Caractérisation expérimentale des phénomènes d'érosion interne sur des échantillons sablo-argileux

Frédéric Rosquoët, Fateh Bendahmane, Didier Marot, Alain Alexis

▶ **To cite this version:**

Frédéric Rosquoët, Fateh Bendahmane, Didier Marot, Alain Alexis. Caractérisation expérimentale des phénomènes d'érosion interne sur des échantillons sablo-argileux. 23es Rencontres universitaires de Génie Civil, 2005, Grenoble, France. hal-01007963

HAL Id: hal-01007963
https://hal.science/hal-01007963

Submitted on 20 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Caractérisation expérimentale des phénomènes d'érosion interne sur des échantillons sablo-argileux

Frédéric ROSQUOËT[1], Fateh BENDAHMANE[1], Didier MAROT[1] et Alain ALEXIS[1]

[1] GeM, UMR CNRS 6183, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, I.U.T. de Saint-Nazaire, BP 420, 44606 Saint-Nazaire Cedex, France

RESUME. L'érosion interne est l'une des principales causes des instabilités d'ouvrages hydrauliques en terre : digue, levée, barrage. L'arrachement et le transport de grains par les écoulements internes affectent la distribution granulométrique, modifient la porosité ainsi que les caractéristiques mécaniques et hydrauliques. Cette migration de grains peut engendrer à plus ou moins long terme des pertes d'étanchéité, un glissement voire la rupture de l'ouvrage. La difficulté de détecter l'érosion interne et son caractère évolutif rendent nécessaire la caractérisation de cette perturbation dès son initiation. Nous proposons une étude expérimentale réalisée sur des échantillons constitués de mélanges de sable et d'argile. Les essais indiquent que l'érosion interne est initiée par la migration des particules d'argile : lorsque la quantité d'argile érodée est suffisamment importante, les grains de sable sont arrachés progressivement induisant au final un effondrement de l'échantillon. L'évolution de la perte de masse solide des échantillons testés dépend du gradient hydraulique appliqué et du pourcentage d'argile.

MOTS-CLÉS : érosion interne ; étude expérimentale ; mélange sable / argile.

ABSTRACT. Internal erosion is one of the main causes of instabilities within hydraulic earthstructures: dike, levee or dam. Entrainment and transport of some particles affect the porosity and grain size distribution, which change the hydraulic and mechanical proprieties. These evolutions could induce instabilities: slidings, overtoppings or even failures. The difficulty of detection and the great dynamic of internal erosion demonstrate the necessity of experimental studies since the beginning of particles transport. We propose a parametric study on sand-clay samples. The tests show that the internal erosion is initiated by the displacement of clay particles. If sufficient clay content is taken away, the erosion of sand particles is induced. The evolution of the solid mass sample loss depends on the values of the hydraulic gradient and the clay percentage.

KEYWORDS: internal erosion; experimental study; sand / clay mixture.

1. INTRODUCTION

L'interaction de l'eau avec des ouvrages en terre peut générer des dommages irréversibles. Foster *et al* (2000) ont réalisé une étude statistique sur 11 192 barrages en terre : 136 ont subi des incidents dont 6% par glissement, 46% par érosion interne et 48% par surverse. L'érosion interne est donc un mécanisme majeur d'instabilités des ouvrages en terre. L'écoulement interne peut induire une migration de particules constitutives de l'ouvrage, ce qui provoque une modification des propriétés mécaniques et hydrauliques. La perméabilité de l'ouvrage en terre peut être localement considérablement modifiée, d'où des pertes d'étanchéité ou des surpressions interstitielles. A plus ou moins long terme, la structure du matériau peut être modifiée, ce qui peut conduire à la rupture de

l'ouvrage. Les mécanismes responsables de ces phénomènes sont complexes car ils mettent en jeu de nombreux paramètres qui peuvent être couplés entre eux. Cette complexité explique qu'une même étude expérimentale peut conduire à des interprétations différentes suivant les chercheurs (Skempton et Brogan, 1994 ; Monnet, 1998).

