
Effets d'échelles spatiale et temporelle sur les caractérisations de la sensibilité des sols à la suffusion

Le Van Thao¹, Zhong Chuheng², Bendahmane Fateh³, Marot Didier⁴

¹ Université de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), 58 rue Michel Angle, BP 420, F-44606 Saint - Nazaire cedex, France. Email: van-thao.le@etu.univ-nantes.fr

^{2,3,4} Université de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), 58 rue Michel Angle, BP 420, F-44606 Saint - Nazaire cedex, France.

RÉSUMÉ.

La suffusion est un processus d'érosion interne qui mobilise uniquement la fraction fine. Ce phénomène complexe apparaît comme la combinaison de trois processus : détachement, transport et possible filtration de la fraction fine. Ce phénomène peut induire une modification de la distribution granulométrique, de la porosité et de la conductivité hydraulique du matériau. Avec l'objectif de caractériser la sensibilité à la suffusion de sols non cohésifs, des essais sous écoulement vertical descendant ont été réalisés à l'aide de deux appareillages différents. Les essais ont été menés avec deux tailles d'échantillon et deux historiques de chargement hydraulique. Cette étude met en évidence l'influence significative de la longueur de l'écoulement et de l'historique de chargement hydraulique sur la valeur du gradient critique. La nouvelle analyse proposée consiste à modéliser le chargement hydraulique par l'énergie dissipée par l'écoulement et la réponse du sol par la masse sèche érodée cumulée. Les résultats indiquent que cette approche est plus efficace pour caractériser la sensibilité à la suffusion des sols non cohésifs.

ABSTRACT.

Suffusion is a selective erosion of fine particles under the effect of seepage flow within the matrix of coarser particles. This complex phenomenon appears as a combination of three processes: detachment, transport and possible filtration of finer fraction. It can induce a change in particle size distribution, porosity and hydraulic conductivity of the material. With the objective to characterize the suffusion susceptibility, downward seepage flow tests were conducted with two different devices. Tests were realized with two different specimen sizes and under two histories of hydraulic loading. This study shows the significant effect of seepage length and also hydraulic loading history on the value of critical hydraulic gradient. A new analysis consists to model the hydraulic loading by the energy expended by the seepage flow and the soil's response by the cumulative eroded dry mass. The results demonstrate that this approach is more effective to characterize suffusion susceptibility for cohesionless soils.

MOTS-CLÉS : ouvrages hydrauliques en terre, sols non cohésifs, érosion interne, suffusion, énergie, effet d'échelle.

KEY WORDS: hydraulic earth structure, cohesionless soils, internal erosion, suffusion, energy, scale effect.

1. Introduction

Les ouvrages hydrauliques en terre peuvent être sujets à des instabilités provoquées par les phénomènes d'érosion interne. [FRY 12] indiquent que la surverse et l'érosion interne sont les deux principales causes de la rupture des barrages et digues en remblais. [FRY 12] distinguent quatre processus d'érosion interne : l'érosion de conduit, l'érosion régressive, l'érosion de contact et la suffusion. Cette étude porte sur la suffusion qui mobilise la fraction fine du sol. Ce processus peut provoquer une variation de la distribution granulométrique, de la porosité et de la conductivité hydraulique du matériau. Par ailleurs, bien que ce processus soit difficile à détecter sur site, il doit être considéré avec attention car son développement peut produire un débouillage avec une érosion conséquente de la fraction fine qui s'accompagne d'un tassement et de l'accroissement important de la conductivité hydraulique [SIB 15].

Pour assurer la sécurité des ouvrages hydrauliques en terre, la caractérisation de la sensibilité des sols à la suffusion est donc requise. Pour les trois autres processus d'érosion interne, plusieurs classifications de sensibilités des sols ont été publiées. Toutefois, une seule classification de sensibilité des sols à la suffusion a été

récemment proposée dans la littérature [MAR 16]. Il convient de noter qu'en comparaison de l'échelle de temps en laboratoire, sur site le chargement hydraulique peut être appliqué sur le sol pendant une très grande durée. Afin d'optimiser la durée des essais de suffusion, les chercheurs ont réalisé les essais avec différents historiques de chargement hydraulique. Cependant aucune conclusion relative à l'influence de l'historique de chargement hydraulique sur la sensibilité à la suffusion n'a pu à ce jour être dressée. Par ailleurs la caractérisation de la sensibilité à la suffusion a été menée à l'aide de différents appareillages, en cellule rigide de type œdométrique [KEN 85], [SKE 94], [WAN 08], [SAI 11] ou à l'aide de cellule triaxiale modifiée [BEN 08]. Cette diversité des appareillages est associée à une grande diversité de tailles d'échantillons testés. Pourtant l'absence d'influence significative de la taille des échantillons sur la sensibilité à la suffusion n'a pas été vérifiée.

