
Caractérisation de la sensibilité à la suffusion et à l'érosion d'interface par analyse énergétique

Marot Didier

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. Cet article présente une nouvelle méthode d'interprétation basée sur une approche énergétique qui relie l'énergie dissipée par le fluide avec les phénomènes d'érosion. Cette analyse est menée pour le phénomène de suffusion et également pour l'érosion d'interface caractérisée par les essais de trou (HET) ainsi que par les essais de jet immergé (JET). Dans le cas de la suffusion, il est montré que l'analyse énergétique permet de s'affranchir de l'effet d'échelle induit par l'approche en gradient hydraulique. Pour l'érosion d'interface, un nouvel indice de résistance à l'érosion I_α est proposé et une classification unique pour les essais HET et JET est définie.

ABSTRACT. This paper describes a new method of interpretation based on energy approach, linking the expended energy to the erosion phenomenon. This analysis is realized for suffusion and also for interface erosion with the HET and JET devices. In the case of suffusion process, it was shown that using the energy analysis allows to avoid the scale effect induced by hydraulic gradient concept. For interface erosion process, a new erosion resistance index I_α is proposed and an identical soil classification is built with HET and JET.

MOTS-CLÉS : HET, JET, suffusion, énergie, sensibilité à l'érosion, effet d'échelle

KEYWORDS: HET, JET, suffusion, energy, erodibility, scale effect

1. Introduction

1.1. Contexte général

L'érosion interne est responsable de nombreuses instabilités d'ouvrages hydrauliques en terre. Dans la littérature, deux mécanismes principaux d'érosion interne sont distingués : l'érosion de volume, nommée aussi suffusion et l'érosion d'interface.

1.2. Effet d'échelle sur l'initiation de l'érosion

Pour l'érosion de volume, plusieurs auteurs (notamment [KEN, 85], [LIM, 08]) ont proposé une classification de la sensibilité à l'érosion à partir de l'étude de la courbe granulométrique. Par confrontation des critères granulométriques les plus couramment utilisés avec des résultats expérimentaux, [WAN, 08] ont montré que ces critères sont trop conservatifs et ils ont proposé une méthode basée sur les rapports d_{90}/d_{60} et d_{20}/d_5 (avec d_x : ouverture du tamis au travers duquel passent x% de la masse des grains). Toutefois il convient de noter que ces méthodes granulométriques ne prennent pas en compte la porosité du sol, ni le chargement mécanique et la sollicitation hydraulique subis par le sol.

Pour prendre en compte ces différents paramètres, [LI, 08] a exprimé le gradient hydraulique critique d'initiation de la suffusion par :

$$i_{cr} = \alpha \left(\frac{\sigma'_{t0}}{\gamma_w \Delta z} + \frac{\gamma'}{\gamma_w} \right) \quad [1]$$

avec α : facteur de réduction de la contrainte effective défini par [SKE, 94], σ'_{t0} : contrainte effective verticale en tête de l'échantillon de sol quand $i=0$, Δz : hauteur de l'échantillon, γ' : poids volumique déjaugé et γ_w : poids volumique de l'eau. Il convient de noter que dans le cas d'un écoulement vertical, la hauteur de l'échantillon correspond à la longueur de l'écoulement.

Dans le cas du phénomène de renard, [SEL, 88] a exprimé le gradient hydraulique critique par :

$$i_{cr} = \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \tan \Theta \bar{C} \left(1 - 0.65 \bar{C}^{0.42} \right) \quad [2]$$

et

$$\bar{C} = \frac{\left(\frac{d^2}{K} \frac{2d}{L} \right)^{1/3}}{\beta} \quad [3]$$

avec γ'_p : poids volumique déjaugé des particules, Θ : angle de pendage (qui relie les forces verticales et horizontales qui s'appliquent sur une particule), K : perméabilité

intrinsèque, L : longueur de l'écoulement, β : facteur de traînée (rapport de la surface influencée par la traînée et de la section transversale de la particule) et d : diamètre d'une particule (entre d_{65} et d_{75}).