Pour caractériser l'initiation et le développement de l'érosion interne de nombreux critères ont été développés, essentiellement suivant une approche granulométrique ou une approche hydraulique. En considérant la capacité des gros grains à s'opposer à l'érosion des grains plus petits, des critères ont été élaborés à partir de l'allure de la courbe granulométrique (Kenney et Lau, 1985). Pour tenir compte de la présence éventuelle d'un filtre, Lafleur (1999) compare l'ouverture des pores du filtre avec un diamètre équivalent des grains déterminé selon la courbe granulométrique et le coefficient d'uniformité. Il faut noter l'absence de prise en compte de la porosité et du confinement du sol dans l'approche granulométrique. L'approche hydraulique repose sur l'identification du gradient hydraulique critique, valeur minimale du gradient hydraulique susceptible de générer une érosion. Pour les sols cohérents, Khilar et al (1985) expriment le gradient critique d'érosion en fonction de la contrainte de cisaillement hydraulique (τ_c), de la perméabilité intrinsèque et de la porosité. La difficulté réside dans l'identification de la valeur de la contrainte de cisaillement hydraulique (τ_c) qui dépend de la minéralogie de l'argile et de la nature du fluide interstitiel. Pour les sols pulvérulents une expression simplifiée du gradient hydraulique critique est proposée par Den Adel et al (1988). Toutefois les fortes incertitudes des expressions obtenues par l'approche hydraulique amènent les ingénieurs à prendre des valeurs élevées du facteur de sécurité (jusqu'à 15) qui est défini par le rapport du gradient critique de boulance et le gradient de sortie.

L'étude expérimentale réalisée par notre équipe (IEG) du GeM sur des échantillons de sable et d'argile a pour but de fournir de nouvelles données expérimentales afin d'améliorer la compréhension des phénomènes responsables de l'érosion interne en prenant en considération le couplage hydraulique et mécanique. En raison du nombre important de paramètres qui influent sur les différents phénomènes et leur caractère évolutif, il est nécessaire de prendre des précautions expérimentales adaptées.

2. ETUDE EXPERIMENTALE

2.1. MATERIAUX TESTES

L'étude paramétrique est menée sur des échantillons sablo-argileux, créés par mélange de sable de Loire, préalablement tamisé et lavé (tableau 1) et de kaolinite (caractéristiques décrites dans le tableau 2).

Diamètre équivalent (mm)	Tamisat (%)
1	100
0,5	60
0,4	45
0,2	25
0,1	4
0,08	0
Coefficient d'uniformité : Cu (.)	3,125
Poids volumique : γ_s (kN/m^3)	26

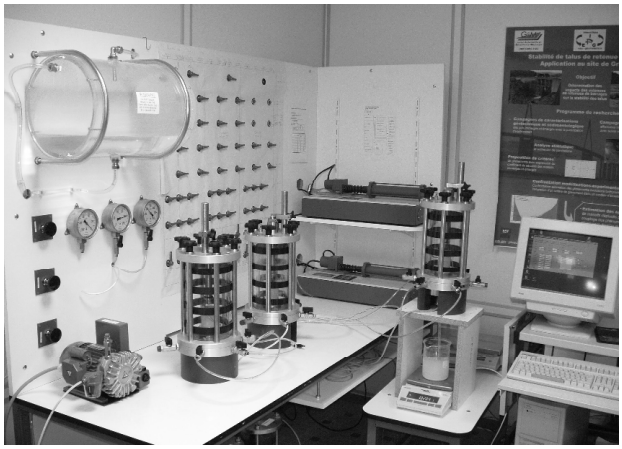
Tableau 1: Caractéristiques du sable de Loire.

