

Identification du risque d'érosion interne sur les digues de l'Isère et du Drac

Identification of erosion risk on the Isère and Drac river levees

Monnet J., Plé O., Nguyen D.M.

UJF-Grenoble 1, CNRS UMR 5521, Laboratoire 3SR, Grenoble

RÉSUMÉ : Dans cet article, nous présentons une synthèse des mesures utilisées pour le diagnostic des digues de l'Isère et du Drac (20km) vis-à-vis du risque de suffusion. Ces mesures comprennent des reconnaissances géophysiques par panneau électrique, des reconnaissances pressiométriques, des essais d'identification des sols et des essais avec un nouveau dispositif expérimental in situ l'Essai d'Erosion Transverse (Cross Erosion Test - CET). Cet essai comprend l'injection, dans un premier forage, de l'eau claire et du pompage dans un autre forage de l'eau chargée en particules de sol érodé. Les premiers résultats permettent d'identifier le risque de suffusion dans un matériau granulaire comme rencontré dans les digues de l'Isère et du Drac et de mesurer la masse des particules érodées de diamètre inférieur à 1,5 mm.

ABSTRACT: In this paper, we present a summary of the measurements carried out for the diagnosis of the Isère and Drac river levees (20km) for the risk of suffusion. These measurements include geophysical surveys by electrical panel, pressuremeter tests, identification of the soil and test with a new in-situ experimental device The Cross Erosion Test (CET). This test includes injection, in a first drilling of clean water and recovered in another one of water charged with particles. Preliminary results show that risk of suffusion can be characterized within a granular matter as found on the Isère and Drac river levees. Measurements of the mass of eroded particles have been undertaken for size smaller than 1.5 mm.

MOTS CLEFS : Erosion, Reconnaissance, Essai In-situ, Panneau-Electrique, Pressiomètre, Erosion Transverse

KEYWORDS: Erosion, Survey, In-Situ Test, Electrical panel, Pressuremeter, Cross-Erosion

1. INTRODUCTION

L'érosion interne se développe à partir de l'infiltration de l'eau dans le sol. Elle est la cause principale des incidents les plus graves observés sur les barrages et les digues. Une étude récente (Foster *et al.*, 2000) montre que pour les barrages présentant des ruptures hydrauliques, 46% des sinistres seraient dus au risque d'érosion interne. En France, 70 cas critiques ont déjà été détectés. A la suite des inondations de décembre 2003, les autorités ont décidé de développer des plans d'urgence pour empêcher tout accident majeur. Pour prévenir, il est nécessaire d'étudier et d'identifier les phénomènes d'érosion interne susceptibles de se développer dans les digues et les barrages. Quatre types d'érosion interne peuvent se développer : l'évolution des défauts dans la matrice de sol, l'érosion régressive, la suffusion interne et la suffusion à l'interface entre deux sols. La suffusion est un processus interne d'érosion où des particules fines de sol sont déplacées par infiltration à travers la matrice de sol. Un état de l'art peut être trouvé dans la littérature (Fell et Fry, 2007) et plusieurs études en laboratoire ont été réalisées sur le sujet (Wan et Fell, 2004) avec principalement la même technique expérimentale (Hole Erosion Test - HET).

1.1 Zone d'étude

Le site qui a été choisi comme zone d'étude par le SYndicat Mixte des Bassins Hydrauliques de l'Isère (SYMBHI) pour contrôler les digues et détecter les zones nécessitant un renforcement éventuel est la partie de l'Isère en amont de Grenoble, au niveau du campus de Saint Martin d'Hères (Figure 1). Dans cette zone une rupture potentielle a été identifiée au niveau des pépinières Paquet. L'étude a lieu sur les digues en rive droite et en rive gauche de l'Isère.

Sur cette zone, il a été réalisé :

- des essais pressiométriques à cycle,

- des reconnaissances par panneaux électriques,
- des prélèvements d'échantillons pour des analyses en laboratoire.



