

Influence du confinement et du gradient hydraulique sur l'érosion interne des sols sablo-argileux

Fateh Bendahmane

GeM, UMR CNRS 6183 – IUT de Saint-Nazaire, BP 420, 44606, Saint-Nazaire Cedex, France; fateh.bendahmane@univ-nantes.fr

RÉSUMÉ. L'érosion interne est l'une des principales causes des instabilités d'ouvrages hydrauliques en terre (digue, levée, barrage ...). Les désordres constatés sur des ouvrages récents soulignent la nécessité d'une meilleure compréhension et quantification des phénomènes qui régissent l'érosion interne. L'entraînement et le transport de grains par les écoulements internes affectent la distribution granulométrique, modifient la porosité ainsi que les caractéristiques mécaniques et hydrauliques. Une campagne expérimentale a été réalisée sur des échantillons sablo-argileux saturés, consolidés et confinés de manière isotrope. Ces échantillons sont soumis à un écoulement descendant sous gradient hydraulique constant. L'étude paramétrique réalisée met en évidence l'existence d'un premier gradient seuil qui induit une érosion d'argile, qui s'accroît avec la pression de confinement. Une érosion de sable et d'argile se produit pour un second gradient seuil qui décroît avec le confinement. Cette étude a montré le rôle complexe du confinement sur l'érosion interne.

MOTS-CLÉS : Erosion interne, étude paramétrique, sol sablo-argileux.

ABSTRACT. Internal erosion is one of the main causes of instabilities within hydraulic earth structures (dike, levee, dam,...). The occurrence of breach in new structures underlines the urgency to quantify phenomena induced by internal erosion. Entrainment and migration of some particles under flow affect the porosity and grain size distribution, which change the hydraulic and mechanical characteristics. An experimental study is realized for saturated and consolidated sand / clay samples to provide a new data for the effect of confining pressure on the internal erosion kinetics.

The results show a first threshold value of hydraulic gradient to obtain a clay departure and the rate of erosion increases with the confining pressure. A second threshold induces erosion of sand and clay. In this case, the rate of erosion decreases with the confining pressure. This study underlines the complexity of the confining pressure influence on internal erosion.

KEYWORDS : Internal erosion, parametric study, sand-clay soil.

1. INTRODUCTION

L'interaction entre l'eau et les ouvrages hydrauliques en terre peut générer des dommages très importants voire irréversibles. Foster *et al.* (2000) ont réalisé une étude statistique sur 11 192 ouvrages hydrauliques en terre : 136 ont subi des désordres dont 6% par glissement, 46% par érosion interne et 48% par surverse.

Au sein de ces ouvrages, l'écoulement d'un fluide peut induire une migration de particules solides provoquant une modification des propriétés mécaniques et hydrauliques. La variation induite de la perméabilité peut engendrer des désordres dans les ouvrages, ayant pour origine des pertes d'étanchéité ou des surpressions interstitielles, pouvant aller jusqu'à la rupture. D'après la terminologie la plus courante nous définissons deux principaux phénomènes d'érosion interne : le renard et la suffusion. Le phénomène de renard se traduit par un arrachement régressif des particules

de l'aval du sol vers un milieu extérieur, et en progressant vers l'amont (Lafleur, 1999). Le développement du renard peut générer un conduit continu au sein de l'ouvrage. Le phénomène de suffusion se traduit par une redistribution diffuse des particules dans le sol. La granulométrie globale du sol ne change pas, par contre la perméabilité évolue (Lafleur, 1999).

Les différentes approches proposées pour les critères d'érosion interne méritent d'être complétées puisque des désordres continuent d'apparaître dans des ouvrages en terre, y compris parfois sur des ouvrages récents. Lors des essais réalisés sur des matériaux cohésifs (Lafleur, 1989 et 1999; Skempton et Brogan, 1994; Reddi et Bonala, 1997), l'influence du confinement isotrope n'est pas pris compte. Par contre pour les sols pulvérulents, Papamichos *et al.* (2001) montrent que l'augmentation de la contrainte axiale engendre une augmentation du débit massique de sable arraché, appelé débit massique de production.

