
Effets géométriques sur l'érosion interne d'un milieu granulaire reconstitué

Alhaddad Samiara; Alem Abdellah; Ahfir Nasre-dine; Wang Hua-Qing ; Benamar Ahmed

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

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'érosion interne est analysée à partir du suivi de l'évolution des caractéristiques hydrauliques, des milieux constitués, la quantification et caractérisation granulométrique des particules évacuées. Des lois d'érosion caractérisant l'érodabilité des différentes textures testées sont proposées. Les résultats obtenus montrent clairement l'effet majeur de la structure sur les réponses dans l'espace et dans le temps des milieux testés.

ABSTRACT. An experimental study on internal erosion of a porous media 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 internal erosion is analyzed by monitoring the spatio - temporal changes in the hydraulic characteristics and by quantification and characterization of particle size distribution of particles in the effluent. Laws characterizing the erodibility of different textures are proposed. It is observed that the grains shape plays an important role in the erodibility and spatio - temporal responses of the media.

MOTS-CLÉS: suffusion, étude expérimentale, effet de la structure, perméabilité.

KEYWORDS: suffusion, experimental study, effect of structural, permeability.

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 (Fry et al., 1997). 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 (Barakat, 1991). 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 (Karpoff et al. 1955). 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 (Arulanandan et al. 1983; Reddi et al. 2000; Wan et al. 2004; Dikinya et al. 2008). 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 (Govindaraju et al., 1995; Donatella, 2003).

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. 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 Méthodes

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 dont la distribution de tailles est comprise entre 2 et 35 μm .

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 ΔH (cm)	Porosité initiale de mélange (%)	γ_d (KN/m ³)	Perméabilité initiale (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
Matériau artificiel (BV)	BV1: 800-1000 μm			28			
	BV2: 315-630 μm			50	42,2	15,2	5,50E-04
				67			
				103			

Tableau 1. Paramètres physiques des échantillons de sol reconstitués

Les essais d'érosion sont réalisés à charge hydraulique constante avec le dispositif expérimental décrit sur la figure 1. La colonne, en plexiglas transparent, est disposée horizontalement et a un diamètre de 3,2 cm et une longueur de 22,6 cm. Elle est équipée de piézomètres répartis sur sa longueur qui permettent de suivre l'évolution de la pression dans le milieu pendant les essais. Un débitmètre numérique MacMillan est installé à la sortie de la colonne pour mesurer le débit d'écoulement. Le système de détection à la sortie de la colonne est composé d'un turbidimètre de marque Fisher. L'étalonnage préalable du turbidimètre permet de remonter à la concentration en particules de l'effluent à partir de la mesure de sa turbidité. Tout l'appareillage est relié à la centrale d'acquisition LabView contrôlée par un ordinateur. Un compteur de particules Coulter Multisizer II est utilisé pour analyser la distribution de taille des particules fines restituées à l'exutoire de la colonne à différents temps fixés.

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 en place dans la colonne est saturé horizontalement sous une charge hydraulique très faible ($\Delta H = 2$ cm) pour ne pas perturber le milieu poreux avant le début de l'essai. L'essai d'érosion 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 du débit d'écoulement, de la turbidité des eaux évacuées, de la

granulométrie des particules évacuées et finalement les pressions le long de l'échantillon.

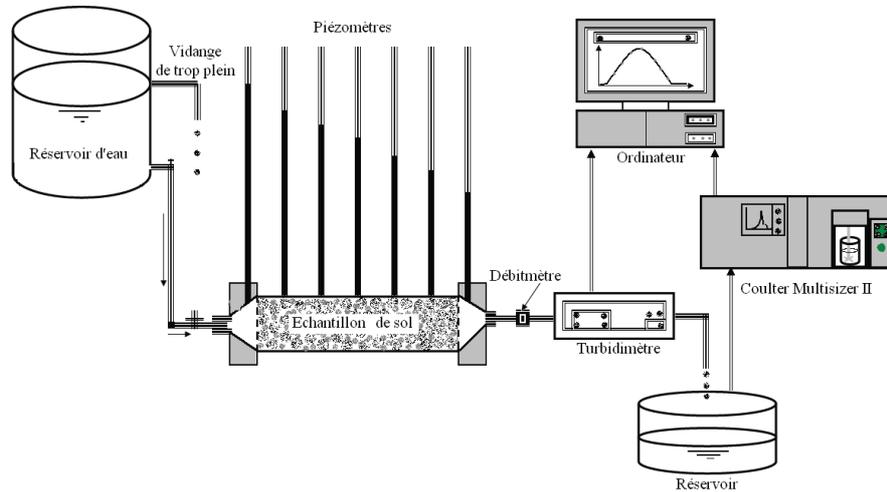


Figure 1. Schéma général du dispositif expérimental

3. Résultats et analyses

3.1 Evolution du débit solide et de la masse cumulée érodée

La masse des fines évacuées par unité de temps, appelée débit solide, est obtenue en multipliant la concentration massique des particules fines dans l'effluent par le débit liquide 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 .