Figure 1 : La zone d'étude choisie

2. IDENTIFICATION DES SOLS PAR LA MÉTHODE DES CLUSTERS

2.1 Classement par cluster

Des essais pressiométriques cycliques (24) ont été réalisés lors des reconnaissances des digues de l'Isère sur 18 forages. Ils ont été regroupés avec les 185 essais pressiométriques de la reconnaissance du tunnel Nord de Grenoble, pour détecter les familles de sol auxquelles pourraient s'apparenter les sols des digues de l'Isère. Pour rendre automatique le classement des essais pressiométriques par couche géotechnique (avec des valeurs identiques de pression limite p_l et du module élastique E° par couche) nous avons utilisé la méthode des clusters

(Monnet et Broucke, 2012; Monnet *et al.*, 2012). Cette méthode permet de classer des séries de données adimensionnelles en fonction de leur distance relative. Les distances ont été mesurées par la méthode Cosinus. Les résultats montrent que :

- la majeure partie des digues est constituée du cluster 3 (Figure 2), qui devrait correspondre à la famille 11 (sables gris et graviers),
- le reste de la structure des digues est constitué du cluster 1 qui devrait correspondre à la famille 8 (sables compacts) dans le haut des forages SC252, du cluster 6 qui devrait correspondre à la famille 1 (remblais de surface) dans le haut du forage SC252, du cluster 8 qui devrait correspondre à la famille 10 (sables gris faiblement argileux) pour le bas des forages SC230 et SC250 et du cluster 9 qui s'apparente à la famille 12 (sables gris) pour le milieu du forage SC136, et le haut de SC242 (Figure 2) et de SC248.

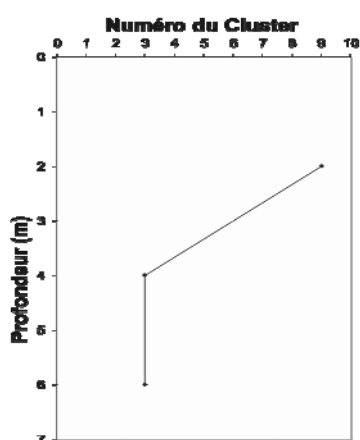


Figure 2 : Analyse par cluster du forage SC242

Tableau 1 : Relation entre les clusters et la résistivité des sols

Forage	Prof. (m)	N° Cluster	ρ (Ohm.m)
SD106	4	3	425
	6	3	425
SC230	2,5	3	1500
	5,25	3	1500
	7	8	425
SC238	2	3	1500
	4	3	1500
	6	9	1500
SC242	6	3	290
SC248	2	9	775
	4	3	1300
	6	3	1300
SC250	2,5	3	775
	5	3	775
	7	8	110
SD252	2	1	500-1500
	4	3	450
	6	3	450

2.2 Relation entre les clusters et la résistivité des sols

Une comparaison entre les numéros des clusters et la résistivité des couches a été entreprise (Tableau 1). On constate que :

- il n'y a pas de relation directe entre le cluster et la résistivité. Par exemple le cluster 3 correspond à une résistivité élevée (1500 à 1300 Ohm.m) dans les forages SC230, SC238, et SC248, mais à une résistivité faible (425 à 450 Ohm.m) dans les forages SD106 et SD252,
- le passage d'un cluster à un autre correspond généralement au passage d'une gamme de résistivité à une autre (SC230

de 5,25 à 7m ; SC248 de 2 à 4m ; SC250 de 5 à 7m ; SD252 de 2 à 4m).

- il existe une erreur d'interprétation liée à la précision de positionnement (± 1 m) du forage sur la digue, et à l'incertitude inévitable liée à l'analyse inverse par panneau électrique (du simple au triple pour SD252 à 2m).

