

EFFET DE LA STRUCTURE SUR LA MIGRATION DES PARTICULES FINES DANS UN MILIEU POREUX

Samiara ALHADDAD; Abdellah ALEM; Nasre-dine AHFIR; Hua-Qing WANG ; Ahmed BENAMAR

*Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, FRE 3102 CNRS, Université du Havre,
53, rue de Prony - BP 540, 76058 Le Havre cedex, France.
alhaddas@univ-lehavre.fr, abdellah.alem@univ-lehavre.fr*

Résumé :

On présente des résultats d'une étude expérimentale en laboratoire sur l'érosion interne par suffusion d'un milieu poreux lâche soumis à un écoulement. On s'intéresse à l'influence de la structure du milieu poreux sur les processus d'arrachement et de migration des particules fines. Différentes textures sont ainsi constituées soit de mélanges sable-fines ou billes de verre-fines. Les sables et les billes de verre ont des granulométries identiques mais la forme et la rugosité des grains sont différentes. L'étude de l'initiation et le développement de l'érosion interne sont menés sur des colonnes à parois rigides. L'évolution du débit solide en fonction de la texture et des conditions d'essai est analysée. Des lois d'érosion caractérisant l'érodabilité des différentes textures testées sont proposées. Les résultats obtenus montrent clairement l'effet majeur de la structure et de la vitesse d'écoulement sur l'érosion du milieu.

Abstract:

An experimental study on internal erosion of a porous medium by suffusion is presented. The influence of the porous media textures and hydraulic charges on the processes of the detachment and the migration of fine particles is investigated. Two porous media were reconstituted: glass beads-fine, and Sand-fine. The experiments of porous media suffusion were carried out on laboratory columns. The grains of the sand / the glass beads have identical size distribution but are different in shape and roughness. The evolution of the erosion rate is quantified as a function the porous texture and hydraulic conditions. Erosion laws characterizing the erodibility of different textures are presented. The internal structure and the flow rates play an important role in the erodibility of the porous media.

Mots clés: Suffusion, Etude expérimentale, Effet de la structure, Hydrodynamique.

Keywords: Suffusion, Experimental study, Structure effect, Hydrodynamic.

1. Introduction

Les ouvrages hydrauliques en terre constituent des réserves d'eau pour l'irrigation et la production électrique. Bien que souvent fiables, des ruptures se produisent et engendrent d'importantes conséquences humaines et matérielles. Il est souvent très difficile de déterminer les raisons exactes d'un accident ou d'une rupture d'un ouvrage car les processus mis en jeu détruisent généralement les preuves qui auraient pu exister.

Les processus d'érosion interne sont très complexes et se déroulent à l'intérieur de ces ouvrages ou de leurs fondations. Ils sont donc difficilement détectables tant que le phénomène n'est pas assez développé. L'érosion interne est liée à deux conditions qui sont l'arrachement de particules et leur transport [5]. Les mouvements de particules fines, sous l'action d'écoulement créent des modifications des caractéristiques hydrodynamiques dans le milieu. Il se crée des zones d'arrachements de particules et des zones de colmatage qui modifient la perméabilité localement et en conséquence la distribution des pressions hydrauliques dans l'ouvrage [2]. Finalement, ces modifications peuvent conduire à l'effondrement de l'ouvrage.

Les premières études sur l'érosion interne ont conduit à la proposition de critères granulométriques des filtres de barrages [7]. De nombreuses recherches ont depuis été réalisées afin de déterminer l'influence de différents paramètres (vitesse d'écoulement, orientation de l'écoulement, confinement, réaction chimique ...) sur l'érosion interne [1], [3], [8], [9]. Ces études ont permis d'améliorer les critères granulométriques et de proposer des formulations théoriques pour le détachement et le transport des particules fines dans une matrice granulaire de sol [4], [6].