Les figures 2 et 3 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 ($\Delta H = 50$ cm et $\Delta H = 103$ cm).

Les courbes de débit solide ont la même forme typique en trois phases : (i) une première phase où le débit solide subit une croissance brutale pour atteindre un pic élevé, (ii) une deuxième phase où le débit solide subit une décroissance jusqu'à un palier de niveau très bas, et (iii) une troisième phase dans laquelle le débit solide se stabilise au palier atteint à la fin de la deuxième phase. Notons que le stock de particules fines mobilisables dans le milieu étant fini, si l'écoulement est maintenu beaucoup plus longtemps, la concentration à la sortie chuterait pour atteindre zéro. Ce comportement déjà observé par d'autres auteurs (Govindaraju et al. 1995), peut être corrélé avec l'évolution du flux hydraulique durant l'essai. En considérant la procédure expérimentale employée, le débit liquide évolue suivant deux phases : (i) une première phase transitoire très brève correspondant à l'établissement de l'écoulement et qui se traduit par une augmentation rapide du flux (la charge en tête

de l'échantillon croit brutalement pour atteindre sa valeur prévue pour l'essai) et (ii) une deuxième phase qui correspond au régime d'écoulement permanent (la charge est maintenue constante jusqu'à la fin de l'essai). C'est dans la phase transitoire de l'écoulement que se produit la mobilisation forte et rapide de particules qui se traduit par une croissance brutale et un pic élevé du débit solide. Ceci implique que les forces principales qui accompagnent les gradients de charge dans cette phase, jouent un rôle principal dans la mobilisation de particules en comparaison au rôle joué par les contraintes de cisaillement hydrauliques liées aux vitesses d'écoulement. A la fin de la phase transitoire, la mobilisation de particules liée au gradient de charge est terminée ; seule la mobilisation, de particules, par les contraintes de cisaillement hydrauliques, appliquées sur les parois des pores, et qui dépendent des vitesses porales continue. Cependant, l'écoulement continue en même temps de drainer jusqu'à épuisement d'une partie du stock de particules mobilisées durant la phase transitoire, l'autre partie sera retenue à des horizons plus loin par le milieu entraînant son colmatage. Le débit solide érodé diminue alors rapidement pour atteindre le palier de niveau très bas correspondant à la capacité de mobilisation des contraintes de cisaillement hydrauliques. La mobilisation est stabilisée à ce niveau jusqu'à la fin de l'essai.

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 de la matrice granulaire. 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 sable-kaolinite sont inférieures à celles mesurées à la sortie du milieu billes de verre-kaolinite.

Les pics de débit solide érodé sont plus étalés dans le temps pour les deux milieux plus fins BV2-kaolinite et S2-kaolinite. La granulométrie plus fine de la matrice rend les deux milieux moins perméables avec des dispersions plus élevées. Les particules mobilisées par l'écoulement mettent plus de temps à être évacuées à l'extérieur de l'échantillon.