Les équations [1] et [3] sont inversement proportionnelles à la longueur de l'écoulement. Ainsi pour une même nature de sol et une même valeur de contrainte effective verticale, le gradient critique calculé par [1] ou [2] décroît en fonction de la hauteur de la couche de sol considérée. Les valeurs du gradient hydraulique critique déterminées à l'échelle d'un échantillon peuvent donc être plus élevées de plusieurs ordres de grandeur que la valeur à l'échelle réelle.

Une campagne d'essais de suffusion a été réalisée sur des échantillons sablo argileux de trois longueurs Δz différentes et sous macro gravité pour contrôler la contrainte effective appliquée ([MAR, 11a]). Une loi en puissance a été établie entre le taux d'érosion moyen et le gradient hydraulique appliqué, conformément à l'expression proposée par [BEN, 08] pour la suffusion d'argile. Cette loi en puissance est associée à des valeurs de gradient hydraulique critique qui dépendent de la longueur de l'échantillon. Pour ce sable argileux, les valeurs de gradients critiques obtenues sont : $i_{cr}=44$ pour $\Delta z=60\text{mm}$, $i_{cr}=34$ pour $\Delta z=90\text{mm}$ et $i_{cr}=28$ pour $\Delta z=120\text{mm}$.

Pour un accroissement de la hauteur de l'échantillon de 60mm à 120mm, le rapport des gradients critiques mesurés correspondant est : $i_{cr\ 120\text{mm}}/i_{cr\ 60\text{mm}} = 28/44 = 0,64$. Pour cette même plage de variation de la hauteur de l'échantillon, le gradient calculé par [1] conduit à un rapport $i_{cr\ 120\text{mm}}/i_{cr\ 60\text{mm}} = 0,5$. Dans le cas du renard, le gradient critique peut être déterminé par les équations [2] et [3]. Les valeurs des paramètres sont fixées conformément aux données de [SEL, 88] : angle de pendage $\Theta=54^\circ$, perméabilité intrinsèque normalisée pour un sable argileux $K/d^2=0,0045$, facteur de traînée $\beta=4$. Le diamètre des particules est choisi égal au $d_{70}=230\mu\text{m}$. Le rapport des valeurs de gradient hydraulique ainsi calculées est : $i_{cr\ 120\text{mm}}/i_{cr\ 60\text{mm}} = 0,82$.

Par conséquent, pour un accroissement de la hauteur des échantillons de 60mm à 120mm, la diminution correspondante des valeurs mesurées de gradient hydraulique critique est comprise entre la diminution calculée par le critère de [Li, 08] et celle obtenue avec le critère de [SEL, 88].

Dans ce contexte, il convient de s'interroger sur la pertinence de la caractérisation de l'initiation de l'érosion par une expression d'un gradient hydraulique critique associée à des essais menés à l'échelle du laboratoire.

1.3. Différentes caractérisations de la sensibilité à l'érosion d'interface

Les interprétations des essais d'érosion d'interface les plus couramment réalisées ([WAN, 04], [HAN, 04]) sont basées sur la loi linéaire d'érosion qui s'exprime par :

$$m \cdot = k_d(\tau - \tau_c) \quad [4]$$

avec m^* : taux d'érosion, k_d : coefficient d'érosion, τ : contrainte de cisaillement hydraulique, τ_c : contrainte seuil de cisaillement.

Wan et Fell [WAN, 04] proposent une classification des risques de rupture de barrages en terre qui est basée sur la valeur de coefficient d'érosion mesuré par l'essai du Hole Erosion Test (HET). A partir des essais effectués à l'aide du Jet Erosion Test (JET), Hanson et Simon [HAN, 01] ont établie une classification qui dépend d'une part des valeurs du coefficient d'érosion et d'autre part des valeurs de la contrainte seuil de cisaillement. Afin de confronter ces deux appareillages et les classifications associées, sept sols fins naturels couvrant une large plage de variation de sensibilité à l'érosion ont été testés ([REG, 08]). Les résultats de cette confrontation indiquent que les valeurs du coefficient d'érosion sont systématiquement plus élevées avec le JET par rapport aux mesures obtenues avec le HET. L'indice d'érosion ($I = -\log k_d$) est donc systématiquement plus faible avec le JET (I_{JET}) par rapport à celui obtenu avec le HET (I_{HET}) et plus précisément le rapport I_{JET}/I_{HET} est compris entre 0,32 et 0,84. Par ailleurs, les valeurs mesurées de contrainte seuil sont en moyenne 50 fois plus élevées avec le HET par rapport à celles mesurées avec le JET. La confrontation des mesures réalisées avec le HET et le JET met également en évidence des divergences de classification relative de la sensibilité des sols à l'érosion d'interface. Ainsi la classification de la sensibilité d'un sol, même par rapport à un sol de référence, risque de fortement dépendre de l'érodimètre utilisé.