Tableau 2 : Résultats partiels (forages P252, P112, P120) de l'analyse de stabilité interne géométrique

	Indicateur	P252	P112	P120
Lafleur	$R_r = FOS/d_i$	0,63	13,92	9,64
	FOS (mm)	0,3	71,89	80,59
	Résultats	Instable	Suffusion	Suffusion
Kenney et Lau	H/F min	0,842	1,557	0,341
	Résultats	Instable	Instable	Instable
Kezdi	D'_{15}/d'_{85}	37,45	6,92	7,32
	Résultats	Instable	Instable	Instable
Kovacs	D'_{85}/O_{50}	0,146	0,088	0,107
	Résultats	Instable	Instable	Instable
Fell	Résultats	Stable	Stable	Stable

3. ANALYSE DES COURBES GRANULOMÉTRIQUES POUR QUANTIFIER LE RISQUE D'ÉROSION INTERNE

Le risque principal sur ces digues est celui de l'érosion interne identifié à l'aide de différents critères granulométriques issus de la bibliographie. Pour cela un programme a été construit pour calculer le gradient critique et le risque d'érosion à partir des critères granulométriques des différents sols. Les critères retenus sont ceux de Lafleur (1999), Kenney et Lau (1985), Kezdi (1979), Kovacs (1981) et Fell (2008). Les résultats sont rassemblés sur le Tableau 2. Sur les 18 forages, l'analyse précédente montre une large tendance à l'instabilité (voir Tableau 2). Dans un état sec ces digues (hors cas des crues exceptionnelles) restent stables.

4. CONCEPTION D'UN NOUVEL ESSAI IN SITU DE MESURE DE L'ÉROSION INTERNE – ESSAI CROSS EROSION TEST

4.1 Principe de l'essai

Le principe de l'essai est donné sur la Figure 3. Dans le premier forage, de l'eau claire est injectée avec une charge imposée (h_i) ou un débit volumétrique choisi (Q_i). Dans un second forage, l'eau chargée de particules est analysé. Le débit de sortie (Q_p) est produit par une pompe électrique de forage. Q_p et Q_i sont mesurées, le gradient hydraulique est calculé à l'aide de la formule de Bernoulli et comparé aux différents gradients hydrauliques critiques (Den Adel *et al.*, 1988; Khilar *et al.*, 1985; Terzaghi *et al.*, 1996; Vardoulakis et Papamichos, 2001). Ces paramètres permettent le contrôle des conditions hydrauliques de l'érosion interne. Dans un premier temps, le gradient hydraulique expérimental est comparé avec celui de Terzaghi mis sous la forme :

$$i_c = \rho_d / \rho_w - (1 - n) \quad (1)$$

où n est la porosité du sol, ρ_d la densité sèche du sol et ρ_w la densité de l'eau. Les résultats sont rassemblés dans le Tableau 3.

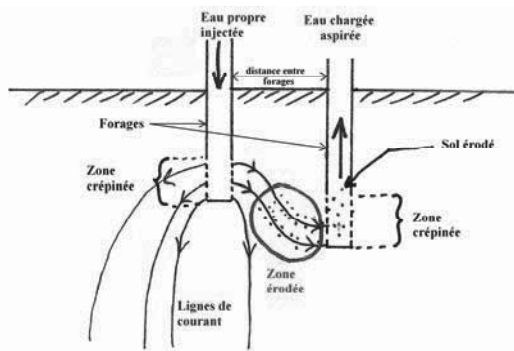


Figure 3 : Le principe de l'essai Cross Erosion Test

Une caméra placée à la sortie analyse (Figure 4-h) l'eau chargée de particules. L'appareil utilise une analyse spectrale. Le calibrage est effectué sur une solution standard de particules à différentes concentrations. La couleur rouge est utilisée pour ajuster la sensibilité de l'appareil. En sortie, les particules extraites du sol sont quantifiées à l'aide d'une balance de précision ($\pm 0,01$ g) (Figure 4-i).