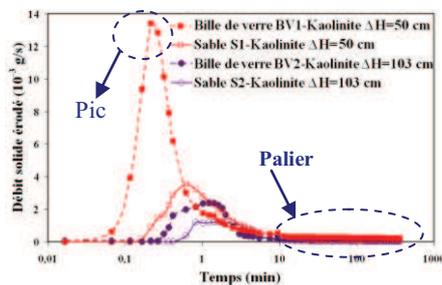


Figure 2. Débits solides érodés en fonction du temps

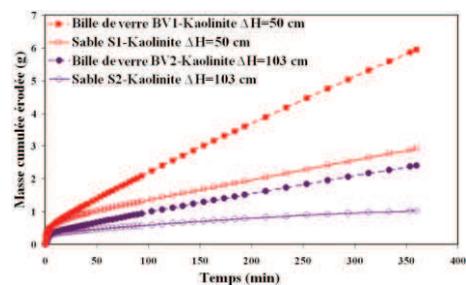


Figure 3. Masse cumulée érodée en fonction du temps

Quel que soit le milieu, les courbes de masse cumulée érodée (figure 3) 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 sur les débits solides et masses cumulées sont liés aux perméabilités 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 structure granulaire 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 la figure 4, 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. On constate que, quel que soit la matrice granulaire, tous les points se placent sur une droite indiquant une relation linéaire entre le débit solide maximal érodé et la vitesse initiale d'écoulement. Le niveau de mobilisation des particules est fixé uniquement par la vitesse d'écoulement initiale indépendamment de la matrice granulaire. Ce résultat montre que dans les conditions de nos essais, les mécanismes de mobilisation de particules sont principalement hydromécaniques (gradients de pression, vitesse d'écoulement). Ce sont les caractéristiques hydrauliques du milieu (perméabilité, distribution porale) et les conditions hydrauliques d'essai qui contrôlent la vitesse d'écoulement et par conséquent l'amplitude du pic de mobilisation des particules. La taille des grains de la matrice n'a pas d'influence visible directe sur le niveau de la mobilisation des particules. Ceci peut s'expliquer par les tailles des pores, dans les milieux reconstitués, qui restent largement supérieures à la taille maximale des particules de kaolinite. La diminution de la taille granulaire du milieu induit seulement un changement de sa perméabilité et des vitesses d'écoulement dans les pores.

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 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.

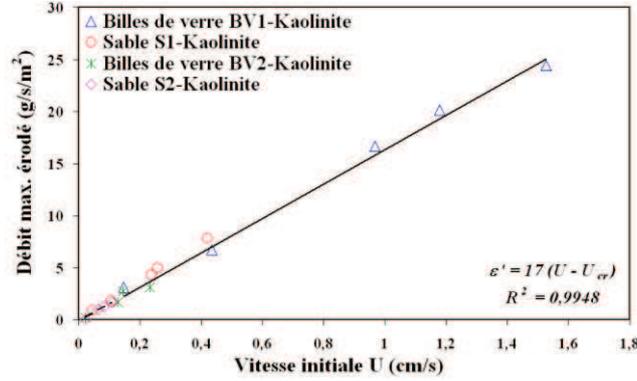


Figure 4. Débit solide érodé maximal en fonction de la vitesse initiale

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 :

$$\begin{cases} \varepsilon' = \alpha U - U_{cr} & \text{si } U > U_{cr} \\ \varepsilon' = 0 & \text{si } U \leq U_{cr} \end{cases} \quad [1]$$

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 α et le coefficient du taux d'érosion. Pour nos essais $\alpha = 17g/m^3$.

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

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 cette variation de la vitesse au cours des essais, nous avons reporté sur la figure 5, 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. 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 sableuse.

A cette période de l'essai, les particules sont mobilisées par les contraintes de cisaillement exercées par l'écoulement sur les surfaces des pores. Ces contraintes 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 pore. Dans cette structure, les vitesses dans les pores de petites tailles sont suffisamment élevées pour engendrer des contraintes de cisaillement sur les parois capable 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 seraient fortes capables d'entraîner plus de particules.

Pour une même texture, 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 :

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

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

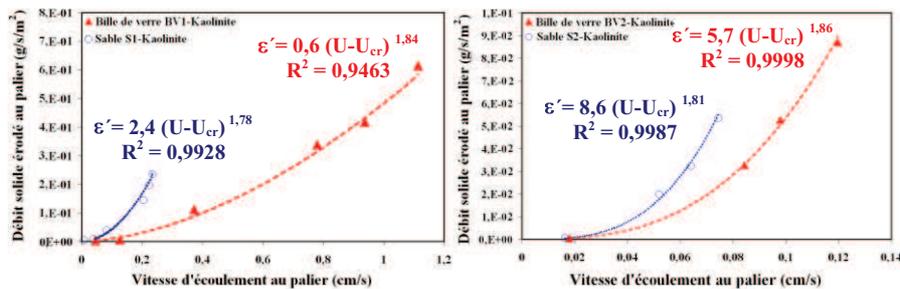


Figure 5. Débit solide érodé au palier en fonction de la vitesse d'écoulement au palier pour différents milieux testés

3.2 Perméabilité globale du milieu

L'évolution de la perméabilité relative (K/K_0) du milieu poreux en fonction du volume d'eau injecté est représentée sur la figure 6 les deux milieux BV1-kaolinite et S1-kaolinite. Le comportement des milieux reconstitués dépend fortement de la matrice granulaire constituant le squelette du milieu.

Les perméabilités des deux milieux BV1-Kaolinite et S1- Kaolinite chutent progressivement jusqu'à une valeur minimale puis augmente. La chute est plus rapide dans le milieu sableux indiquant que ce milieu est plus colmatant. De même la croissance de la perméabilité est elle aussi plus marquée dans le milieu sableux. Le colmatage plus important de ce milieu favorise l'apparition de surpressions de plus en plus fortes derrière les zones de blocages. Lorsque ces pressions sont suffisamment élevées, elles peuvent déclencher un processus de décolmatage qui entraîne une croissance de sa perméabilité.