2. Approche énergétique pour l'interprétation des deux types d'érosion

2.1. Principe de l'approche énergétique

La nouvelle analyse proposée est basée sur la détermination de l'énergie dissipée par le fluide et sur la mesure de la masse érodée. Un volume V de fluide, de masse M possède une surface de contact S avec son environnement. Cette surface est orientée par son vecteur normal, \vec{n} , orienté du fluide vers l'environnement. L'énergie dissipée par le fluide entre l'entrée et la sortie du système étudié peut être exprimée par ([REG, 09]) :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{\text{Mass}} \left(e_{int} + \frac{w^2}{2} + \bar{g} \bar{z} \right) dM = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{Volume}} \left(e_{int} + \frac{w^2}{2} + \bar{g} \bar{z} \right) \rho dV + \oint_S \left(e_{int} + \frac{w^2}{2} + \bar{g} \bar{z} \right) \rho (\vec{U} \vec{n}) \cdot dS \quad [5]$$

et

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE_{Ther}}{dt} + \frac{dW}{dt} \quad [6]$$

avec E_{ther} : énergie thermique échangée entre le système et l'environnement, W : travail mécanique entre l'entrée et la sortie du système, e_{int} : énergie interne du

fluide, ρ : masse volumique du fluide, U : vitesse du fluide de composantes (u, v, w), g : accélération de la pesanteur, z : coordonnées.

Quatre hypothèses peuvent être utilisées afin de simplifier l'équation. La température et donc l'énergie interne sont supposées constantes pour le volume considéré. Le système pouvant être considéré comme adiabatique, seul le travail mécanique entre l'entrée et la sortie du système sera considéré. L'hypothèse d'un écoulement permanent permet de négliger la variation temporelle de l'énergie cinétique et la masse volumique du fluide est supposée constante. L'équation [5] peut donc être réécrite sous la forme :

$$\frac{dW}{dt} = \iint \left(\frac{w^2}{2} + \vec{g} \cdot \vec{z} \right) \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) dS \quad [7]$$

Le travail mécanique est la somme du travail des forces de pression, du travail dissipé par viscosité et turbulence au sein du fluide ($W_{intra\ fluide}$) et du travail d'érosion ($W_{érosion}$) à l'interface fluide-sol. La dérivée temporelle du travail mécanique peut donc se réécrire par :

$$\frac{dW_{intra\ fluide}}{dt} + \frac{dW_{érosion}}{dt} = \iint_S \left(\frac{w^2}{2} + \vec{g} \cdot \vec{z} + \frac{P}{\rho} \right) \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) dS \quad [8]$$

2.2. Analyse énergétique de la suffusion

L'équation de l'énergie est appliquée entre la section amont A et la section aval B de l'échantillon testé. La conservation du débit au sein de l'ensemble de l'échantillon permet de supposer une vitesse moyenne constante pour les sections A et B. L'équation [8] devient :

$$\frac{dW_{intra\ fluid}}{dt} + \frac{dW_{érosion}}{dt} = \iint_S \left(\vec{g} \cdot \vec{z} + \frac{P}{\rho} \right) \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) dS = \rho g \Delta z Q + Q \Delta P \quad [9]$$

avec $\Delta P = P_A - P_B$, $\Delta z = z_A - z_B$, Q : débit du fluide.

Le nombre de Reynolds peut être déterminé par :

$$R_e = \frac{\rho \bar{U} O_{50}}{\mu} \quad [10]$$

avec \bar{U} : vitesse moyenne dans les pores, O_{50} : diamètre moyen des pores de la fraction grossière défini par Kovacs (cité par [LI, 08]), μ : viscosité dynamique.