Nous présentons dans cet article l'influence du confinement isotrope et du gradient hydraulique sur l'érosion interne. Cette étude est réalisée à l'aide d'un dispositif expérimental réalisée au GeM. Ce prototype nous permet de tester plusieurs paramètres avec la possibilité de détecter et de quantifier en temps réel la présence de particules argileuses ou sableuses dans l'effluent.

2. DESCRIPTION DU PROTOTYPE ET DES ESSAIS

2.1. PRESENTATION DU PROTOTYPE

Le montage expérimental, qui est placé dans une pièce à température contrôlée, se compose de trois cellules triaxiales. Les cellules ont été modifiées pour permettre l'injection d'un fluide dans l'échantillon et la récolte de l'effluent. L'injection est réalisée à l'aide de cellules spécifiques qui assurent une pression constante et permettent la mesure de la masse du fluide injecté. La tête d'injection comporte un lit de billes de verre afin d'uniformiser l'injection tout en limitant les pertes de charges. L'embase des cellules a été modifiée pour éviter tout colmatage du circuit effluent par les particules ou les grains érodés et pour permettre l'utilisation de différents filtres (figure 1).

La perte de masse des échantillons est déterminée par la différence entre la masse de l'effluent et la masse d'eau injectée. Ces mesures sont réalisées par pesée avec une incertitude de l'ordre du dixième de gramme. Afin d'améliorer la précision des mesures et ainsi détecter le départ d'argile, un capteur optique est développé (Bendahmane *et al.*, 2005a) et placé sur la conduite de l'effluent pour mesurer la transparence de celui-ci. Grâce à un étalonnage préalable, cette mesure de transparence permet de déterminer une masse de solide érodé de l'ordre du millièème de gramme.

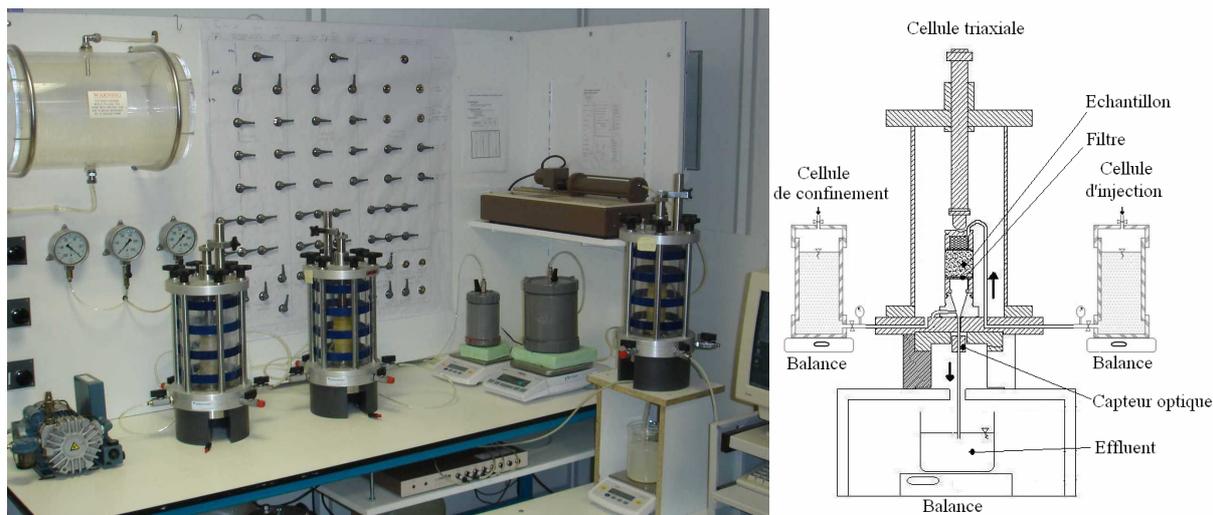
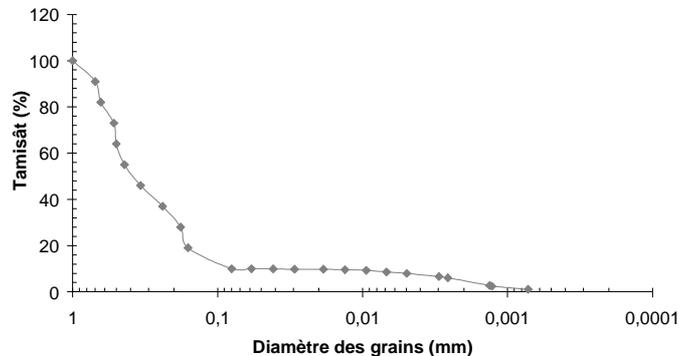


