

Erosion de contact entre un filtre granulaire et divers sols fins, en présence d'un écoulement d'eau parallèle à l'interface

R. BEGUIN^a, C. GUIDOUX^a, Y-H. FAURE^a, P. PHILIPPE^b

a. Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), 38041 Grenoble Cedex 09
b. CEMAGREF d'Aix en Provence, 3275 Route de Cézanne 13182 Aix en Provence

Résumé :

L'érosion de contact est un des risques majeurs d'érosion interne dans les digues. En présence d'un écoulement parallèle à l'interface, les particules de la couche de matériau fin sont érodées, puis transportées à travers les pores du matériau grossier. Une expérimentation spécifique a été réalisée pour comprendre les mécanismes gouvernant le détachement et le transport des particules. Le seuil et l'évolution de l'érosion sont analysés en investiguant l'influence de différents paramètres.

Abstract :

Contact erosion is one of the major risk of internal erosion in dykes. In presence of flow parallel to the interface, particles from fine material layer are eroded, and transported through the pores of the coarse material. A specific experimentation has been set up in order to understand the mechanisms that control the dislodging and the transport of the particles. The threshold and the evolution of the erosion are analysed, and the influence of various parameters are discussed.

Mots clefs : Erosion de contact, critère hydraulique, filtre granulaire

1 Introduction

L'érosion de contact se produit à l'interface entre deux couches de sol de granulométries différentes. Sous l'effet d'un écoulement tangentiel, les particules du sol le plus fin peuvent être entraînées au travers des pores du sol plus grossier. Si ce phénomène apparaît et perdure au sein d'un ouvrage il peut entraîner des tassements et éventuellement une rupture. Plusieurs configurations sont envisageables. Nous avons, dans un premier temps, considéré une interface horizontale entre les deux couches de sol, et un écoulement parallèle à cette interface. Cette disposition se rencontre dans des sols de fondation d'ouvrages hydrauliques, ou lors de l'utilisation de filtre granulaire pour protéger un sol fin de surface. Nous avons, à ce jour, principalement étudié la configuration d'un sol grossier au-dessus d'un sol fin. C'est dans cette configuration que l'on se placera par la suite. Si la taille des grains du sol grossier est suffisamment proche de celle du sol fin, celui-ci ne pourra pas le traverser, quelle que soit la sollicitation hydraulique. Cette limite géométrique définit un critère de filtre qui a largement été étudié précédemment [1, 2]. Si cette limite géométrique est dépassée, l'ensemble ou une partie du sol fin est potentiellement transportable dans les pores, le filtre est alors dit géométriquement ouvert. Néanmoins, pour observer une érosion, une sollicitation hydraulique suffisante est aussi nécessaire pour détacher les particules et les transporter. C'est cette condition hydraulique que nous avons étudiée.

Ce type d'érosion a d'abord été étudié en considérant des sables et graviers possédant une granulométrie étroite [3, 4]. L'approche généralement choisie consiste à utiliser les concepts d'érosion à surface libre, basés sur le taux de cisaillement de l'écoulement. En Hollande, des études ont été menées plus spécifiquement sur la stabilité des revêtements granulaires des digues maritime [5,6], en abordant le problème de façon similaire. Ces travaux intègrent des situations non stationnaires et des interfaces inclinées. Boley [7] a étudié une configuration où le sol fin est au-dessus du sol grossier, en choisissant des sols fins cohésifs. Nous avons souhaité mettre l'accent sur des sols de type limoneux qui ont été très peu abordés jusqu'alors. Ces sols se rencontrent fréquemment dans les ouvrages du Rhône et de l'Isère et ceci de manière concomitante avec des graves et graviers. Des configurations sensibles à l'érosion de contact se rencontrent donc fréquemment.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental mis en place pour étudier l'érosion de contact a été décrit précédemment par Ho [8] et s'apparente aux expériences de Brauns [3] et Wörman [4] (figure 1). Le sol fin et le sol grossier à étudier sont placés en deux couches horizontales de respectivement 8 et 5cm d'épaisseur dans une cellule en acier de 70x30x26,5 cm. Les limites de l'écoulement à l'entrée et à la sortie de la cellule coïncident avec la face supérieure de la couche de sol fin. Deux géotextiles sont disposés aux extrémités pour éviter les effets de bord. Une des faces de la cellule est munie d'une vitre permettant d'observer les phénomènes se déroulant à l'interface. Cette observation se limite à une épaisseur de grains grossiers et peut donc être influencée par un effet de bord, notamment à cause de l'augmentation de la porosité au contact de la vitre. Une surcharge est appliquée sur la face supérieure de l'échantillon par une vessie en latex remplie d'eau mise sous pression. Un système hydraulique permet de faire circuler un écoulement d'eau dans la couche de sol grossier. Le débit sortant de la cellule et la turbidité sont mesurés. Un capteur de pression différentielle mesure la perte de charge dans l'échantillon.