Dans le cas de la suffusion, la valeur du nombre de Reynolds est très faible. Par conséquent, le travail dissipé par viscosité et turbulence au sein du fluide est supposé négligeable en regard du travail dissipé par érosion. La dérivée temporelle du travail par érosion s'exprime donc par :

$$\frac{dW_{\text{erosion}}}{dt} = \rho g \Delta z Q + Q \Delta P \quad [11]$$

La dérivée temporelle du travail d'érosion est appelée puissance d'érosion et l'énergie dissipée par érosion est déterminée par intégration temporelle sur la durée des essais de la puissance d'érosion instantanée.

2.3. Analyse énergétique du HET

L'équation [8] est appliquée entre les 2 points de mesures de la charge situés de part et d'autre de l'échantillon testé. Les pressions mesurées à l'amont et à l'aval de l'échantillon testé sont nommées respectivement P_A et P_B . La conservation du débit au sein de l'ensemble de l'échantillon permet de supposer une vitesse moyenne constante au sein de l'échantillon. Au cours de l'essai, l'écoulement étant horizontal, le terme $\bar{g} \cdot \bar{z}$ est nul en moyenne.

[MAR, 11b] réalisent un essai HET avec un échantillon non érodable en polyacrylique comportant une conduite de diamètre ϕ et de longueur L . Le coefficient de frottement, λ , de la surface de la conduite est déterminé par l'équation [12] proposée par Colebrook :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/\phi}{3.7} + \frac{2.51}{R_e \sqrt{\lambda}} \right) \quad [12]$$

avec ε : rugosité de l'orifice ($\varepsilon=0,0015\text{mm}$).

Pour un écoulement turbulent ($R_e > 2000$), la perte de charge par frottement ($\Delta H_{\text{frottement}}$) au sein de la conduite est déterminée à l'aide de l'équation proposée par White ([WHI, 99]):

$$\Delta H_{\text{frottement}} = \lambda \frac{L}{\phi} \frac{\bar{U}^2}{2g} \quad [13]$$

Dans la gamme de débit correspondant aux essais HET (de 0,02L/s à 0,42L/s), la perte de charge par frottement au sein de la conduite représente 25% de la perte de charge totale mesurée lors des essais HET. En conséquence, la puissance d'érosion pour un essai HET peut être exprimée par :

$$\frac{dW_{\text{erosion}}}{dt} = 0.25(P_A - P_B) \cdot Q \quad [14]$$

2.4. Analyse énergétique du JET

Dans le cas de l'essai JET, l'équation [8] est appliquée entre l'orifice du jet et le trop plein du réservoir contenant l'échantillon ([MAR, 11b]). En comparaison avec un jet libre, un jet situé face à une interface fluide - sol subit une déviation. Nous supposons que l'érosion est principalement due à cette déviation du jet qui génère un accroissement de la contrainte de cisaillement et de grandes variations de pression.

En l'absence d'interface fluide - sol, à la profondeur J par rapport à l'orifice du jet, Beltaos et Rajaratnam ([BEL, 74]) expriment la variation de la vitesse verticale en fonction de la distance latérale r par rapport à l'axe du jet par :

$$u(r,J) = \exp\left(-0.693\left(\frac{r}{b_u}\right)^2\right) u(0,J) \quad [15]$$

avec $u(0,J)$: vitesse verticale au centre du jet, b_u : distance par rapport à l'axe du jet qui correspond à une diminution de moitié de la vitesse verticale ($u(b_u, J) = 0,5 u(0, J)$), J_p : profondeur correspondant au noyau potentiel du jet.

Lorsqu'un jet est face à un mur, Beltaos et Rajaratnam observent que la contrainte de cisaillement au niveau du mur s'accroît linéairement en fonction de r jusqu'à une valeur maximale obtenue pour $r=0,14 J$. De plus, lorsque que le rapport r/J s'accroît de 0 à 0,14, la pression au niveau du mur décroît rapidement de 90% par rapport à la valeur de la pression au centre du jet. Ainsi pour une profondeur J et dans la zone définie à partir de l'axe du jet par la distance latérale $r \leq 0,14 J$, l'énergie dissipée est supposée provoquer l'érosion et l'énergie dissipée au sein du jet lui même est négligée.

