
Phénomène de suffusion : analyse et caractérisation

Nguyen Hong Hai, Marot Didier, Bendahmane Fateh

Université de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM, UMR CNRS 6183)-BP 420- 44606 Saint-Nazaire cedex France

didier.marot@univ-nantes.fr

RÉSUMÉ. A l'aide d'un érodimètre triaxial, des essais de caractérisation de la sensibilité à la suffusion sont menés sur un sable argileux, à débit imposé ou à gradient hydraulique imposé. L'analyse des essais permet de distinguer trois étapes. Tout d'abord une suffusion d'une très faible quantité d'argile est détectée à l'aval de l'échantillon. Cette suffusion est immédiatement suivie d'un fort accroissement du gradient hydraulique qui se poursuit même au cours de la deuxième étape qui est caractérisée par la très faible présence de particules érodées dans l'effluent. Lors de la troisième étape, une suffusion plus importante d'argile apparaît et elle entraîne ensuite une érosion régressive d'argile et de sable. L'analyse de l'énergie dissipée par le fluide permet de caractériser de manière unique la sensibilité du sol à la suffusion et à l'érosion régressive pour les essais à débit ou à gradient imposés.

ABSTRACT. Tests were performed with a triaxial erodimeter, under a constant flow rate or under a constant hydraulic gradient, in order to characterize the erodibility of clayey sand. The test analysis allows to distinguish three steps. First, suffusion of a small quantity of clay is detected on downstream. This suffusion is immediately followed by a high increase of the hydraulic gradient which continues during the second step. The second step is characterized by very low amount of particles in effluent. During the third step, high suffusion of clay appears and induces backward erosion of clay and sand. The analysis based on energy expended by fluid flow permits to characterize the soil sensitivity to suffusion and to backward erosion for tests under constant flow rate or under constant hydraulic gradient.

MOTS-CLÉS: suffusion, filtration, énergie, sensibilité à l'érosion,

KEYWORDS: suffusion, filtration, energy, erodibility

1. Introduction

Selon la terminologie établie dans le cadre du projet ERINOH (2009), l'érosion interne peut être décrite suivant deux types : l'érosion d'interface et l'érosion de volume ou suffusion. Dans le cas de la suffusion, seule la fraction fine du sol est mobilisée par l'écoulement.

Dans la littérature, la caractérisation de la suffusion a essentiellement été réalisée par l'élaboration de critères d'évaluation de l'initiation du processus. Ces critères reposent principalement sur l'analyse de la courbe granulométrique du sol (notamment Kenney et *al.*, 1985 ; Burenkova, 1993 ; Li et *al.*, 2008), ou sur l'expression d'un gradient hydraulique critique (Skempton, 1994 ; Li, 2008). Wan et *al.* (2008) ont montré que les critères granulométriques les plus couramment utilisés sont conservatifs et par ailleurs l'expression d'un gradient hydraulique critique est fortement influencée par la taille des échantillons testés (Marot et *al.*, 2011a).

Afin de s'affranchir de ces effets d'échelle et de prendre en compte l'historique de chargement hydraulique, Marot et *al.* (2011a) ont développé une approche qui consiste à déterminer l'énergie dissipée par le fluide lors de son écoulement interstitiel. Dans le cas de la suffusion, la puissance d'érosion par le fluide peut s'exprimer par :

$$\frac{dW_{\text{erosion}}}{dt} = \rho g \Delta z Q + Q \Delta P \quad [1]$$

avec ρ : masse volumique du fluide, g : accélération de la pesanteur, Δz : longueur de l'écoulement, Q : débit du fluide injecté, ΔP : écart de pression amont-aval.

L'énergie correspondante, E_{erosion} est déterminée par intégration temporelle de la puissance d'érosion sur la durée de l'essai.

Avec l'objectif de caractériser la sensibilité à l'érosion d'interface des sols, un indice de résistance à l'érosion I_{α} a été proposé et a permis l'obtention d'une classification unique pour les essais de Hole Erosion Test et de Jet Erosion Test (Marot et *al.*, 2011b). L'indice de résistance à l'érosion s'exprime par :

$$I_{\alpha} = -\log_{10} \left(\frac{\text{masse sèche érodée}}{E_{\text{erosion}}} \right) \quad [2]$$

Dans le cadre de la présente étude, l'approche énergétique et l'indice de résistance à l'érosion sont utilisés afin de caractériser la sensibilité à la suffusion d'un sable argileux lors d'essais menés à débit ou à gradient imposés.

