L_{AB} : la longueur de la couche.

Sur le type d'ouvrage considéré, la conductivité hydraulique est estimée à l'aide de la corrélation proposée par Malenfant-Corriveau [19] qui s'exprime par :

$$K_{sat} = 0.024622 \alpha^{0.7825} \quad \alpha \geq 0,01 \text{mm}^2 \quad (6)$$

$$K_{sat} = 0.1264 \alpha^{1.1377} \quad \alpha < 0,01 \text{mm}^2 \quad (7)$$

avec
$$\alpha = d_{10}^2 \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (8)$$

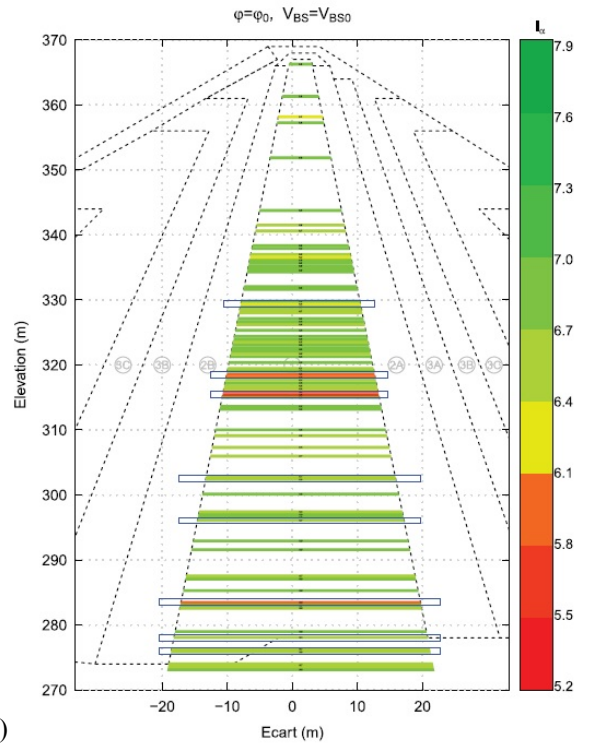
n étant la porosité et d_{10} le diamètre correspondant à 10% de tamisât cumulé.

L'ouvrage étudié par l'approche proposée est un barrage zoné nord-américain, d'une hauteur de 90 m, d'une largeur à la base de 300 m et de 447 m de long. Cet ouvrage est fondé sur un bedrock rocheux et le noyau est construit par compactage en couches successives de moraine glaciaire de faible plasticité et de distribution granulométrique continue.

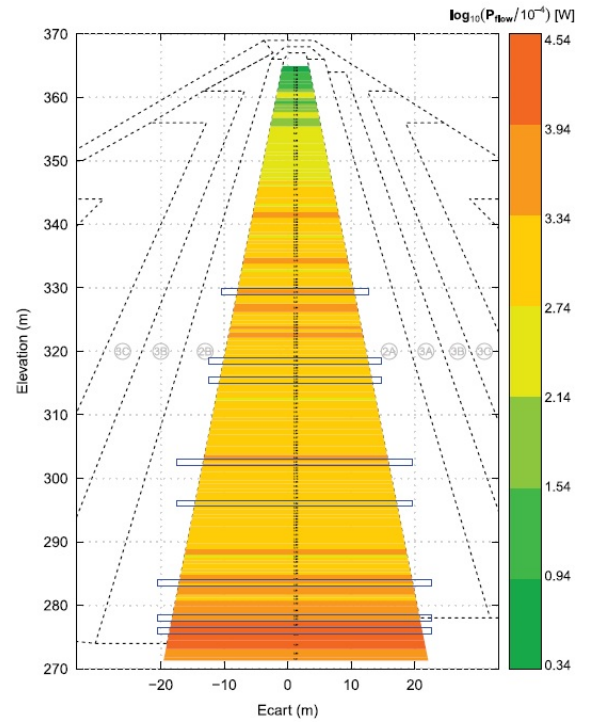
Pour l'ensemble de la construction de l'ouvrage, la moraine a été extraite à partir d'un même gisement, ce qui permet de considérer que la valeur au bleu de méthylène et celle de l'angle de frottement interne sont sensiblement constantes (0,7g/100g et 37° respectivement). La densité en place, la teneur en eau ainsi que la distribution granulométrique ont fait l'objet de mesures tout au long de la construction.

A partir de l'ensemble de ces mesures, 122 couches de moraine ont pu être identifiées et la valeur de chacun des paramètres de l'équation (4) a pu être déterminée. Ainsi la sensibilité à la suffusion pour chaque couche de moraine a pu être estimée, dont la variabilité est illustrée par la Figure 11(a).

La conductivité hydraulique de chaque couche de sol a été estimée par les équations (6) à (8). Ainsi pour chaque couche, la charge amont peut être identifiée, la conductivité hydraulique peut être estimée et la puissance peut être déterminée par l'équation (5). Les valeurs obtenues sont représentées sur la Figure 11(b).



(A)



(B)

FIGURE 11: PROFILS TRANSVERSAUX DE VALEURS ESTIMEES DE : (A) INDICE DE RESISTANCE A L'EROSION I_{α} ; (B) PUISSANCE DISSIPEE PAR L'ECOULEMENT. ZONES SENSIBLES ENTOUREES D'UN RECTANGLE.