Cet article présente des résultats d'une étude expérimentale dont les objectifs sont d'améliorer les connaissances et de mieux cerner la dynamique de l'érosion interne par suffusion qui affecte les ouvrages hydrauliques en terre. Cet article se focalise sur l'analyse de l'érosion du milieu sous la condition de charge constante qui est le cas susceptible d'être rencontré dans les ouvrages hydrauliques. Un programme de recherche portant sur le processus d'arrachement et de migration des particules fines sous l'action d'un écoulement dans un milieu reconstitué sous différentes charges hydrauliques a été entrepris. Des essais d'érosion sur des colonnes horizontales sont réalisés. A partir d'une étude paramétrique, on cherche à évaluer l'influence de différents paramètres structuraux et hydrauliques et à proposer des lois pour quantifier le processus d'érosion interne des matériaux constitués. Cet article présente les résultats mettant en évidence le rôle de la matrice granulaire sur la dynamique d'érosion du milieu poreux.

2. Matériel et Méthode

Les essais ont été menés sur deux matériaux reconstitués, composés soit d'un mélange de billes de verre – particules fines ou de sable naturel - particules fines. Le sable est sélectionné à partir du sable de Seine. Les billes de verre sont fabriquées par la société Preciver spécialisée dans la verrerie industrielle en France. Le sable et les billes de verre ont des granulométries identiques mais la forme et l'état de surface des grains sont différents. Les photos prises au microscope électronique à balayage montrent que les grains de sable ont une forme anguleuse et une surface rugueuse alors que les billes de verre ont une forme arrondie et une surface lisse. Deux granulométries de sable et billes de verre sont utilisées : 0,800-1,00 mm (notées S1 et BV1) et 0,315-0,630 mm (notées S2 et BV2). Les fines sont constituées de la kaolinite. La courbe granulométrique (fig.1) obtenue par granulométrie laser (Malvern 2000) donne une distribution de tailles des particules inférieures à 45 μ m avec $d_{50} = 5,8 \mu$ m, $d_{10} = 1,3 \mu$ m et $d_{60} = 8 \mu$ m.

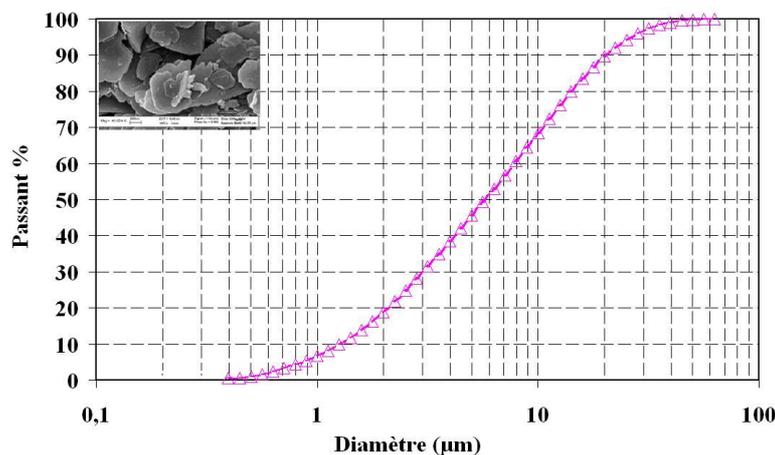


FIG. 1 - Courbes granulométriques des particules fines (kaolinite) utilisées

Les principales caractéristiques des matériaux reconstitués ainsi que les essais présentés dans cet article sont indiquées dans le tableau 1.

Matrice granulaire	Granulométrie matrice granulaire	Particules fines	% de fines	Charge hydraulique appliquée ΔH (cm)	Porosité initiale de mélange (%)	Poids volumique du mélange (KN/m^3)	Conductivité hydraulique initiale du mélange (m/s)
Matériau naturel (S)	S1 : 800-1000 μm	Kaolinite	5%	4	42,4	15,3	8,85E-04
	S2 : 315-630 μm			12	41,7	15,4	3,05E-04
				28			
Matériau artificiel (BV)	BV1 : 800-1000 μm			50	41,5	15,4	4,04E-03
	BV2 : 315-630 μm			67			
				103	42,2	15,3	5,50E-04

Tableau 1 : Paramètres physiques des échantillons de sol reconstitués

Les essais d'érosion interne sont réalisés à charge hydraulique imposée avec le dispositif expérimental décrit sur la figure 2. La colonne équipée de piézomètres répartis sur sa longueur, d'un diamètre de 3,2 cm et d'une longueur de 22,6 cm, est fermée à ses deux extrémités par des couvercles. L'une des deux extrémités comporte un ajutage qui sert à l'évacuation des eaux et l'autre est raccordée à un réservoir d'eau. Des filtres coiffent l'échantillon sur ses deux faces à l'intérieur de la colonne. L'eau évacuée est collectée dans un réservoir.