2. Essais de caractérisation de la suffusion

2.1. Montage expérimental

L'érodimètre utilisé est constitué d'une cellule triaxiale spécifique (Bendahmane et al., 2008) permettant la préparation des échantillons et la réalisation des essais d'érosion sans déconfinement des échantillons. La Figure 1 présente un schéma général de l'ensemble du dispositif.

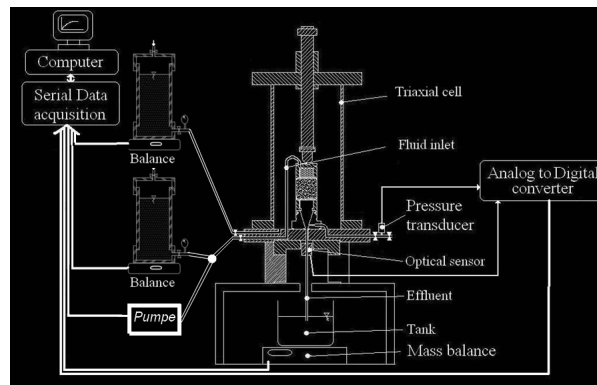


Figure 1. Schéma de l'érodimètre triaxial utilisé

L'écoulement vertical descendant au sein de l'échantillon est généré soit à débit imposé par une pompe à engrenage soit sous gradient imposé à l'aide d'un réservoir sous pression contrôlée. Dans le cas d'un essai à débit imposé, un capteur de pression permet la mesure de la pression en tête d'échantillon. Dans le cas d'un essai à gradient imposé, la pesée en continue du réservoir amont permet la mesure du débit injecté. La caractérisation de l'effluent est réalisée par échantillonnage régulier au cours des essais et également par la mesure en continue de la turbidité à l'aide d'un capteur optique dédié (Marot et al., 2011c). Ce capteur optique est doté de quatre diodes électroluminescentes (DEL) : deux de couleur rouge et d'intensité lumineuse différente, une de couleur verte et une bleue.

2.2. Matériaux testés et protocole expérimental

Les échantillons sont constitués d'un mélange de sable de Fontainebleau et de kaolinite Proclay avec un pourcentage massique respectif de 75% et 25%. Sur la Figure 2, sont présentées les distributions granulométriques des 2 matériaux et du mélange obtenu après malaxage mécanique (coefficient d'uniformité=121, $d_{50}=200\mu\text{m}$). Les poids volumiques des grains de sable et des particules d'argile sont respectivement $26,5\text{kN/m}^3$ et $26,2\text{kN/m}^3$. La composition chimique de la kaolinite (analyse par fluorescence RX indiquée par le fournisseur) est SiO_2 : 56,4%, Al_2O_3 : 28,7%.

Les échantillons sont réalisés par double pistonnage avec une teneur en eau de 9% et un poids volumique sec de 16kN/m^3 . Après leur mise en place dans la cellule triaxiale, une pression de confinement de 15kPa est appliquée afin d'éviter tout écoulement préférentiel entre l'échantillon et la membrane qui l'enveloppe. La phase de saturation des échantillons débute par un écoulement ascendant de dioxyde de carbone pendant 15 minutes. La saturation s'effectue ensuite pendant 24 heures sous écoulement ascendant généré par un gradient unité et avec de l'eau désaérée et déminéralisée.

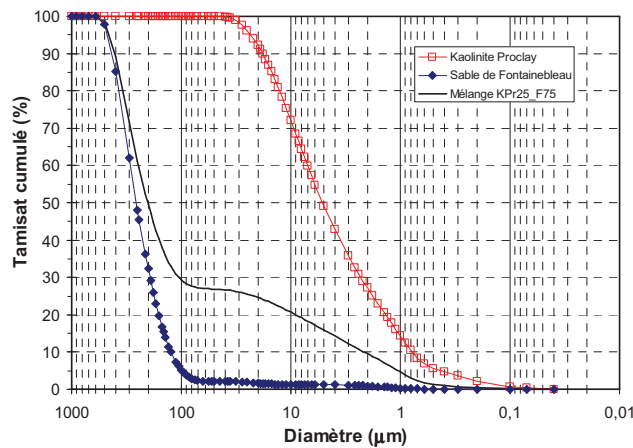


Figure 2. Distribution granulométrique des matériaux utilisés

2.3. Programme expérimental et résultats types

2.3.1 Caractéristiques des essais réalisés

Deux essais ont été effectués : l'essai S1 avec un écoulement à débit constant $Q=1,24\text{ml/min}$ et l'essai S2 avec un gradient hydraulique global constant (entre la tête d'injection et la sortie de l'échantillon) $i=10\text{m/m}$.