Pour chacune des couches, la valeur de l'indice de résistance à l'érosion et celle de la puissance sont comparées à leur valeur moyenne respective. La conjonction d'une valeur plus faible d'indice de résistance à l'érosion (ce qui signifie un sol plus sensible à l'érosion) et d'une valeur plus élevée de puissance (signifiant une sollicitation hydraulique plus élevée) permet d'identifier les zones les plus sensibles. Ces zones sont signalées par un rectangle sur les Figures 11(a) et 11(b).

Conclusion

Un indice de résistance, basé sur la masse érodée et l'énergie dissipée est utilisé afin de classer la sensibilité des sols à la suffusion. Trois érodimètres complémentaires ont été utilisés pour s'assurer que cette classification n'est pas significativement affectée par des effets d'échelles spatiale (taille des échantillons, direction d'écoulement) et temporelle (historique de chargement hydraulique). À l'aide d'une analyse statistique, la sensibilité à la suffusion est également estimée à partir de paramètres aisément mesurables. L'ensemble de cette approche permet la caractérisation de la distribution spatiale de la sensibilité à la suffusion à l'échelle d'un noyau de barrage zoné. Sa confrontation avec la distribution de la puissance permet l'identification des zones les plus sensibles de l'ouvrage.

Remerciements

Les auteurs remercient la Région des Pays de la Loire, la Compagnie IMSRN, le Ministère Education and Training du Vietnam et le China Scholarship Council pour leur soutien financier. Les auteurs remercient également Jean-Marie Konrad de l'Université Laval pour ses conseils.

Références

- [1] Fry J.J., Vogel A., Royet P., Courivaud J.R. (2012). *Dam failures by erosion: lessons from ERINOH data bases*. Proceedings of ICSE-6, 27–31 August, Paris, pp. 273–280.
- [2] Fell R., Fry J. J. (2013). *Erosion in geomechanics applied to dams and levees*. S. Bonelli Ed., ISTE—Wiley, London, pp. 1–99.
- [3] Kenney T., Lau D. (1985). *Internal stability of granular filters*. Canadian Geotechnical J. Vol. 22, N°2, pp. 215–225.
- [4] Wan C.F., Fell R. (2008). *Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations*. J. Geotech. Geoenviron. Eng. Vol. 134, N°3, pp. 401–407.
- [5] Chang D.S., Zhang L.M. (2013). *Extended internal stability criteria for soils under seepage*. Soils Found. Vol. 5, N°4, pp. 569–583.
- [6] Indraratna B., Israr J., Rujikiatkamjorn C. (2015). *Geometrical method for evaluating the internal instability of granular filters based on constriction size distribution*. J. Geotech. Geoenviron. Eng. Vol. 141, N°10, 04015045
- [7] Skempton A.W., Brogan J.M. (1994). *Experiments on piping in sandy gravels*. Géotechnique Vol. 44, N°3, pp. 440–460.
- [8] Nguyen H.H., Marot D., Bendahmane F. (2012). *Erodibility characterisation for suffusion process in cohesive soil by two types of hydraulic loading*. La Houille Blanche N° 6, pp. 54–60.
- [9] Marot D., Rochim A., Nguyen H.H., Bendahmane F., Sibille L. (2016). *Assessing the susceptibility of gap graded soils to internal erosion: proposition of a new experimental methodology*. Natural Hazards, Volume 83, Issue 1, pp. 365–388.
- [10] Bendahmane F., Marot D., Alexis A. (2008). *Experimental parametric study of suffusion and backward erosion*. J. Geotech. Geoenviron. Eng. Vol. 134, N°1, pp. 57–67.
- [11] Sail Y., Marot D., Sibille L., Alexis A. (2011). *Suffusion tests on cohesionless granular matter*. European J. of Env. and Civil Eng., Vol. 15, N°5, pp.799–817.
- [12] Le V. T. (2017). *Development of a new device and statistical analysis for characterizing soil sensibility face suffusion process*. PhD Thesis. Université de Nantes, France.
- [13] Marot D., Bendahmane F., Konrad J.M. (2011). *Multichannel optical sensor to quantify particle stability under seepage flow*. Canadian Geotech. J. Vol. 48, pp. 1772–1787.
- [14] Marot D., Le V.D., Garnier J., Thorel L., Audrain P. (2012). *Study of scale effect in an internal erosion mechanism*. European J. of Env. and Civil Eng. Vol. 16, N°1, pp.1–19.
- [15] Luo Y.L., Qiao L., Liu X.X., Zhan M.L., Sheng J.C. (2013). *Hydro-mechanical experiments on suffusion under long-term large hydraulic heads*. Nat. Hazards 65, pp. 1361–1377.
- [16] Rochim A., Marot D., Sibille L., Le V.T. (2017). *Effect of hydraulic loading history on the characterization of suffusion susceptibility of cohesionless soils*. J. Geotech. Geoenviron. Eng. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001673.
- [17] Le V.T., Marot D., Rochim A., Bendahmane F., Nguyen H.H. (2017). *Suffusion susceptibility investigation by energy based method and statistical analysis*. Canadian Geotechnical J. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0024>
- [18] Marot D., Bendahmane F., Nguyen H.H. (2012). *Influence of angularity of coarse fraction grains on internal erosion process*. La Houille Blanche, International Water Journal, n° 6, 2012, pp.47-53.
- [19] Malenfant-Corriveau, M. (2016). *Propriétés hydrauliques d'un till compacté possédant un faible pourcentage de particules argileuses*. Master's Thesis. Université Laval.