Figure 1 : a) Photo du dispositif.

b) schéma de la cellule triaxiale modifiée et des cellules d'injection et de confinement.

2.2. DESCRIPTIF DES ESSAIS

L'étude paramétrique est réalisée sur des échantillons sablo-argileux constitués de sable de Loire et de kaolinite. Le pourcentage massique d'argile est de 10% et la granulométrie obtenue est donnée par la figure 2 :



Ce protocole a été validé par confrontation avec des essais présents dans la littérature (Bendahmane *et al.*, 2005b). La teneur en eau initiale avant saturation est de 10%, le poids volumique sec est de 17 kN.m^{-3} et l'ouverture des filtres est de 4 mm, afin de permettre le passage de toutes les particules. Le gradient hydraulique est fixé pour chaque essai à une valeur comprise entre 5 et 140 m.m^{-1} . La pression de consolidation puis de confinement est fixée à une valeur comprise entre 100 et 250 kPa. Ces paramètres représentent un sol dense de 6 à 15 m de profondeur, à l'image du matériau d'un noyau de barrage en terre de moyenne dimension.

Le programme expérimental réalisé est résumé dans le tableau suivant :

<i>N° échantillon</i>	<i>i (m.m⁻¹)</i>	<i>σ₃ (kPa)</i>	<i>N° échantillon</i>	<i>i (m.m⁻¹)</i>	<i>σ₃ (kPa)</i>
A8	20	100	A1	20	200
A14	100	//	A2	//	//
A17	20	150	A3	//	//
A18	60	//	A4	40	//
A19	100	//	A5	60	//
A36	140	//	A6	80	//
A18	60	//	A10	90	//
A34	5	200	A9	100	//
A12	10	//	A35	90	250

Tableau 1 : Programme expérimental.

3. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

3.1. DEPART D'ARGILE

L'application d'un gradient hydraulique inférieur à 60 m.m^{-1} engendre une érosion dont la quantité de particules érodées est trop faible pour être quantifiée par pesée. La mesure est donc réalisée par le capteur optique étalonné pour la kaolinite. Pour quantifier l'érosion interne, nous utiliserons le débit massique (équation 1) qui s'exprime par le produit de la teneur massique, déduite de la mesure optique « S_{op} », et du débit d'injection « q_w », sur la section de l'échantillon « s ».

$$q_s = \frac{S_{op} \cdot q_w}{s} \quad [\text{Eq. 1}]$$

La figure 3 présente pour un gradient de 60 m.m^{-1} , l'évolution du débit massique en fonction du temps. Dès la première minute d'essai, le débit massique croît pour atteindre une valeur maximale $q_{s \text{ max}}$ puis décroît brutalement, jusqu'à atteindre une valeur nulle. Par contre un gradient de 5 m.m^{-1} ne provoque pas d'érosion interne.

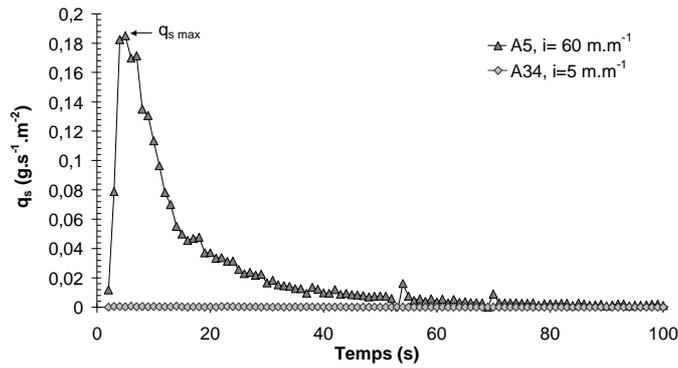


Figure 3 : Courbe type de débit massique en fonction du temps ($\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$).