2.3.2 Taux d'érosion et masse érodée

Le taux d'érosion massique en argile est déterminé grâce à la mesure du débit d'eau injecté et à la mesure par le capteur optique de la concentration massique d'argile en suspension dans l'effluent. La section considérée pour l'expression du taux d'érosion est la section transversale de l'échantillon. La mesure du taux d'érosion peut être réalisée même en présence d'une très faible érosion d'argile

(précision supérieure à $0,1\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$). La présence de grains de sable dans l'effluent est détectée par la différence des signaux des DEL bleue et verte et entraîne de fortes variations du signal des diodes rouges (Marot et *al.*, 2011c). La masse des grains de sable est alors suffisante (masse supérieure à 10mg) pour permettre la quantification de la masse érodée par pesée.

Les variations du taux d'érosion au cours des 30 premières minutes des essais sont représentées sur la Figure 3(a) et jusqu'à $t=65\text{min}$ sur la Figure 3(b).

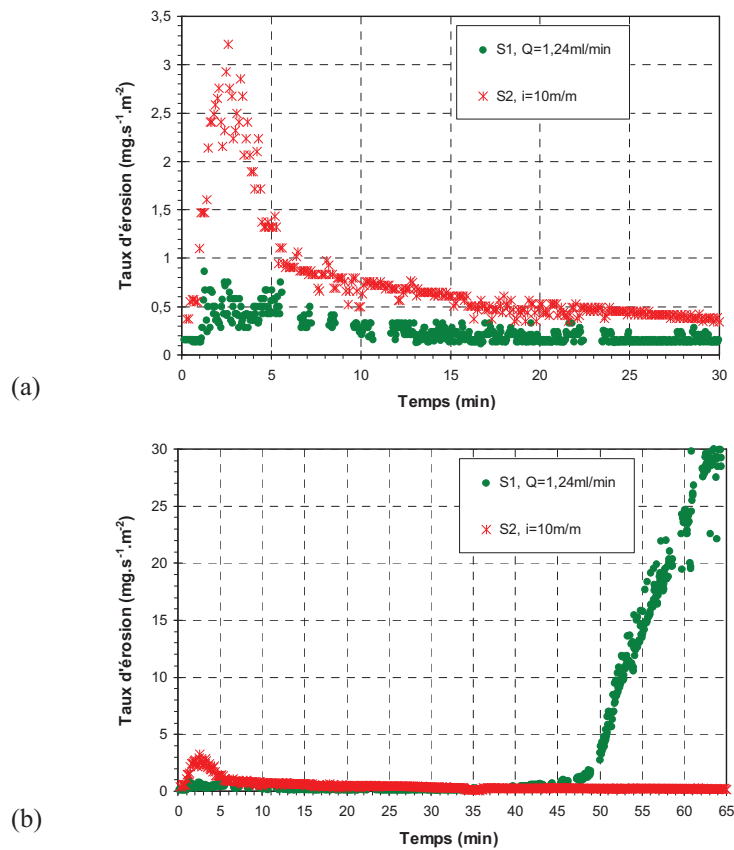


Figure 3. Taux d'érosion mesuré par capteur optique en fonction du temps pour (a) $t \leq 30\text{min}$ et (b) $t \leq 65\text{min}$

Le taux d'érosion pour l'essai S1 atteint $0,9\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ en une minute puis il décroît et à partir de $t=11\text{min}$, il se stabilise à $0,2\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. A $t=45\text{min}$, le taux d'érosion augmente ensuite régulièrement jusqu'à atteindre $30\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. A $t=64\text{min}$, du sable est détecté dans l'effluent.

Pendant l'essai S2, le taux d'érosion croît en 2 minutes jusqu'à $3,2\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ puis, au cours des 3 minutes suivantes il diminue jusqu'à $1\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Sa diminution est ensuite beaucoup plus lente (de l'ordre de $0,03\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ par minute).