Les échantillons reconstitués sont composés de 5% de kaolinite et de 95% de sable ou de billes de verre, leurs porosités initiales sont autour de 42%. Après homogénéisation du mélange sable / billes de verre – fines sous une teneur en eau de 2%, la colonne est remplie gravitairement par couches successives de matériau. L'échantillon est saturé horizontalement sous une charge hydraulique très faible ($\Delta H = 2$ cm) pour ne pas créer de mouvement de particules dans le milieu poreux avant le début de l'essai. L'essai consiste ensuite à maintenir un écoulement d'eau à travers l'échantillon, sous une charge imposée, pendant une durée bien déterminée. Plusieurs charges hydrauliques ont été testées. L'érosion du milieu est suivie par les mesures de débit hydraulique à la sortie, la turbidité des eaux évacuées à l'aide d'un turbidimètre, la granulométrie des particules évacuées et finalement les hauteurs d'eau dans les piézomètres. La mesure de la turbidité permet, après étalonnage du turbidimètre d'avoir la concentration en particules fines des effluents. La mesure des pressions le long de la colonne permet de suivre les modifications spatio-temporelles de la conductivité hydraulique du milieu.

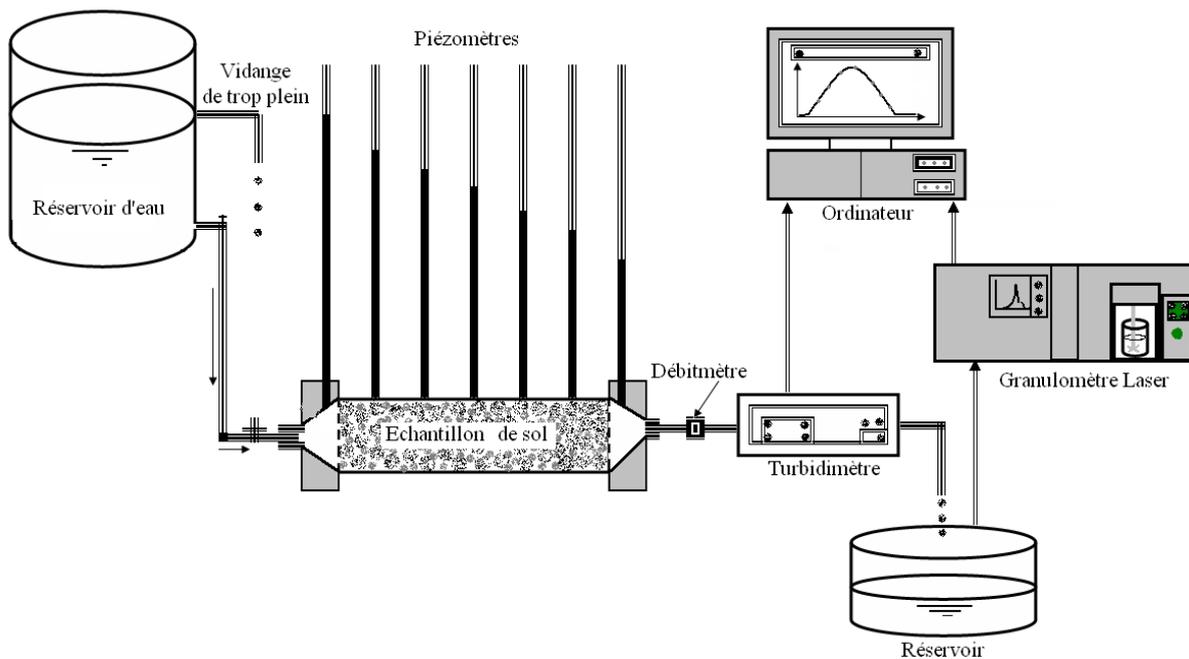


FIG.2- Schéma du dispositif expérimental

3. Résultats et analyses

La masse des fines évacuées par unité de temps, notée débit solide $q(t)$, est obtenue en multipliant la concentration massique C (g/cm^3) des particules fines dans l'effluent par le débit liquide Q (cm^3/s) traversant l'échantillon. La masse cumulée érodée est quantifiée par intégration du débit solide érodé en fonction du temps depuis l'instant initial du début de l'essai jusqu'à l'instant t :

$$m(t) = \int_0^t q(t).dt \quad (1)$$