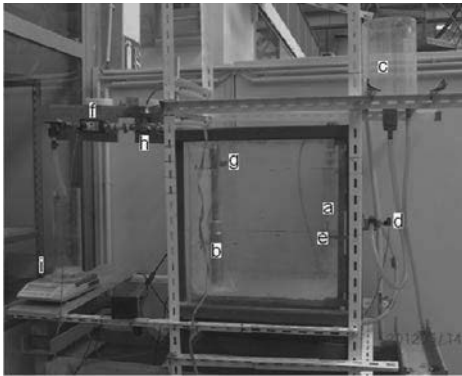


Figure 4 : Le principe de l'essai Cross Erosion Test

4.2 Sol testé

Deux mélanges de sol ont été testés (Tableau 3): le premier (S1) avec 60 % de sable (0/2 mm) et 40 % de gravier (2/20 mm) et le second (S2) avec 75 % de sable (0/2 mm) et 25 % de gravier (2/20 mm). Le coefficient d'uniformité C_u , rapport de d_{60} à d_{10} est respectivement égal à 15,3 pour S1 et à 3,7 pour S2. Ces sols granulaires sont couramment rencontrés dans les digues de l'Isère et du Drac. Le remplissage du réservoir nécessite une attention particulière. Trois techniques peuvent être utilisées, une pluviométrie dans l'air, un remplissage par saturation progressive et enfin, un remplissage après compactage par cloutage puis saturation progressive. La pluviométrie introduit de la stratification et des bulles d'air restent bloquées dans le sol. Le remplissage par saturation progressive permet d'atténuer la stratification mais introduit un défaut de compactage autour des forages. La troisième méthode palie aux défauts des deux précédentes et a été retenue pour les tests. La perméabilité du sol est obtenue directement dans le réservoir à l'aide de la méthode à charge variable. La perméabilité du sol (k) est donnée dans le Tableau 3.

4.3 Résultats expérimentaux

Trente-quatre tests ont été réalisés pour valider l'expérience.

Pour le premier essai avec le sol S2, la charge d'injection maintenue constante (Figure 1-c) est de 0,3 m. La fréquence de la pompe varie entre 25 et 35 Hz. Les paramètres expérimentaux sont mesurés en continu. Les résultats (Figure 5)

sont traduits en termes de gradient hydraulique et comparés au gradient critique de Terzaghi. Pour cet essai aucune érosion interne n'a été détectée.

Tableau 3 : Caractéristiques des deux mélanges

	S1	S2
k (m/s)	$2.24 \cdot 10^{-4}$	$1.45 \cdot 10^{-4}$
n	0,33	0,25
ρ_d (kg/m ³)	1728	1935
d_{10} (mm)	0,26	0,20
d_{15} (mm)	0,33	0,25
d_{30} (mm)	0,517	0,38
d_{60} (mm)	4,00	0,75
d_{85} (mm)	9,67	9,58
C_u	15,3	3,7
i_c (m/m)	1,06	1,19

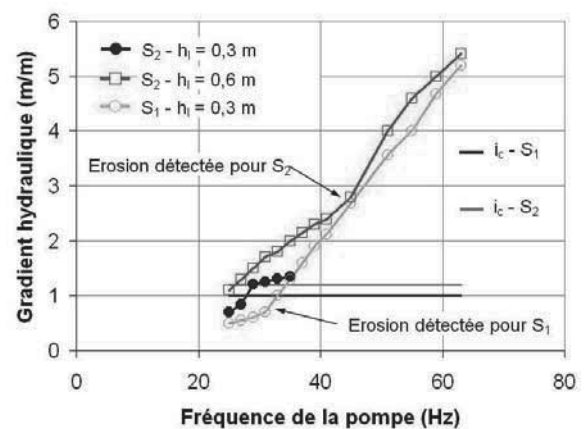


Figure 5 : Evolution du gradient hydraulique en fonction de la fréquence de la pompe – détection de l'érosion

Pour le second essai sur le sol S2, la charge d'injection constante est portée à 0,6 m. La fréquence de la pompe varie de 25 à 63 Hz. L'érosion interne est détectée pour une fréquence de 45 Hz. A partir de cet instant, le gradient hydraulique expérimental augmente (Figure 5), des particules érodées sont détectées avec la caméra pour une concentration maximale de 43,3 g/l (Figure 6). La masse cumulée érodée est égale à 210 g (Figure 7).