La Figure 4 présente la masse érodée en fonction du temps pour les deux essais. Au cours de l'essai S1, la masse érodée croît linéairement en fonction du temps à partir de $t=66\text{min}$ et suivant un accroissement moyen de $0,08\text{g}$ par minute. Pour l'essai S2, à partir de $t=247\text{min}$ du sable est détecté dans l'effluent, la masse érodée augmente alors suivant un accroissement moyen de $0,02\text{g}$ par minute. Pour les deux essais, le développement de cette érosion de sable et d'argile s'accompagne d'une diminution du volume de l'échantillon qui débute dans la partie aval de l'échantillon puis qui progresse vers l'amont. Cette érosion est donc qualifiée de régressive.

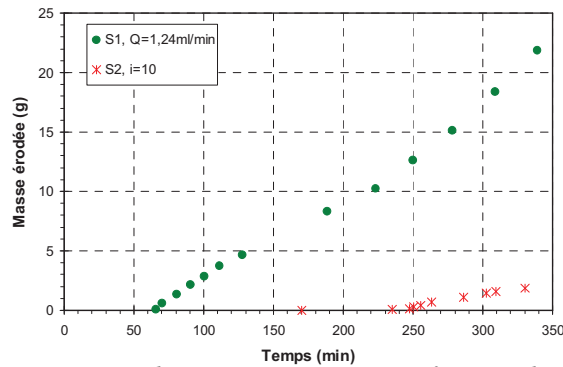


Figure 4. Masse érodée mesurée par pesée en fonction du temps

2.3.3 Gradient hydraulique et conductivité hydraulique

La suffusion d'argile et l'érosion régressive de sable argileux s'accompagnent d'une modification des propriétés hydrauliques des échantillons.

Au cours de l'essai S1 à débit constant, le gradient hydraulique global reste sensiblement constant à 7m/m pendant les dix premières minutes de l'essai (cf. Figure 5).

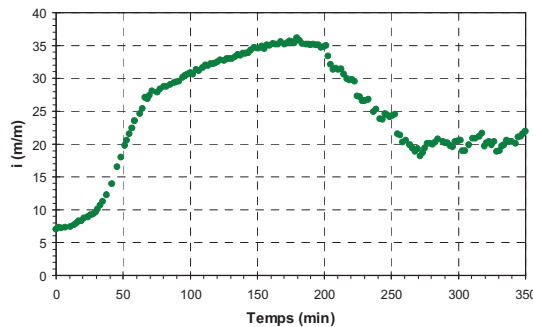


Figure 5. Gradient hydraulique global en fonction du temps (essai S1)

Entre $t=10\text{min}$ et $t=70\text{min}$ le gradient augmente de 7m/m à 27m/m . Son augmentation est ensuite moins prononcée jusqu'à $t=180\text{min}$. Entre $t=180\text{min}$ et $t=200\text{min}$, $i=35\text{m/m}$, puis le gradient décroît jusqu'à 18m/m à $t=271\text{min}$. Le gradient reste ensuite voisin de 20m/m jusqu'à la fin de l'essai.

Sur la Figure 6 sont présentées les variations de la conductivité hydraulique k en fonction du temps. La conductivité hydraulique initiale est pour l'essai S1 : $k_{i,S1}=1,6.10^{-6}\text{m/s}$ et pour l'essai S2 : $k_{i,S2}=2,5.10^{-6}\text{m/s}$. Pour les deux essais, k décroît de manière similaire jusqu'à $t=60\text{min}$ pour atteindre $3,7.10^{-7}\text{m/s}$. Entre $t=60\text{min}$ et $t=200\text{min}$, pour l'essai S1 k diminue légèrement jusqu'à $1,8.10^{-7}\text{m/s}$. Dans ce même intervalle de temps, k décroît d'avantage pour S2 avec une valeur de l'ordre de $6,5.10^{-8}\text{m/s}$ à $t=200\text{min}$. Les évolutions de k sont ensuite opposées pour les 2 essais, pour S1 k augmente jusqu'à 5.10^{-7}m/s alors que k continue de diminuer pendant l'essai S2 (valeur finale $k_{f,S2}=1,9.10^{-8}\text{m/s}$).