Cette très faible érosion d'argile s'accompagne d'une brutale diminution de la perméabilité d'un facteur 10, par contre pour un échantillon sain (qui n'a pas subi d'érosion interne) la perméabilité reste constante (figure 4). Par ailleurs la variation volumique des échantillons est extrêmement faible au cours de ces essais. Nous pouvons en déduire qu'une redistribution granulaire a pu se produire au sein de l'échantillon érodé. La faible quantité d'argile perdue par l'échantillon ne permet pas de quantifier l'effet de l'écoulement sur la granulométrie de l'échantillon. Toutefois, nous notons l'absence de modification granulométrique localisée. Conformément à la terminologie présentée par Lafleur (1999), le phénomène caractérisé par une perte de masse diffuse accompagnée d'une diminution de la perméabilité peut être dénommé suffusion.

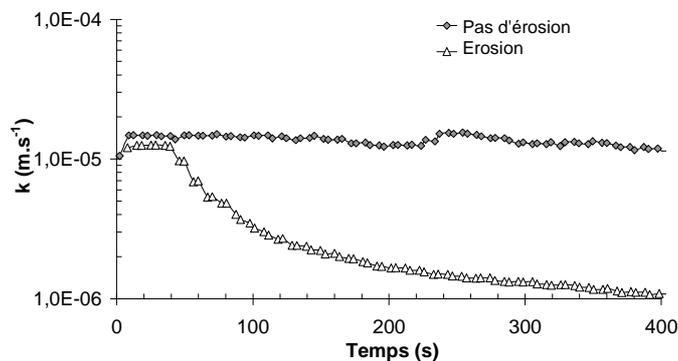


Figure 4 : Evolution de la perméabilité en fonction du temps ($\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$).

La figure 5 présente l'étude de l'influence du gradient hydraulique sur le débit massique maximal, la pression de confinement étant fixée à 200 kPa.

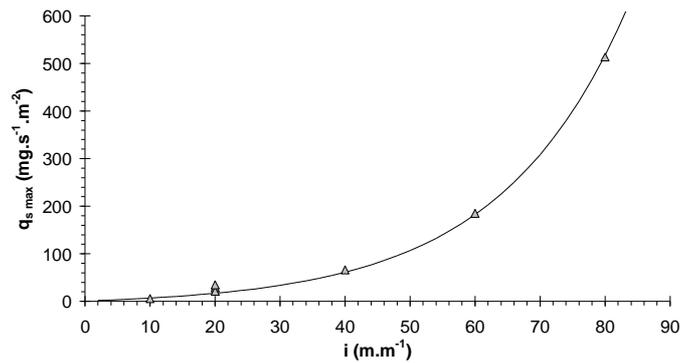


Figure 5 : Influence du gradient hydraulique sur l'érosion d'argile ($\sigma_3 = 200$ kPa).

Les trois essais réalisés avec le même jeu de paramètres permettent de souligner la bonne répétitivité des essais. Nous pouvons également noter une grande variation du taux d'érosion maximal qui peut être représenté par l'équation 2 :

$$q_{s \max} = 8[10^{0,022(i-1)} - 1] \quad [\text{Eq. 2}]$$

(Effectif $n = 7$, coefficient de corrélation $r = 0,997$)

Cette expression nous permet d'évaluer la valeur du gradient critique qui est de l'ordre de l'unité. Toutefois cette valeur du gradient critique est imprécise et l'allure générale de la courbe met en évidence la difficulté d'identifier précisément cette valeur, d'autant plus qu'elle dépend de la précision du banc expérimental utilisé.