L'hypothèse d'une pression hydrostatique au niveau du trop plein du réservoir et l'hypothèse d'une vitesse de sortie négligeable complètent les équations.

La puissance d'érosion pour un essai JET peut ainsi s'exprimer par :

$$\frac{dW_{erosion}}{dt} = 2\pi \int_0^{0,14J} \frac{u^2}{2} \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) r dr = \pi \rho u(0,J)^3 \int_0^{0,14J} \left[\exp\left(-0.693\left(\frac{r}{b_u}\right)^2\right) \right]^3 r dr \quad [16]$$

Pour $J < J_p$, $u(0,J) = u(0,0)$ avec $u(0,0)$: vitesse initiale à l'origine du jet. Pour $J > J_p$, $u(0,J)$ est déterminée par le rapport $u(0,0) J_p/J$ proposé par Hanson et Cook ([HAN, 04]).

3. Résultats de l'analyse énergétique

3.1. Caractérisation de la suffusion sans effet d'échelle significatif

Par l'approche en gradient hydraulique, la caractérisation de la suffusion dépend de la longueur de l'échantillon testé ([MAR, 11a]). Cet effet d'échelle influence la valeur du gradient hydraulique critique ainsi que le taux d'érosion qui s'accroît avec la longueur de l'échantillon.

L'approche énergétique permet d'obtenir une corrélation linéaire entre le taux d'érosion et la puissance d'érosion, cette corrélation étant indépendante de la longueur de l'échantillon testé.

Pour chaque essai de suffusion sur des échantillons sablo-argileux de longueurs différentes, l'énergie dissipée par le fluide par érosion peut être déterminée par intégration temporelle de la puissance d'érosion sur la durée totale de l'essai. La Figure 1 représente la masse sèche d'argile érodée cumulée en fonction de l'énergie dissipée.

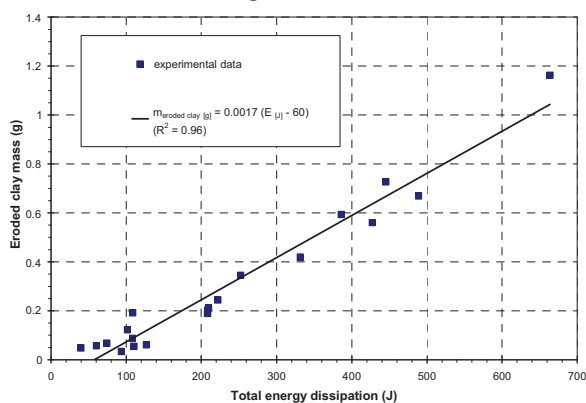


Figure 1. Masse sèche d'argile érodée versus énergie totale dissipée par érosion [MAR, 11a].

Une corrélation linéaire peut être exprimée entre la masse sèche d'argile érodée et l'énergie dissipée. Cette corrélation ne dépendant pas de la longueur des échantillons testés, l'analyse énergétique permet de s'affranchir de l'effet d'échelle induit par l'approche en gradient hydraulique.

L'analyse énergétique permet donc d'obtenir une interprétation efficace des essais de suffusion.

3.2. Classification unique pour le HET et le JET

L'énergie dissipée par érosion $E_{\text{érosion}}$ est déterminée par intégration temporelle de la puissance d'érosion pour les essais HET et JET. Un indice de résistance à l'érosion est défini par ([MAR, 11b]) :

$$I_{\alpha} = -\log_{10} \left(\frac{\text{masse sèche érodée}}{E_{\text{érosion}}} \right) \quad [17]$$

La Figure 2 représente les valeurs de l'indice I_{α} obtenues avec le JET ($I_{\alpha JET}$) en fonction des valeurs avec le HET ($I_{\alpha HET}$). Les valeurs de I_{α} sont proches pour les deux érodimètres et le rapport $I_{\alpha JET} / I_{\alpha HET}$ est en moyenne égal à 1.

En fonction des valeurs de l'indice de résistance à l'érosion et en prenant en compte les classifications présentes dans la littérature, six catégories de sensibilité à l'érosion d'interface sont proposées : très érodable pour $I_{\alpha} < 1$, érodable pour $1 \leq I_{\alpha} < 2$, modérément érodable pour $2 \leq I_{\alpha} < 3$, modérément résistant pour $3 \leq I_{\alpha} < 4$, résistant pour $4 \leq I_{\alpha} < 5$ et très résistant pour $I_{\alpha} \geq 5$.