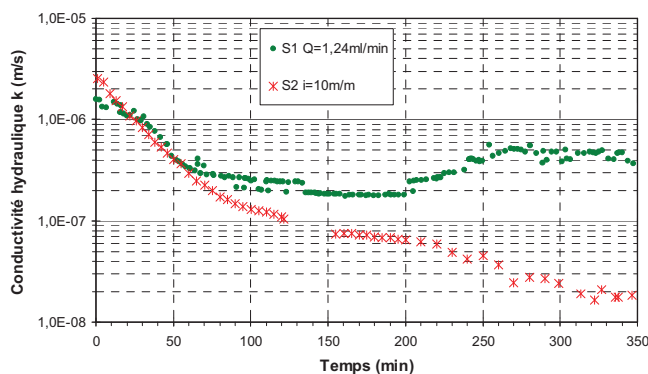


Figure 6. Conductivité hydraulique en fonction du temps

3. Interprétations des résultats

3.1. Analyse phénoménologique

La confrontation des différentes mesures nous indique tout d'abord que la présence de particules érodées dans l'effluent n'est qu'un élément de la réponse globale du sol à la suffusion d'argile et à l'érosion régressive de sable argileux. La suffusion d'argile s'accompagne en effet d'une diminution de la conductivité hydraulique et lors d'un écoulement à débit constant elle induit également un accroissement du gradient hydraulique global.

Au début de l'essai à débit constant, lors de la suffusion d'une faible quantité d'argile, le gradient hydraulique global reste sensiblement constant. L'interruption de cette suffusion précède un accroissement important du gradient hydraulique. Nous pouvons supposer que lors de la suffusion, seule une partie des particules détachées sort de l'échantillon, l'autre partie est filtrée au cœur de l'échantillon ce qui produit

un colmatage. L'amplification de ce colmatage entraîne un accroissement du gradient hydraulique. Enfin une importante suffusion d'argile est constatée et elle précède une érosion régressive d'argile et de sable. Cette érosion régressive se produit 64 minutes après le début de l'essai S1, le gradient hydraulique global correspondant est alors $i=25\text{m/m}$. Dès l'initiation de l'érosion régressive, la diminution de la conductivité hydraulique est limitée, ensuite elle s'accompagne d'une augmentation de la conductivité.

En comparaison avec le cas de chargement hydraulique précédent, dans le cas de l'essai à gradient hydraulique constant, la conductivité hydraulique diminue d'avantage et l'érosion régressive se produit uniquement à $t=247\text{min}$ avec un gradient hydraulique global plus faible ($i=10\text{m/m}$). Cette diminution de la conductivité hydraulique est probablement due à un colmatage qui peut entraîner la génération d'importants gradients hydrauliques locaux. Ceux-ci peuvent alors provoquer localement un débouillage puis une érosion régressive généralisée.

Pour caractériser la sollicitation hydraulique, responsable de la suffusion qui elle-même entraîne l'érosion régressive, il convient donc de tenir compte à la fois du débit ou de la vitesse de l'écoulement et du gradient de pression. Par ailleurs la succession des différentes étapes d'érosion et l'évolution temporelle des caractéristiques hydrauliques associées mettent en évidence la nécessité de prendre aussi en compte l'historique du chargement hydraulique.

3.2. Caractérisation énergétique

Avec l'objectif de prendre en compte les paramètres susmentionnés pour caractériser le chargement hydraulique, la puissance d'érosion est calculée par l'équation [1]. L'énergie dissipée par érosion est alors déterminée par intégration temporelle sur la durée de l'essai. Afin de déterminer la sensibilité à l'érosion du sol testé, l'indice d'érosion est calculé à l'aide de l'équation [2].

Sur la Figure 7, l'indice d'érosion est représenté en fonction du temps pour les deux essais. Au cours des 25 premières minutes des essais, la valeur de l'indice de résistance à l'érosion est identique pour les 2 essais, plus précisément $I_\alpha=4,7$ à $t=4\text{min}$ puis il augmente jusqu'à $I_\alpha=5$. Pour l'essai S1, I_α augmente jusqu'à 5,1 à $t=42\text{min}$ puis il atteint la valeur 4 pour $t=64\text{min}$, c'est-à-dire à l'initiation de l'érosion régressive. Pour l'essai S2, I_α reste sensiblement constant à 4,9 jusqu'à $t=87\text{min}$, il décroît ensuite jusqu'à 4,1 pour $t=235\text{min}$. La mesure suivante effectuée à $t=247\text{min}$ correspond au début de l'érosion régressive.

L'analyse de l'érosion régressive au cours des deux essais montre que I_α diminue et tend asymptotiquement vers 2,3.

Ainsi nous pouvons constater que pour les deux essais, en cours de suffusion I_α est de l'ordre de 5. A l'initiation de l'érosion régressive, $I_\alpha=4$ et $I_\alpha=2,3$ à la fin de l'érosion régressive. Nous obtenons donc les mêmes ordres de grandeurs de l'indice de résistance à l'érosion pour les différentes étapes du développement de l'érosion.