Pour la dernière expérience avec le sol S1, la charge hydraulique (Figure 4-c) est imposée égale à 0,3 m. La fréquence de la pompe varie entre 25 et 63 Hz. L'évolution du gradient hydraulique est montrée sur la Figure 5. Ce gradient augmente rapidement après 35 Hz qui correspond au seuil d'érosion. L'érosion interne est détectée pour un gradient de 0,9 qui est inférieur au gradient de Terzaghi (Figure 6). Cela se traduit par une rupture de pente sur la courbe charge fréquence de la Figure 5 et indique une variation de perméabilité dans le milieu testé. La masse totale érodée mesurée est égale à 520g en fin d'essai (Figure 7).

4.4 Discussion des résultats expérimentaux

Parmi les critères (paragraphe 3) qui utilisent les diamètres respectifs des particules pour identifier un risque de suffusion, nous avons retenu le critère de Lafleur (1999) car il suppose l'existence d'un filtre à l'aval pour retenir un sol potentiellement suffisant à l'amont. Dans la mesure où la pompe est équipée d'une grille, ce critère semble plus particulièrement adapté. Il considère le rapport entre le diamètre de filtration FOS (Filtration Opening Size) et le diamètre d_i de la particule entraînée (calculée par le critère), pour prévoir soit un colmatage, soit une filtration, soit une suffusion (Equation 2).

Dans l'expérience considérée FOS est égal à 1,5 mm et d_f est le diamètre des particules érodées dépendant de C_u :

$$FOS/d_f < 1, \quad 1 < FOS/d_f < 5, \quad 5 < FOS/d_f \quad (2)$$

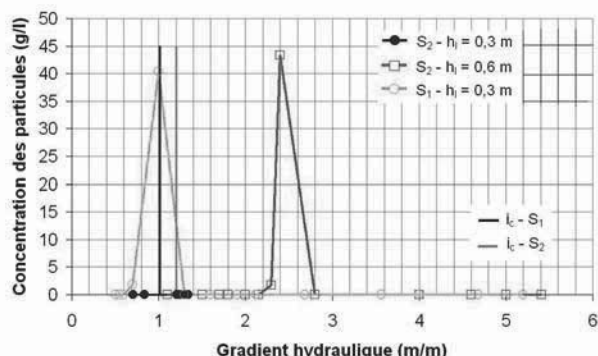


Figure 6 : Evolution de la concentration du sol érodé

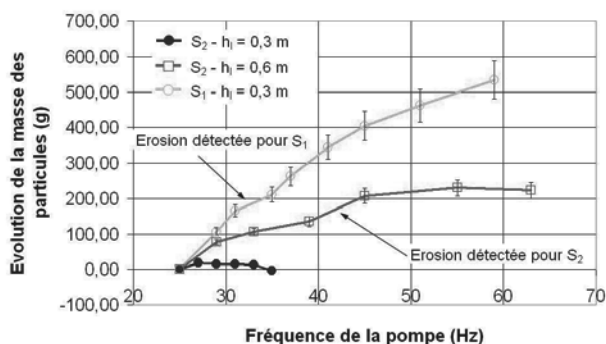


Figure 7 : Evolution de la masse de sol extraite

Tableau 4 : Critère d'érosion selon Lafleur (1999)

	FOS (mm)	C_u	d_f (mm)	FOS/ d_f	Résultats
S ₁	1,5	15	0,517	2,9	Auto-filtration
S ₂	1,5	4	9,58	0,15	Colmatage

Pour le sol S1 la condition $C_u > 6$ est vérifiée et la valeur de d_f est égale à 0,517 mm, soit d_{30} . Le critère indique alors que le sol est en auto-filtration selon la terminologie de Lafleur (Tableau 4). Ce phénomène correspond à une suffusion puis à une stabilisation. Ce phénomène est effectivement observé expérimentalement pour un gradient hydraulique de 0,9. Par la suite, une stabilisation s'opère.

Pour le sol S2, la condition $C_u \leq 6$ est vérifiée et la valeur de d_f est égale à 9,58 mm, soit d_{85} . Le critère indique alors un colmatage (Tableau 4) la particule entraînée étant plus grande que l'ouverture du filtre. Cependant, l'expérience n'est pas en accord avec la théorie et l'érosion est effective pour un gradient hydraulique de 2,6 bien supérieur à celui de Terzaghi (1,19). Ce phénomène érosif a été observé par de nombreux auteurs (Arulanandan et Perry, 1983; Den Adel *et al.*, 1988; Khilar *et al.*, 1985; Terzaghi *et al.*, 1996; Vardoulakis et Papamichos, 2001; Faure *et al.*, 2006) qui montrent qu'un sol peut être stable du point de vue granulométrique mais qu'il devient instable pour des gradients hydrauliques trop importants.