Les figures 3 et 4 présentent respectivement le débit solide et la masse cumulée érodés en fonction du temps obtenus sur les essais réalisés avec les milieux BV1-kaolinite, S1-kaolinite, BV2-kaolinite et S2-kaolinite, pour deux charges hydrauliques constantes ($\Delta H = 50$ cm et $\Delta H = 103$ cm).

Pour tous les essais réalisés, On observe une évolution similaire, le débit solide des fines dans les effluents augmente jusqu'à un pic, puis diminue très rapidement pour atteindre un palier dont la valeur dépend fortement de la matrice granulaire et de la charge appliquée.

Pour une même charge hydraulique et une même composition granulométrique du milieu, le débit solide érodé maximal (valeur au pic), mesuré à la sortie du milieu sable-kaolinite, est nettement moins important que celui mesuré à la sortie du milieu billes de verre-kaolinite. Ceci montre que le débit solide maximal dépend très fortement des matrices granulaires utilisées. Pour une même texture, lorsque la charge hydraulique imposée augmente, l'amplitude du pic augmente et le temps associé au pic diminue.

Les débits solides mesurés aux paliers sont toujours très faibles quel que soit le matériau testé. Cependant, là aussi, on remarque que les valeurs mesurées à la sortie du milieu billes de verre-kaolinite restent toujours supérieures à celles mesurées à la sortie du milieu sable-kaolinite.

On remarque aussi que les pics de débit solide érodé sont plus étalés dans le temps pour les deux milieux plus fins BV2-kaolinite et S2-kaolinite. Cet étalement est lié à la granulométrie plus fine de la matrice granulaire. Les deux milieux sont par conséquent moins perméables et admettent des dispersions plus élevées. Les particules mobilisées par l'écoulement mettent plus de temps à être évacuées à l'extérieur de l'échantillon.