Cette étude a pour objet de caractériser l'influence potentielle de l'historique de chargement hydraulique et de la taille des échantillons testés sur la sensibilité à la suffusion de sols non cohésifs. Conformément à cet objectif, des essais sont menés à l'aide de deux érodimètres et suivant deux historiques de chargement hydraulique. Les résultats sont interprétés en termes de gradient hydraulique critique et une nouvelle interprétation énergétique est également utilisée.

2. Campagne expérimentale

2.1. Appareillages

Deux dispositifs développés au sein de notre laboratoire sont utilisés pour cette étude. Le premier dispositif est un érodimètre de type triaxial [BEN 08] alors que le second est de type œdométrique [SAI 11]. Dans l'érodimètre triaxial, le diamètre des échantillons est de 50 mm et la hauteur est de 50 mm. Par contre dans l'érodimètre de type œdométrique, les échantillons ont un diamètre de 280 mm et une hauteur de 450 mm. Pour ces deux dispositifs, l'entête comprend une couche de billes de verre afin de diffuser l'eau injectée sur toute la section amont de l'échantillon. L'échantillon repose sur une grille rigide sur laquelle peut être fixée un tamis d'ouverture choisie à 1,2 mm. L'embase des deux cellules est en forme d'entonnoir afin d'éviter le dépôt des grains érodés qui sont collectés dans une boîte de récolte. Cette boîte est dotée d'un support rotatif sur lequel sont disposés 8 béciers afin de récolter les grains détachés pendant la phase de saturation, puis durant 7 étapes successives de chaque essai. Afin de tester tous les échantillons en condition œdométrique, dans l'érodimètre triaxial autour des échantillons entourés de la membrane est disposé un moule rigide.

2.2. Matériaux testés et méthodologie expérimentale

La Figure 1a représente la distribution granulométrique des 2 sols testés, notés 1 et B. Ces deux sols à granulométrie discontinue sont potentiellement instables suivant les critères granulométriques fréquemment utilisés dans la littérature [KEN 85], [WAN 08]. Les matériaux sont tout d'abord malaxés et humidifiés avec une teneur en eau de 8%. Les échantillons sont ensuite compactés par couches puis ils sont saturés en CO₂ et enfin à l'aide d'un écoulement vertical ascendant sous très faible gradient hydraulique. Une attention particulière est portée sur la minimisation de la perte de matériaux fins lors de cette phase de préparation, afin d'obtenir une densité initiale et une conductivité hydraulique initiale sensiblement identique pour les échantillons testés avec les deux dispositifs.

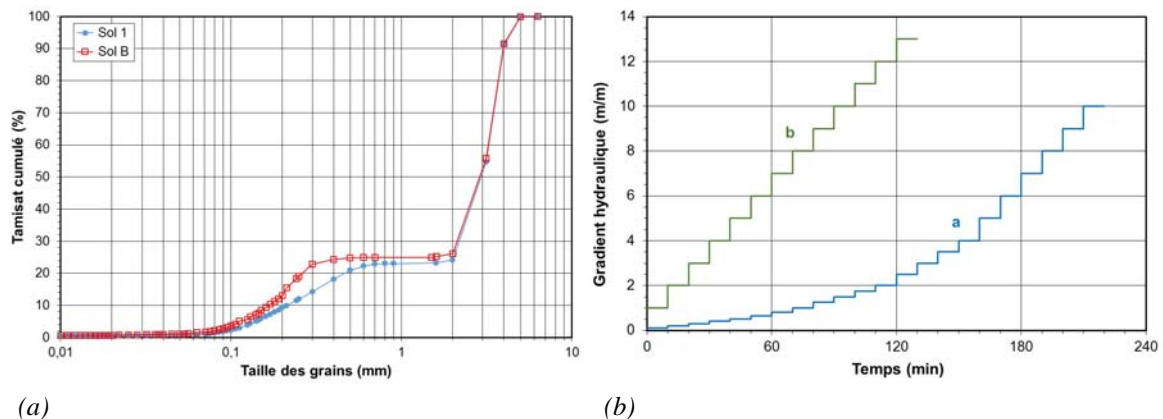


Figure 1. (a) Distribution granulométrique des sols testés (b) Types de chargement hydraulique appliqué.