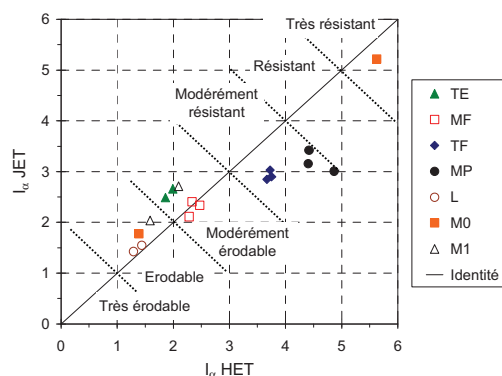


Figure 2. $I_{\alpha JET}$ versus $I_{\alpha HET}$ et classification de la sensibilité à l'érosion d'interface [MAR, 11b].

Pour les deux érodimètres utilisés, une classification identique de la sensibilité à l'érosion d'interface des différents sols testés est donc obtenue grâce à l'approche énergétique.

4. Conclusion

L'analyse de l'énergie dissipée par le fluide lors d'essais de suffusion et d'érosion d'interface est effectuée. Cette analyse permet de s'affranchir des effets d'échelle induits par l'approche en gradient hydraulique lors d'essais de suffusion. Par ailleurs cette approche énergétique permet l'établissement d'une classification unique de sensibilité à l'érosion d'interface pour les essais HET et JET.

5. Remerciements

L'auteur souhaite remercier EDF CIH et la Région Pays de la Loire pour leur soutien financier dans le cadre respectivement d'un contrat de recherche et des projets régionaux R2GC et EMERMOD.

6. Références

- [BEL, 74] BELTAOS S., RAJARATNAM. N.. « Impinging circular turbulent jets », *Journal of the hydraulics division*, 100(HY10), 1974, p. 1313-1328.
- [BEN, 08] 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.
- [HAN, 01] HANSON G. J. SIMON A., « Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern U.S.A », *Hydrological processes*, vol. 15, n°1, 2001, p. 23-38.
- [HAN, 04] HANSON G. J. COOK K. R., « Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in-situ », *Applied Engineering in Agriculture, ASAE*, vol. 20, n°4, 2004, p. 455 – 462.
- [KEN, 85] KENNEY, T.C., LAU, D., « Internal stability of granular filters », *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 22, 1985, p. 215-225.
- [LI, 08] LI M., Seepage induced instability in widely graded soils, PhD thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2008.
- [LIM, 08] LI M., FANNIN J., « Comparison of two criteria for internal stability of granular soil », *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 45, 2008, p. 1303-1309.
- [MAR, 11a] 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.
- [MAR, 11b] MAROT D., REGAZZONI P.L., WAHL T., « An energy based method for providing soil surface erodibility rankings », *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, in press.
- [REG, 08] REGAZZONI, P.L., MAROT, D., WAHL, T., HANSON, G., COURIVAUD, J.R., « Soils erodibility: a comparison between the Jet Erosion Test and the Hole Erosion Test », *EM08 Conference (ASCE)*, 2008, Minneapolis, USA.
- [REG, 09] REGAZZONI P.L., Confrontation et analyse d'érodimètres et caractérisation de la sensibilité à l'érosion d'interface, PhD thesis, University of Nantes, France, 2009.
- [SEL, 88] SELMEIJER J.B., On the mechanism of piping under impervious structures, PhD thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 1988.
- [SKE, 94] SKEMPTON, A.W., BROGAN, J.M., « Experiments on piping in sandy gravels », *Géotechnique*, vol. 44, n° 3, 1994, p. 440-460.
- [WAN, 04] WAN, C. F., FELL R., « Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams », *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 130, n°4, 2004, p. 373-380.
- [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 (ASCE)*, vol. 134, n° 3, 2008, p. 401-407.
- [WHI, 99] WHITE F. M., Fluid Mechanics 4th ed., book, edition Mc Graw-Hill, 1999.