Diamètre équivalent (mm)	Tamisat (%)
0,060	100
0,010	94
0,005	80
0,002	47
0,001	18
Limite de liquidité : wl (%)	55
Limite de plasticité : wp (%)	22
Poids volumique : γ_s (kN/m^3)	27

Tableau 2 : Caractéristiques de la kaolinite.

2.2. *PRESENTATION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL*

Le montage expérimental, qui est placé dans une pièce à température contrôlée, se compose de cellules triaxiales, dont le nombre (3) a été choisi afin d'optimiser la durée des essais (figure 1).



Vue générale

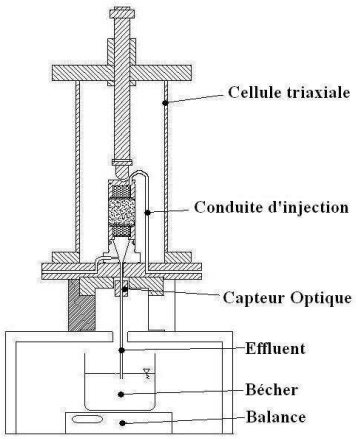


Schéma d'une cellule triaxiale

Figure 1 : Dispositif expérimental.

L'injection du fluide interstitiel est effectuée à l'aide d'un GDS (contrôleur de pression et de volume). 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 grains érodés et pour permettre l'utilisation de différents filtres.

La détermination de la perte de masse des échantillons se fait par pesée de l'effluent associée à une confrontation instantanée du fluide injecté.

L'incertitude de la pesée est de l'ordre du dixième de gramme. Afin d'améliorer la précision des mesures, un capteur optique est adapté sur la conduite de l'effluent pour mesurer la transparence de celui-ci (figure 2). Grâce à un étalonnage préalable, cette mesure de transparence permet de déterminer une masse de solide érodé de l'ordre du millième de gramme.

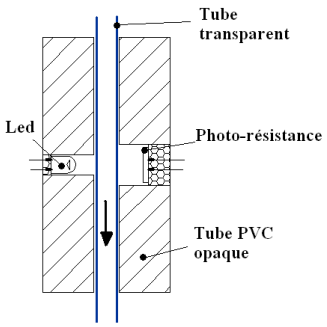


Figure 2 : Capteur optique.

2.3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

La réalisation d'essais sur des échantillons de sols reconstitués nécessite le contrôle de chaque étape de fabrication de ces échantillons. Ces vérifications ont conduit à l'élaboration d'un protocole complet qui a été validé (Bendahmane, 2002 ; Bendahmane et al, 2005) et qui assure une bonne répétitivité des essais. Cette préparation peut se décomposer en 4 étapes :

- L'homogénéisation des matériaux est réalisée par malaxage : pendant les 3 premières minutes, seul le sable est introduit avec une teneur en eau de l'ordre de 8%. Dans un second temps, l'argile est progressivement ajoutée. Le mélange est ensuite malaxé pendant 10 minutes. Une analyse granulométrique permet de vérifier la bonne homogénéité du mélange sablo-argileux.
- L'échantillon de 5 cm de diamètre et de 5 cm de haut est mis en forme à l'aide d'un système de pistonnage statique.
- La saturation de l'échantillon est réalisée en appliquant préalablement une légère pression de confinement de l'ordre de 20 kPa pour éviter l'effondrement. L'air présent dans l'échantillon est ensuite chassé par injection de dioxyde de carbone, puis la saturation s'effectue pendant 24 heures par un écoulement ascendant appliqué sous très faible gradient hydraulique. Le degré de saturation ainsi obtenu est supérieur à 97 %.
- La consolidation de l'échantillon est réalisée également pendant 24 heures, avec contrôle de la dissipation de la surpression interstitielle.

La saturation, la consolidation et l'essai d'érosion interne sont effectués dans la même cellule sans déconfinement de l'échantillon.