L'étude de l'influence de la pression de confinement est présentée par la figure 6. Nous pouvons constater que la réduction de la pression du confinement engendre un accroissement du débit massique maximal.

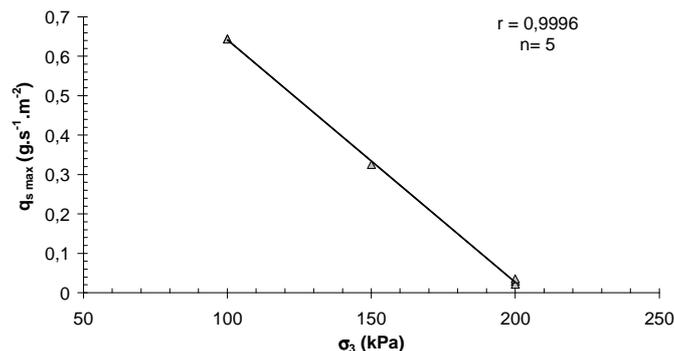


Figure 6 : Influence de la pression de confinement sur l'érosion d'argile ($i = 20$ $m.m^{-1}$).

L'accroissement de la pression de confinement, donc de la consolidation des matériaux, induit une augmentation de la résistance à l'érosion. L'action continue de la pression de confinement peut également être responsable de la restructuration des échantillons au cours de la suffusion des particules argileuses.

3.2. DEPART DE SABLE ET D'ARGILE

Considérons les échantillons A18 et A36, consolidés à 150 kPa. Le premier, sollicité par un gradient de 60 m.m^{-1} est l'objet d'une migration d'argile. La masse cumulée d'argile érodée est évaluée par voie optique à 60 mg. L'échantillon A36, soumis à un gradient hydraulique de 140 m.m^{-1} , présente une masse érodée (argile et sable) mesurée par pesée, de l'ordre de 40 g.

Cette érosion se développe de l'aval vers l'amont et induit une importante variation volumique de l'échantillon (volume initial de 110 cm^3) (figure 7) jusqu'à son effondrement. Ce constat met ainsi en évidence le changement de mécanisme d'érosion interne (Bendahmane, 2005). Conformément à la terminologie présentée par Lafleur (1999), le phénomène caractérisé par une érosion régressive suivi d'un effondrement peut être dénommé renard.

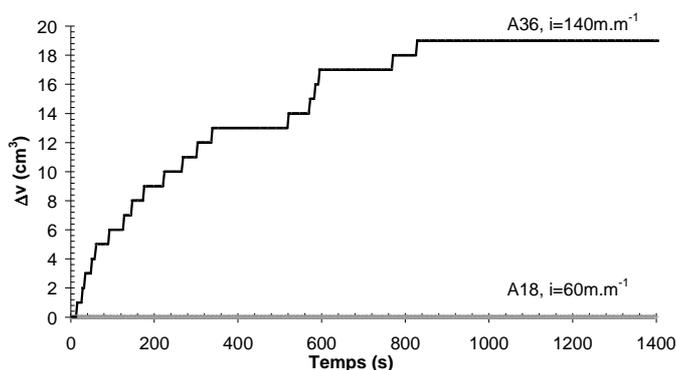


Figure 7 : Variation volumique en fonction du temps ($\sigma_3 = 150 \text{ kPa}$).

La figure 8 représente l'influence de la pression de confinement sur le débit massique maximal (mesuré par pesée). Nous constatons que l'augmentation de la pression de confinement tend à favoriser l'érosion du sable de l'échantillon. Cet accroissement du renard par la contrainte de confinement corrobore les conclusions de Papamichos *et al.* (2001) lors de leurs essais réalisés sur des échantillons de sable.