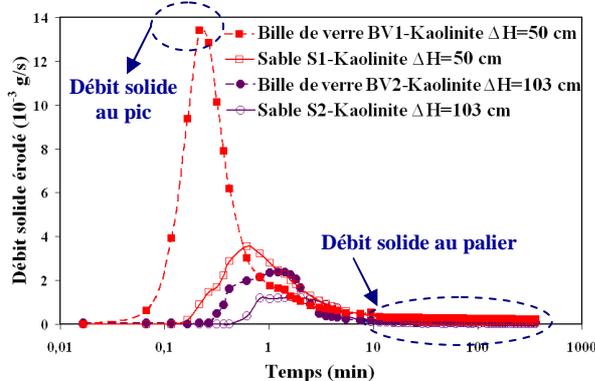


FIG. 3 - Débit solide érodé en fonction du temps

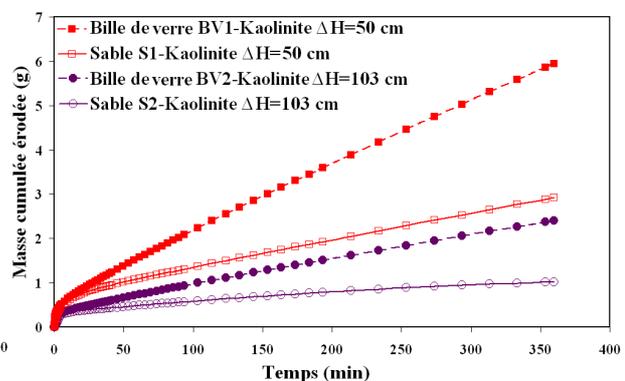


FIG. 4 - Masse cumulée érodée en fonction du temps

Quel que soit le milieu, les courbes de masse cumulée érodée (fig. 4) ont la même allure marquée par une croissance rapide dans les premières minutes suivie d'une croissance très lente et quasi-linéaire jusqu'à la fin de l'essai. Pour une même charge hydraulique, la masse cumulée érodée après un temps t dépend très fortement de la matrice granulaire constituant le squelette du milieu. Comme pour le débit solide, la masse cumulée érodée dans le milieu billes de verre-kaolinite est toujours supérieure à celle mesurée dans le milieu sable-kaolinite de même granulométrie.

Ces résultats sont liés aux conductivités hydrauliques très différentes des deux types de milieux (Cf. tableau 1). En effet, sous une même charge hydraulique, les vitesses d'écoulement sont plus fortes dans les milieux billes de verre-kaolinite que dans les milieux sable-kaolinite. La forme et la rugosité des grains contrôlent la formation des structures granulaires et différencient hydrauliquement les milieux. L'effet du gradient hydraulique observé sur l'érosion des milieux combine en réalité les effets de la vitesse d'écoulement et de la forme ainsi que la rugosité des grains sur la capacité de mobilisation et de transport de particules. Ces observations sur le débit solide et la masse cumulée érodés nous amène à penser que la vitesse d'écoulement dans le milieu est un paramètre majeur qui contrôle l'érosion dans

nos essais. Pour vérifier cette hypothèse nous avons tracé, sur les figures 5a et 5b, l'évolution du débit solide érodé maximal (ε') en fonction de la vitesse initiale d'écoulement pour tous les essais réalisés avec les quatre milieux (BV1-kaolinite, S1-kaolinite, BV2-kaolinite et S2-kaolinite).

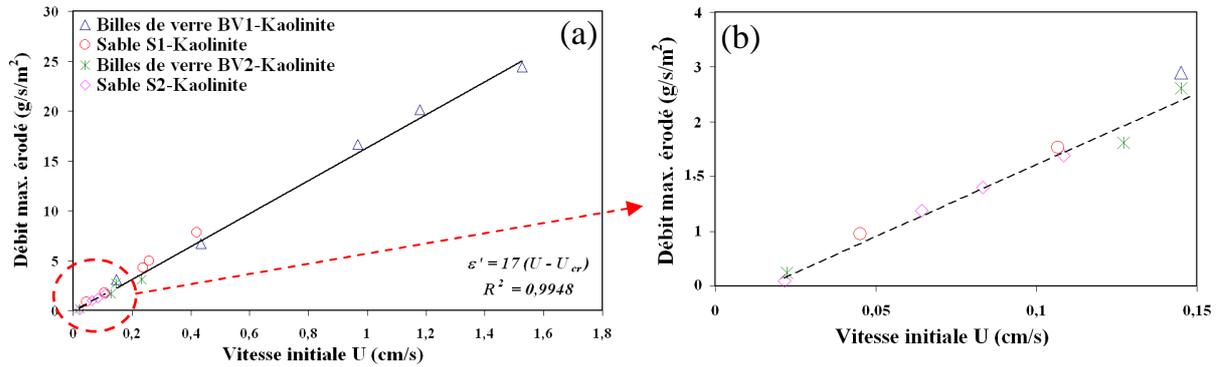


FIG. 5 - Débit solide érodé maximal en fonction de la vitesse initiale pour différentes textures testées

Tous les points sont positionnés sur une même droite indiquant que le débit solide maximal érodé est proportionnel à la vitesse initiale d'écoulement. Un zoom autour des vitesses très faibles (fig.5b) confirme l'évolution linéaire du débit solide maximal en fonction de la vitesse initiale d'écoulement. La droite caractérisant l'évolution du débit solide maximal en fonction de la vitesse initiale d'écoulement indique l'existence d'une vitesse d'écoulement critique très faible en dessous de laquelle il n'y a pas érosion du milieu. En effet, en dessous de cette vitesse critique, les forces hydrodynamiques mobilisées sont insuffisantes pour arracher et/ou transporter les particules jusqu'à la sortie de la colonne. Elles sont insuffisantes pour éviter le dépôt des particules mobilisées à un horizon plus loin dans le milieu.