2.4. DESCRIPTIF DES ESSAIS

Pour chaque échantillon testé, la teneur en eau initiale est de 8% et le poids volumique sec de 17 kN/m^3. La pression de confinement est fixée à 200 kPa et le diamètre d'ouverture des pores du filtre est de 4 mm.

Deux paramètres sont étudiés:

- la teneur massique en kaolinite : les essais sont réalisés sur des échantillons dont le rapport massique kaolinite/sable est fixé à 10 ou 30%,

- le gradient hydraulique qui est fixé suivant les essais entre 2 et 92 m/m.

Le programme expérimental réalisé est résumé dans le tableau suivant :

Identification des essais	Teneur massique en Kaolinite (%)	Gradient hydraulique i (m/m)	Porosité initiale n_0 (.)
1	10	2	0.33
2	10	4	0.33
3	10	8	0.33
4	10	12	0.33
5	10	22	0.33
6	10	27	0.33
7	30	44	0.30
8	30	48	0.30
9	30	92	0.30

Tableau 3 : Essais réalisés.

3. ANALYSE DES RESULTATS

Pour une teneur massique en kaolinite de 30%, l'application d'un gradient hydraulique de 44 m/m ne modifie pas l'échantillon, aucune érosion n'est détectée (figure 3, essai 7). Par contre un gradient de 48m/m provoque la migration d'une petite quantité d'argile (essai 8). La quantité d'argile érodée s'accroît au fur et à mesure de l'augmentation du gradient. Trop faible pour être quantifiable par pesée, elle fait l'objet de mesure optique.

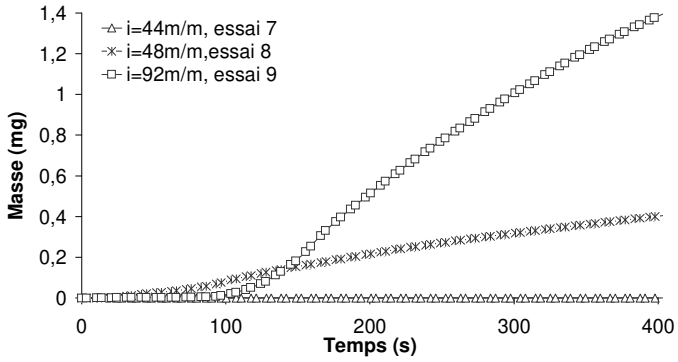


Figure 3 : Estimation de l'érosion par mesure optique en fonction du temps, 30% de kaolinite.

Les essais réalisés pour une teneur massique en kaolinite de 10% montrent la même influence de l'augmentation du gradient hydraulique sur l'accroissement de l'érosion interne (figure 4).

Toutefois l'initiation de l'érosion se produit pour des valeurs minimales de gradient comprises entre 2 m/m et 4 m/m. La valeur du gradient critique serait donc de l'ordre de 46m/m, pour une teneur massique en kaolinite de 30% et de 3m/m pour 10% de kaolinite.

Par ailleurs, à l'échelle de temps du laboratoire, les ordres de grandeurs de la masse érodée avec 10% de kaolinite sont très nettement supérieurs à ceux mesurés avec 30% de kaolinite.

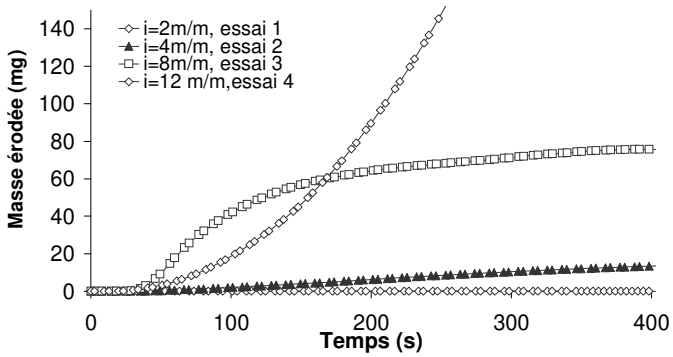


Figure 4 : Estimation de l'érosion par mesure optique en fonction du temps, 10% de kaolinite pour de faibles gradients hydrauliques.