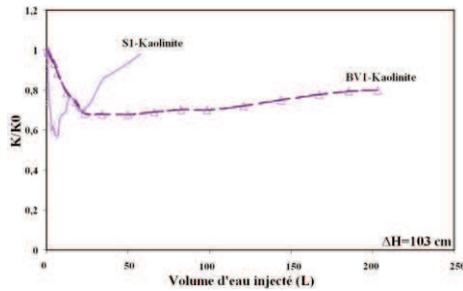


Figure 6. Perméabilité relative en fonction du volume d'eau injecté

3.3 Analyse granulométrique des particules dans les effluents

Des analyses granulométriques sont réalisées sur des échantillons d'effluent prélevés à des temps fixes durant les essais (figure 7a). Les résultats de ces analyses sont donnés sur les figures 7b et 7c pour les milieux S1-kaolinite et BV1-kaolinite, respectivement. Ces figures montrent que les grosses particules sont mieux restituées dans le milieu de matrice granulaire bille de verre. Dans le milieu S1-Kaolinite les particules supérieures à 25 μm sont totalement filtrées. Le diamètre modal des particules dans les effluents du milieu S1-kaolinite reste toujours inférieur à celui observé dans les effluents du milieu BV1-kaolinite ; les deux modes étant toujours inférieurs au diamètre modal des particules présentes initialement dans les mélanges. La matrice sableuse constituée de grains anguleux filtre mieux les grosses particules que la matrice billes de verre constituée de grains de forme arrondie. Ces observations justifient en partie le colmatage plus rapide des milieux de matrice granulaire constituée de sable.

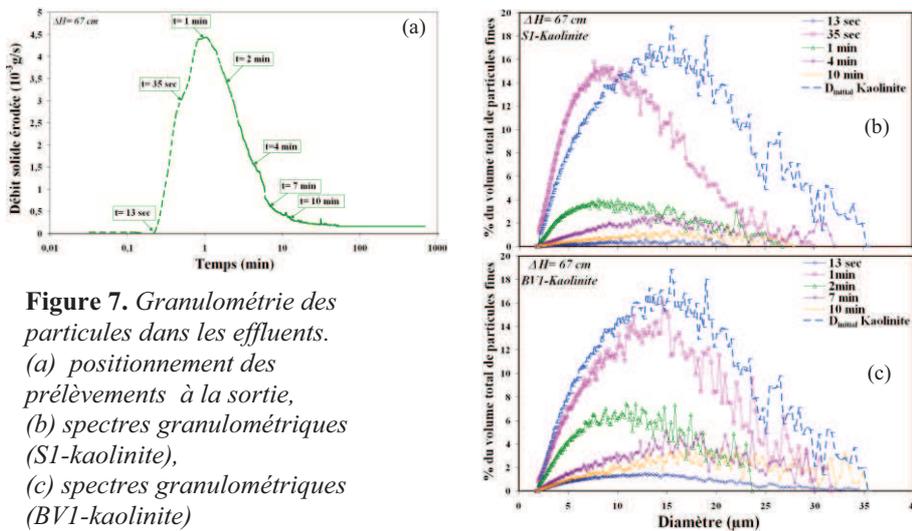


Figure 7. Granulométrie des particules dans les effluents.
 (a) positionnement des prélèvements à la sortie,
 (b) spectres granulométriques (S1-kaolinite),
 (c) spectres granulométriques (BV1-kaolinite)

4. 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 fines 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 et des lois d'érosion exprimées en termes de vitesses d'écoulement sont proposées. Il a été observé une évolution temporelle de la granulométrie des particules drainées par les effluents. Un milieu constitué de grains anguleux filtre les grosses particules et colmate plus prématurément.

5. Bibliographie

- 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.
- Barakat B., Instabilité aux écoulements des milieux granulaires, aspects morphologiques et probabilistes, Thèse Ecole centrale de paris, p 135, 1991.
- 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.
- 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.
- Fry J. J, Degoutte G. & Goubet A., Érosion interne : Typologie, Détection et Réparation, Barrages et Réservoirs, No.6, Comité Français des Grands Barrages, 1997.
- Govindaraju R.S., Reddi L.N., Kasavaraju S.K. "A physically based model for mobilization of kaolinite particles under hydraulic gradient" *J. Hydrol.*, 1995, 172: 331-350
- Karpoff, K. P., the use of laboratory tests to develop design criteria for protective filters, Proc. Am. Soc. Testing Mater, 55, 1182-1193, 1955.
- 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.
- WAN C. F.; & 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.