5. CONCLUSIONS

Cet article traite des méthodes utilisées pour identifier les sols des digues de l'Isère, de façon à préciser le risque d'érosion. La méthode des clusters appliquée aux résultats pressiométriques, a été choisie pour définir les différentes couches de sols présentes dans les digues.

Par la suite, la corrélation avec les mesures de résistivité électrique a montré que les variations de résistivités permettent de définir les interfaces entre couches, et que la valeur de la résistivité n'est pas en relation directe avec la nature des couches.

L'analyse granulométrique du sol des digues de l'Isère, en utilisant les critères géométriques de la bibliographie a montré la susceptibilité de ces sols à l'érosion interne.

Un nouvel essai permettant de mesurer le risque de suffusion a été présenté. Cet appareil injecte de l'eau claire dans un forage et recueille l'eau chargée de particules dans un forage de prélèvement. Par une analyse d'images, il permet de détecter l'érosion (critère géométrique), mais il permet également d'imposer un gradient hydraulique au sol (critère hydraulique). Il combine en cela les deux paramètres principaux qui conduisent à une érosion interne du sol. Cet essai prédictif pour la suffusion, nous renseigne sur la valeur du gradient hydraulique à l'origine du phénomène. Il est donc particulièrement bien adapté aux reconnaissances sur les ouvrages hydrauliques. Il sera d'ailleurs prochainement utilisé in-situ pour caractériser le risque de suffusion des digues de l'Isère et du Drac.

6. REFERENCES

Den Adel H., Bakker K.J., Klein M., Breteler B., 1988, Internal Stability of Minestone, *Proceedings International Symposium on Modelling Soil-Water-Structure Interaction*, International Association for Hydraulic Research (IAHR) Balkema Publishers, pp. 225–231.

Faure Y.H., Baudoin A., Pierson P., Plé O., 2006, A contribution for predicting geotextile clogging during filtration of suspended solids, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 24 N°1, pp. 11–20.

Fell R., Fry J.J., 2007, Internal Erosion of Dams and Their Foundations, Taylor & Francis Publishers.

Foster M., Fell R., Spannagle M., 2000, The statistics of embankment dam failure and accidents, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, pp. 1000–1024.

Kenney T.C., Lau D., 1985, Internal stability of granular filters, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, pp. 215–225.

Khilar K.C., Fogler H.S., Gray D.H., 1985, Model for piping-plugging in earthen structures, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 111 N°7, pp.833–846.

Kovacs G., 1981. Seepage hydraulics. In: *Development in Water Science* 10. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, The Netherlands, pp. 730.

Lafleur J., 1999, Selection of géotextiles to filter broadly graded cohesionless soils, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 17, pp. 299–312.

Monnet A., 1998, Boullance, érosion interne, renard. Les instabilités sous écoulement, *Revue Française de géotech.*, Vol. 82, pp.3–10.

Monnet J., Broucke M., 2012, The use of a cluster analysis in a Ménard pressuremeter survey, *ICE - Geotechnical Engineering*, London, Volume 165, Issue 6, 367–377.

Monnet J., Huhes J., Dafin J., 2012, Cluster analysis and pressuremeter survey – the Gray Harbor case, *ISC4 Conference, Porto de Galinhas*, 911-919

Skempton A.W., Brogan J.M., 1994, Experiments on piping in sandy gravels, *Géotechnique*, Vol. 44 N°3, pp. 440–460.

Vardoulakis I., Papamichos E., 2001, A continuum theory for erosion in granular media, *Actes de la journées scientifique internationale*, Cermes 21, pp. 41–60.

Wan C.F., Fell R., 2004, Laboratory tests on the rate of piping erosion of soils in embankment dams, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27 N°3, pp. 295–303.