Si la valeur du gradient hydraulique atteint 12 m/m (essai 4), la migration de particules d'argile s'accompagne de la migration de grains de sable, induisant une forte augmentation de la masse érodée.

Pour des valeurs plus importantes du gradient hydraulique, le capteur optique sature après plusieurs dizaines de secondes d'essais et ne permet plus de suivre l'accroissement de la masse érodée (figure 5).

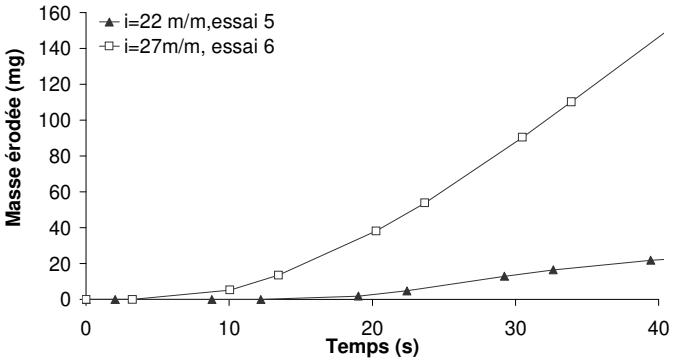


Figure 5 : estimation de l'érosion par mesure optique en fonction du temps, 10% de kaolinite.

L'érosion étant importante, la perte de masse de l'échantillon est suffisante pour être déterminée par pesée. Le suivi par la balance indique que l'augmentation du gradient provoque d'une part un accroissement de la perte de masse de l'échantillon et d'autre part, une accélération de l'érosion. La figure 6 montre que l'évolution de la perte de masse peut se décomposer en 3 étapes :

- au cours de la première phase, la perte de masse est insuffisante pour être détectée par pesée. La durée de cette phase décroît avec le gradient,
- la perte de masse de l'échantillon augmente brutalement au cours de la deuxième phase et peut même atteindre 0,5 g/s,
- au cours de la troisième phase, la perte de masse continue d'augmenter selon un débit massique moyen 10 fois plus faible que celui mesuré lors de la deuxième phase.

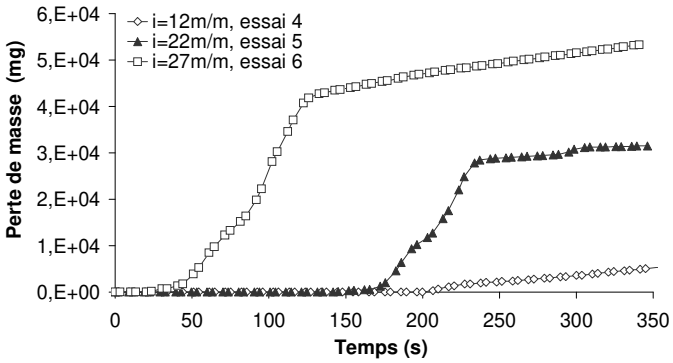
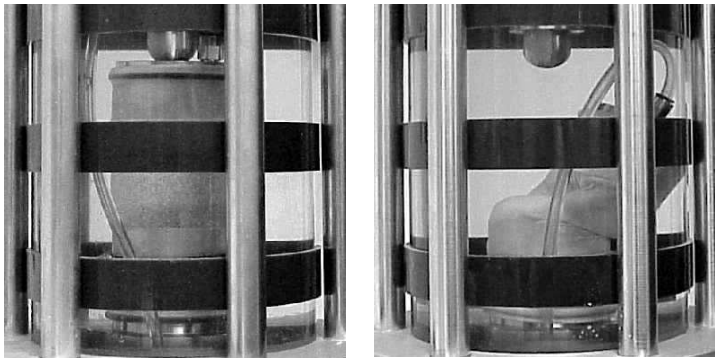


Figure 6 : Perte de masse en fonction du temps pour trois gradients différents

Si la migration de grains est importante, la structure de l'échantillon devient instable et peut provoquer (essai 6, i = 27 m/m) un effondrement (figure 7).