3. Résultats et interprétations

3.1. Gradients hydrauliques critiques

[SKE 94] ont proposé de caractériser l'initiation de la suffusion par l'accroissement de la conductivité hydraulique du matériau. Suivant cette approche, la Figure 2a représente la vitesse de Darcy en fonction du gradient hydraulique pour les échantillons du sol B testés avec l'érodimètre triaxial suivant les historiques de chargement hydraulique « a » et « b ». 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 ».

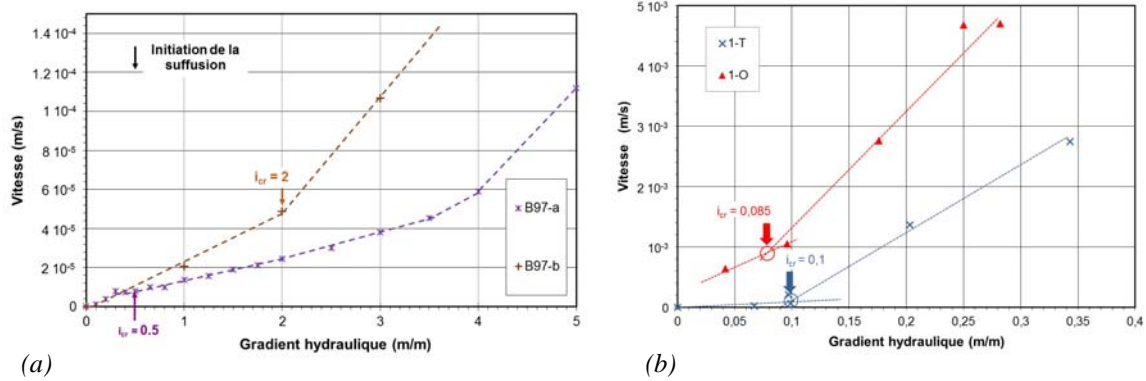


Figure 2. Vitesse vs gradient hydraulique, (a) suivant 2 chargements hydrauliques et (b) pour deux tailles d'échantillons testés.

Le sol apparaît donc plus résistant lors d'un accroissement plus rapide du chargement hydraulique. Cette influence de l'historique de chargement hydraulique a été aussi observée par [LUO 13] qui ont notamment conclu qu'un chargement à long terme amène une réduction du gradient hydraulique nécessaire au développement de la suffusion.

La Figure 2b présente la vitesse de Darcy en fonction du gradient hydraulique pour les essais réalisés sur le sol 1, suivant le même historique de chargement « a », mais avec l'érodimètre triaxial, essai 1-T, et l'érodimètre œdométrique, essai 1-O. La même méthodologie systématique est utilisée pour identifier la valeur du gradient critique qui apparaît plus faible dans le cas de l'échantillon de plus grande taille. Cette décroissance du gradient critique en fonction de la longueur de l'écoulement a aussi été mesurée par [MAR 12].

3.2. Méthode énergétique

Afin de prendre en compte à la fois l'écart de charge hydraulique et le débit pour caractériser le chargement hydraulique, [MAR 16] expriment la puissance hydraulique dissipée par l'écoulement interstitiel sous la forme :

$$P_{\text{flow}} = Q \gamma_w \Delta h \quad [1]$$

avec Q: le débit volumique du fluide, γ_w le poids volumique de l'eau et Δh l'écart de charge hydraulique entre les sections amont et aval de l'échantillon testé.

L'énergie dissipée par l'écoulement E_{flow} est ensuite déterminée par intégration temporelle de la puissance sur la durée de l'essai.

La Figure 3a représente la masse sèche érodée cumulée m_{dry} en fonction de l'énergie cumulée dissipée par l'écoulement pour les essais réalisés sur le sol B. Les échantillons testés de sol 1 étant de tailles différentes, ces mêmes grandeurs sont exprimées par unité de volume et représentées sur la Figure 3b.

Les essais sont poursuivis jusqu'à l'état permanent qui est défini par la constance de la conductivité hydraulique et la constance ou la décroissance du taux d'érosion. Cet état est signalé par un point noir sur les Figures 3a et 3b.

[MAR 16] expriment l'indice de résistance à l'érosion par :

$$I_\alpha = - \log (m_{\text{dry}} / E_{\text{flow}}) \quad [2]$$

La valeur de l'indice de résistance à l'érosion est déterminée à l'état permanent. Pour les essais sur le sol B les valeurs de I_α sont 3,29 sous chargement hydraulique « b » et 3.64 sous chargement hydraulique « a ». Selon

la classification de [MAR 16] le sol est classé Modérément Erodable pour ces deux types de chargement hydraulique. Les essais menés sur le sol 1 avec l'érodimètre triaxial et l'érodimètre oedométrique aboutissent à une valeur de I_α de 2,9 et 2,94 respectivement, donc une même classification « Erodable » pour ces deux tailles d'échantillon.