L'évolution du débit solide maximal érodé en fonction de la vitesse d'écoulement exprime une loi d'érosion définie par la relation linéaire avec seuil :

$$\begin{cases} \varepsilon' = a(U - U_{cr}) & \text{si } U > U_{cr} \\ \varepsilon' = 0 & \text{si } U \leq U_{cr} \end{cases} \quad (2)$$

Avec U la vitesse initiale d'écoulement et U_{cr} la vitesse critique au-dessus de laquelle l'érosion du milieu se produit. Pour nos essais une valeur très faible de la vitesse critique est obtenue $U_{cr} = 7E-3$ cm/s. Le paramètre a et le coefficient du taux d'érosion. Pour nos essais $a = 1,7\text{kg/m}^3$.

Les valeurs très faibles de la vitesse critique et du coefficient de taux d'érosion montrent la grande sensibilité à l'érosion de nos mélanges.

Dans les essais à charge constante, les vitesses d'écoulement chutent plus ou moins fortement avec le temps en conséquence du colmatage du milieu. Par conséquent, les débits solides mesurés au palier ne peuvent être imputés directement aux vitesses initiales d'écoulement. Pour tenir compte de la variation de la vitesse au cours des essais, nous avons reporté sur la figure 6, les débits solides érodés mesurés à un temps fixe au palier en fonction de la vitesse d'écoulement dans le milieu en ce même temps.

Les résultats sur le débit solide érodé au palier indiquent un comportement totalement différent de celui observé pour le débit solide au pic. La figure 6 montre que le débit solide au palier dépend non seulement de la vitesse d'écoulement mais aussi de la structure granulaire du milieu. Les essais menés avec deux milieux de même granulométrie et même porosité totale montrent qu'une même vitesse d'écoulement mobilise plus de particules dans le milieu de matrice granulaire constituée de sable.

Pour un même milieu, les points des différents essais sont positionnés sur une même courbe indiquant là aussi que le niveau de mobilisation au delà du pic dépend uniquement de la vitesse d'écoulement. Pour un milieu donné, l'évolution du débit solide au palier en fonction de la vitesse d'écoulement exprime une loi d'érosion définie par la relation puissance avec seuil :

$$\begin{cases} \varepsilon' = a(U - U_{cr})^m & \text{si } U > U_{cr} \\ \varepsilon' = 0 & \text{si } U \leq U_{cr} \end{cases} \quad (3)$$

Avec U la vitesse d'écoulement au palier à un temps t et m un coefficient de puissance.