Avant essai Après essai

Figure 7 : Effondrement d'un échantillon.

Ces éléments semblent corroborer les conclusions de Barakat (1991) qui représente le sol en deux structures : une structure primaire composée de grains grossiers qui assure la résistance mécanique et une structure secondaire constituée de grains plus fins, le sol reste stable mécaniquement, tant que l'érosion n'affecte que cette seconde structure.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'érosion interne est engendrée par les écoulements internes dans les ouvrages en terre qui arrachent et transportent une fraction des grains constitutifs du massif. Ces mécanismes sont responsables de la rupture d'ouvrages en terre récents. L'érosion interne est difficilement détectable sur site en raison de sa complexité et son caractère fortement évolutif. Il est donc nécessaire de mener une étude paramétrique de l'érosion interne dès son initiation.

Notre dispositif expérimental permet d'étudier le déclenchement et le développement de l'érosion interne dans des échantillons sablo-argileux. Toutes les phases de réalisation des échantillons ont été vérifiées. Nous avons ainsi élaboré un protocole expérimental complet.

Nous avons pu montrer l'existence d'un gradient hydraulique critique à partir duquel l'érosion interne est initiée. La valeur de ce gradient critique dépend de la teneur massique en kaolinite. L'augmentation du gradient hydraulique s'accompagne de l'accroissement et de l'accélération de l'érosion interne. Ce phénomène débute par la migration de particules d'argile puis se poursuit par la migration de grains de sable. L'évolution de la perte de masse des échantillons peut se décomposer en trois étapes successives qui peuvent conduire à l'effondrement de l'échantillon.

Les perspectives de recherche portent sur :

- Une extension de cette étude expérimentale dans le but de modéliser plus finement l'action du gradient hydraulique et l'influence de la teneur massique en kaolinite,
- La recherche de l'influence d'autres paramètres (granulométrie et minéralogie des matériaux, pression de confinement et diamètre des pores du filtre), rendue possible par la souplesse d'utilisation de notre banc expérimental.

5. BIBLIOGRAPHIE

Barakat, B., (1991) « Instabilité aux écoulements des milieux granulaires, aspects morphologiques et probabilistes », Thèse Ecole Centrale de Paris, 1991; 135.

Bendahmane, F., (2002) « Influence de l'écoulement sur la résistance des sols: étude expérimentale préliminaire », *DEA Université de Nantes, 62p.*

Bendahmane, F., Marot, D., Alexis, A., and Rosquoët, F., (2005) « Experimental study of internal erosion on cohesive soils », *3rd Biot Conference*, Oklahoma, USA, à paraître.

Den Adel, H., (1988) « Internal stability of minestone ». *International Symposium on Modeling Soil-Water-Structure Interactions,* Rotterdam.

Foster, M., Feli, R., and Spannagle, M., (2000) « The statistics of embankment dam failures and accidents », *Canadian Geotechnical Journal,* 37:1000-1024.

Kenney, T.C., and Lau, D., (1985) « Internal stability of granular filters », *Canadian Geotechnical Journal*, 22:215-225.

Khilar, K.C., Fogler H.S., and Gray, D.H., 1985, « Model for piping-plugging in earthen structures », *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(7):833-846

Lafleur J. (1999) « Selection of géotextiles to filter broadly graded cohesionless soils », *Geotextiles and Geomembranes*, 17: 299-312.

Monnet, A., (1998) « Boulance, érosion interne, renard. Les instabilités sous écoulement », *Revue Française de Géotechnique*, 82:3-10.

Skempton, A.W., and Brogan, J.M., (1994) «Experiments on piping in sandy gravels », *Géotechnique*, 44(3):440-460.