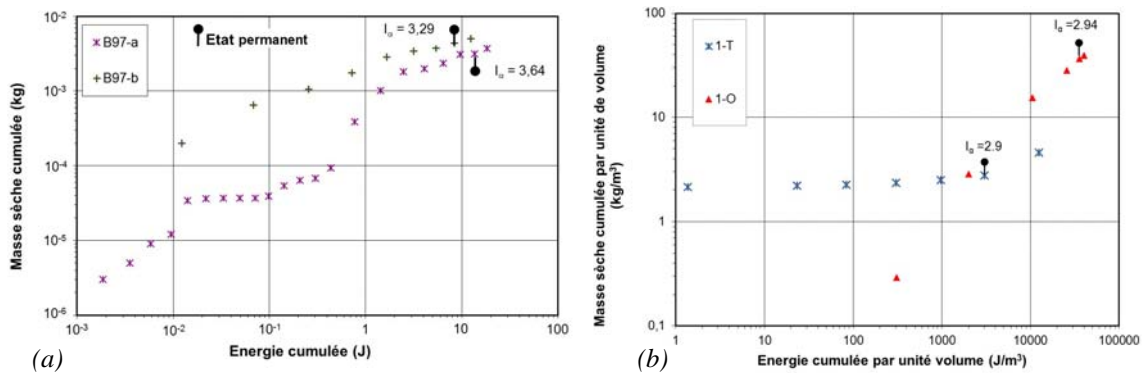


Figure 3. Masse sèche cumulée vs énergie cumulée (a) suivant 2 chargements hydrauliques (b) grandeurs calculées par unité de volume pour deux tailles d'échantillons testés.

4. Conclusion

Les résultats des essais de suffusion menés sur sols non cohésifs sous deux chargements hydrauliques et avec deux tailles d'échantillon ont permis de mettre en évidence l'influence de ces deux paramètres sur les valeurs de gradient hydraulique critique. L'approche énergétique permet de s'affranchir de ces effets d'échelle et d'aboutir à une même classification de sensibilité pour les deux historiques de chargement hydraulique et les deux tailles d'échantillons.

5. Bibliographie

- [BEN 08] BENDAHMANE F., MAROT D., ALEXIS A., « Experimental parametric study of suffusion and backward erosion », *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.134, no 1, p. 57-67, ASCE, 2008.
- [FRY 12] FRY J.J., VOGEL A., ROYET P., COURIVAUD J.R., « Dam failures by erosion: lessons from ERINOH data bases », *Proc. 6th Int. Conference on Scour and Erosion (ICSE-6)*, 27-31 August, Paris, France, p. 273-280, 2012.
- [KEN 85] KENNEY T., LAU D., « Internal stability of granular filters », *Canadian geotechnical journal*, vol. 22, no 2, p. 215–225, NRC Research Press, 1985.
- [LUO 13] LUO Y.L., QIAO L., LIU X.X., ZHAN M.L., SHENG J.C., « Hydro-mechanical experiments on suffusion under long-term large hydraulic heads », *Nat. Hazards*, 65, 1361–1377, Springer, 2013.
- [MAR 12] MAROT D., LE V. D., GARNIER J., THOREL L., AUDRAIN P., « Study of scale effect in an internal erosion mechanism: centrifuge model and energy analysis », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 16, no 1, p. 1–19, Taylor & Francis, 2012.
- [MAR 16] MAROT D., ROCHIM A., NGUYEN H.H., BENDAHMANE F., SIBILLE L., « Assessing the susceptibility of gap graded soils to internal erosion: proposition of a new experimental methodology », *Natural Hazards*, vol. 83, no 1, p. 365-388, Springer, 2016.
- [SAI 11] SAIL Y., MAROT D., SIBILLE L., ALEXIS A., « Suffusion tests on cohesionless granular matter », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 15, no 5, p.799-817, Taylor & Francis, 2011.
- [SIB 15] SIBILLE L., MAROT D., SAIL Y., « A description of internal erosion by suffusion and induced settlements on cohesionless granular matter », *Acta Geotechnica*, 10, p. 735-748, 2015.
- [SKE 4] SKEMPTON, A.W., BROGAN, J.M., « Experiments on piping in sandy gravels », *Géotechnique*, 44(3), 440-460, 1994.
- [WAN 08] WAN, C.F. FELL, R., « Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations », *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 134, no 3, p. 401-407, ASCE, 2008.