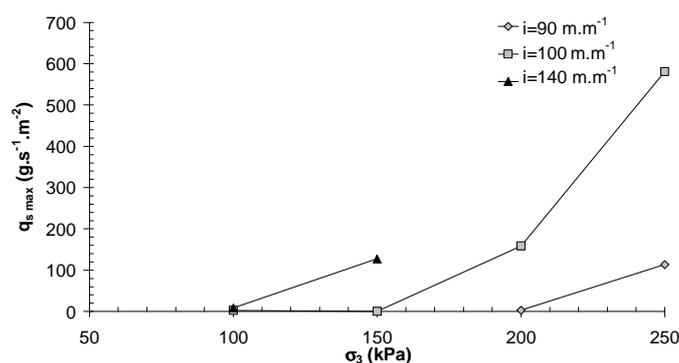


Figure 8 : Influence de la pression de confinement sur l'érosion d'argile et de sable.

Ces résultats montrent l'influence complexe de la pression de confinement sur le développement de l'érosion interne. Si le gradient appliqué est inférieur au gradient critique de renard, le confinement a tendance à augmenter la résistance de l'échantillon à la suffusion. Par contre si nous dépassons ce seuil, le développement de renard est favorisé par l'accroissement de la pression de confinement.

4. CONCLUSION

L'érosion interne est l'une des principales causes de rupture des ouvrages en terre. La compréhension de ce phénomène nécessite une étude approfondie des interactions eau-sol.

Les résultats de la campagne expérimentale montrent l'existence de deux gradients critiques pour déclencher deux phénomènes distincts d'érosion interne. L'augmentation du gradient hydraulique au delà du premier seuil engendre l'érosion diffuse de particules argileuses. Ce phénomène de suffusion s'accroît avec l'augmentation du gradient hydraulique et avec la diminution du confinement. L'augmentation du gradient hydraulique au delà d'un second seuil permet d'initier l'érosion de grains d'argile et de sable. Cette érosion se développe rapidement de manière régressive jusqu'à l'effondrement de l'échantillon. Ce phénomène qui peut être dénommé renard s'accroît avec la pression de confinement.

Les résultats obtenus montrent le rôle complexe du confinement qui est souvent négligé. Pour de petits gradients hydrauliques, l'augmentation de la pression de confinement tend à diminuer l'érosion qui s'effectue par suffusion. Pour de fortes valeurs du gradient hydraulique, l'augmentation du confinement favorise le développement du renard.

Cette étude contribue à l'amélioration de la compréhension de l'érosion interne et ouvre de nombreuses perspectives de recherche qui pourront notamment se réaliser dans le cadre du projet ERINOH de l'ANR auquel notre équipe participe.

5. BIBLIOGRAPHIE

- Bendahmane F, Marot D, Alexis A, Rosquoët F. (2005a) «Characterisation of internal erosion disturbances on sand/kaolinite samples», *McMat 2005 ASCE*, Baton Rouge, USA, 7 p.
- Bendahmane F, Marot D, Alexis A, Rosquoët F. (2005b) «Experimental study of internal erosion on cohesive soils», 3rd *Biot Conference ASCE*, Oklahoma, USA, 6 p.
- Bendahmane F. (2005) «Influence des interactions mécaniques eau-sol sur l'érosion interne» Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 160 p.
- Foster M, Fell R, Spannagle M. (2000) «The statistics of embankment dam failures and accidents » *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 37 p.1000-1024.
- Lafleur J, Mlynarek J, Rollin A. L. (1989) «Filtration of broadly graded cohesionless soils» *Journal of Geotechnical Engineering*, vol 115, n°12, p 1747-1768.
- Lafleur J. (1999) «Selection of géotextiles to filter broadly graded cohesionless soils» *Geotextiles and Geomembranes*, vol 17, p 299-312.
- Monnet A. (1998) «Boulance, érosion interne, renard. Les instabilités sous écoulement» *Revue Française de Géotechnique*, vol 82, p 3-10.
- Papamichos E, Vardoulakis I, Tronvoll J, Skjaærstein A. (2001) «Volumetric sand production model and experiment» *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol 25, p 789-808.
- Reddi L. N, Bonala M. V. S. (1997) «Critical shear stress and its relationship with cohesion for sand-Kaolinite mixtures» *Canadian Geotechnical Journal*, vol 34, p 26-33.
- Skempton A. W, Brogan J. M. (1994) «Experiments on piping in sandy gravels» *Géotechnique*, vol 44, n° 3, p 440-460.