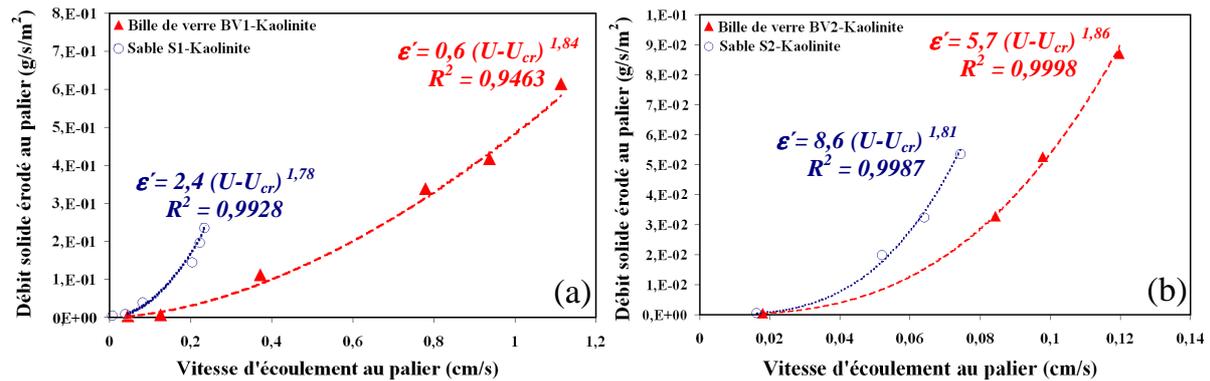


FIG. 6 - Débit solide érodé au palier en fonction de la vitesse d'écoulement au palier pour différents milieux testés (a) S1-kaolinite et BV1 – kaolinite ; (b) S2-kaolinite et BV2 – kaolinite

Dans cette partie de l'essai, les particules sont mobilisées par les contraintes de cisaillement exercées par l'écoulement sur les surfaces des pores. Ces contraintes de cisaillement sont proportionnelles aux vitesses dans les pores. Plus ces vitesses sont élevées, plus ces contraintes sont capables de mobiliser plus de particules. La forme anguleuse et irrégulière des grains de sable favorise la formation d'une structure granulaire avec une distribution porale assez large et par conséquent une grande dispersion de la vitesse de pores. Dans cette structure, les vitesses dans les pores de petites tailles sont suffisamment élevées pour engendrer des contraintes de cisaillement sur les parois capables de mobiliser et transporter plus de particules vers la sortie du milieu. La forme arrondie et régulière des billes de verre favorise au contraire la formation d'une structure granulaire avec une distribution porale homogène et donc pas de pores suffisamment petits dans lesquels les vitesses de pores seraient fortes et capables d'entraîner plus de particules.

Conclusion

Quelques résultats d'essais obtenus suivant une démarche expérimentale pour étudier le phénomène d'érosion interne par suffusion dans un milieu poreux sont présentés. Cette démarche s'appuie sur la quantification et la caractérisation granulométrique des particules fins drainées par l'écoulement ainsi que le suivi des caractéristiques hydrauliques du milieu érodé. Le rôle majeur des caractéristiques structurelles du milieu sur la sensibilité à l'érosion des textures étudiées a été mis en évidence. Pour caractériser la sensibilité à l'érosion des textures testées, des lois d'érosion exprimées en termes de vitesses d'écoulement sont proposées.

References

- [1] Arulanandan K.; & Perry E.B., Erosion in relation to filter design criteria in earth dams, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 109 (GT5), pp. 682-698, 1983.
- [2] Barakat B., Instabilité aux écoulements des milieux granulaires, aspects morphologiques et probabilistes, Thèse Ecole centrale de paris, p 135, 1991.
- [3] Dikinya O.; Hinz C.; & Aylmore G., Decrease in hydraulic conductivity and particle release associated with self-filtration in saturated soil columns, Geoderma, 146, 192–200, 2008.
- [4] Donatella S., Effects of the erosion and transport of fine particles due to seepage flow, International Journal of Geomechanics, Vol. 3, n° 1, 1-111, 2003.
- [5] Fry J. J., Degoutte G. & Goubet A., Érosion interne : Typologie, Détection et Réparation, Barrages and Réservoirs, No.6, Comité Français des Grands Barrages, 1997.
- [6] Govindaraju R. S.; Reddi L. N.; & Kasavaraju S. K., A physically based model for mobilization of kaolinite particles under hydraulic gradients, J. Hydrol., 172: 331-350, 1995.
- [7] Karpoff, K. P., the use of laboratory tests to develop design criteria for protective filters, Proc. Am. Soc. Testing Mater, 55, 1182-1193, 1955.
- [8] Reddi L.N., Lee I., Bonala M.V.S., Comparison of internal and surface erosion using flow pump test on a sand-kaolinite mixture, Geotechnical testing journal, Vol. 23, n°1, p. 116-122, 2000.
- [9] Wan C.F., and Fell R., Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams, Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division, ASCE, Vol. 130, pp. 373-380, 2004.