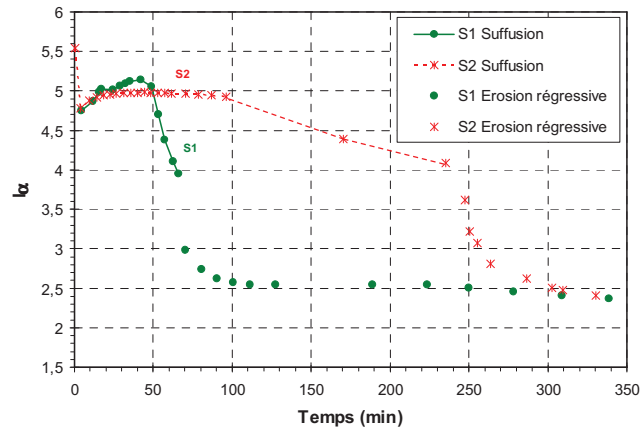


Figure 7. Indice de résistance à l'érosion en fonction du temps

Grâce à l'analyse énergétique, les classifications de la sensibilité à la suffusion et à l'érosion régressive sont donc identiques pour un essai à débit imposé ou à gradient global imposé.

4. Conclusion

Des essais ont été réalisés sur un sable argileux à l'aide d'un érodimètre triaxial avec un écoulement à débit constant ou sous gradient hydraulique global constant. Au cours des essais, les analyses du taux d'érosion et de l'évolution des caractéristiques hydrauliques des échantillons ont permis de distinguer trois étapes d'érosion. La suffusion d'une faible quantité d'argile (détectée par la mesure de la turbidité de l'effluent à l'aide d'un capteur optique dédié) entraîne l'accroissement du gradient hydraulique et la diminution de la conductivité hydraulique. La modification de ces caractéristiques hydrauliques est probablement due à la filtration au cœur des échantillons d'une partie des particules détachées qui engendre un colmatage. L'accroissement résultant du gradient hydraulique peut alors entraîner une érosion régressive de sable argileux. La caractérisation du chargement hydraulique appliqué sur les échantillons est effectuée par la détermination de l'énergie dissipée par le fluide lors de son écoulement interstitiel. L'indice de résistance à l'érosion est ensuite calculé pour déterminer la sensibilité du sol à l'érosion. Pour chacune des trois étapes de l'érosion, la valeur de l'indice de résistance évolue et ses valeurs sont similaires pour les essais à débit ou à gradient imposés. La caractérisation par analyse énergétique de la suffusion et de l'érosion régressive est donc identique pour les deux types de sollicitation hydraulique.

XXIX^e Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 mai 2011.

Ce projet de recherche a été soutenu par la Banque Mondiale (Projet TRIG, Université de Danang, Vietnam), par l'Agence Nationale de la Recherche (Projet ERINOH) et par l'Institut pour la Recherche Appliquée et l'Expérimentation en Génie Civil (IREX).

5. Références

- Bendahmane F., Marot D., Alexis A., « Experimental parametric study of suffusion and backward erosion », *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)* vol. 134, n° 1, 2008, p. 57-67.
- Burenkova V.V., « Assessment of suffusion in noncohesive and graded soils », *Proc. 1st Conf Geo-Filters*, Karlsruhe, Germany, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1993, p. 357-360.
- ERINOH ANR-PGCU, Axe 1 – Essais de laboratoire, rapport final, ANR-IREX-RGC&U, mars 2009, 94p.
- Kenney T.C., Lau D., « Internal stability of granular filters », *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 22, 1985, p. 215-225.
- Li M., Seepage induced instability in widely graded soils, PhD thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2008.
- Li M., Fannin J., « Comparison of two criteria for internal stability of granular soil », *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 45, 2008, p. 1303-1309.
- Marot D., Le V. D., Garnier J., Thorel L., Audrain P., « Study of scale effect in an internal erosion mechanism », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, in press.
- Marot D., Regazzoni P.L., Wahl T., « An energy based method for providing soil surface erodibility rankings », *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, in press.
- Marot D., Bendahmane F., Konrad J.M., « A multichannel optical sensor to quantify particle stability under seepage flow », *Canadian Geotechnical Journal*, in press.
- Skempton A.W., Brogan J.M., « Experiments on piping in sandy gravels », *Géotechnique*, vol. 44, n° 3, 1994, p. 440-460.
- 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 (ASCE)*, vol. 134, n° 3, 2008, p. 401-407.