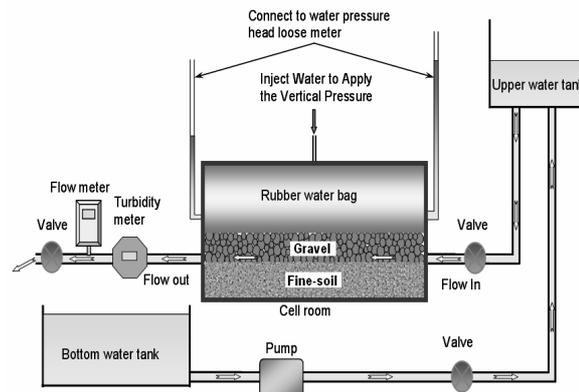


FIG. 1 – Dispositif expérimental d'érosion de contact (d'après Ho [8])

Ce dispositif permet de tester des conditions propices au détachement et au transport des particules. Les sols grossiers utilisés sont des filtres géométriquement ouverts pour le sol fin, ou proches du critère limite. L'écoulement généré est considéré comme majoritairement localisé dans le sol grossier. La vitesse d'écoulement u (cm/s) est simplement estimée en supposant un écoulement uniforme dans toute la section. Le débit solide en sortie de cellule est évalué par le turbidimètre. En effet, un calage préliminaire a donné une relation linéaire entre concentration de sol et turbidité. Le protocole d'essai choisi consiste à augmenter la vitesse d'écoulement par paliers constants de 30min. Les sols fins testés sont une argile (illite), un sable-limoneux (sablon de l'Isère) et un sable (NE34). Des mélanges de sable et d'argile, de sable et de sablon sont aussi testés. Les diamètres des particules de ces sols sont compris entre 3 et 300 μ m. Les sols grossiers sont des graviers et des sables grossiers, de diamètre de grain compris entre 2 et 20mm.

3 Seuil d'érosion

3.1 Observations

Durant les premiers paliers, aux vitesses les plus faibles, aucun mouvement des particules fines n'est visualisé. A partir d'une certaine vitesse, de l'ordre de 1cm/s, des mouvements de quelques particules sont observés ponctuellement. Ces mouvements sont courts, et apparaissent en début palier. Les zones où la sollicitation hydraulique est suffisante pour détacher une particule sont rares. L'interface se modifie légèrement et un état stable est rapidement obtenu pour lequel ces mouvements deviennent quasiment inexistantes. A partir de la vitesse que nous définissons comme seuil d'érosion, une érosion continue est observée. Des particules de sol fin sont en mouvement sur toute la longueur de l'interface. La mesure de turbidité en sortie de cellule atteint une valeur constante après un pic en début de palier (figure 2).

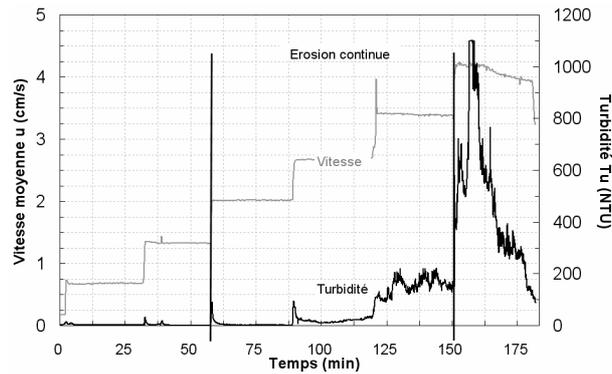


FIG. 2 – Résultat typique d'essai. Vitesse et turbidité en fonction du temps.

Le pic de turbidité de début de palier peut s'expliquer par la brusque modification du débit au moment du changement de palier, provoquant l'arrachement de quelques particules. Il peut aussi être attribué à cette phase de stabilisation évoquée précédemment où les quelques zones exposées à une sollicitation hydraulique plus intense provoquent le transport de particules fines de surface. Une fois ces particules stabilisées à l'aval, le transport s'arrête.

3.2 Analyse

Pour qu'une érosion continue puisse être observée, deux conditions doivent être réunies. Les particules fines doivent d'abord être détachées du sol fin et ensuite pouvoir être transportées dans le sol grossier. Le détachement est conditionné par une sollicitation hydraulique supérieure aux forces stabilisatrices auxquelles est soumise la particule (poids, frottement, adhésion, cohésion...). Le transport nécessite l'existence d'un chemin de taille suffisante pour que la particule puisse circuler et d'une sollicitation hydraulique supérieure à la sédimentation de la particule. Dans le cas où le critère de filtre n'est pas respecté, une particule fine située sur l'interface, entre deux grains de sol grossier, a une forte probabilité de trouver un chemin permettant son transport. Son érosion dépend alors de l'importance de la sollicitation hydraulique. Celle-ci n'est pas spatialement homogène dans le milieu poreux constitué par le sol grossier. L'érosion est observée dans le régime d'écoulement de Forchheimer, pour des nombres de Reynolds de grain compris entre 10 et 200. Dans ce régime inertiel, intermédiaire entre le régime de Darcy et un régime pleinement turbulent, des zones de recirculation apparaissent provoquant des dépressions et surpressions. Pour une vitesse moyenne de l'écoulement, on a donc, localement, des zones de sollicitations hydrauliques plus importantes, où une particule peut être déstabilisée. La vitesse critique moyenne est, dans ce cas, celle où ces zones érosives sont suffisamment nombreuses pour provoquer un transport continu. Cette vitesse critique moyenne n'est, par contre, pas forcément représentative de la vitesse locale nécessaire à l'érosion. L'approche généralement adoptée pour l'érosion dans des écoulements à surface libre, et choisie par d'autres auteurs pour l'érosion de contact est celle proposée par Shields [9]. Celle-ci est basée sur la comparaison des forces déstabilisatrices liées à l'écoulement et des forces stabilisatrices liées au poids, appliquées à un grain. Le nombre adimensionnel obtenu caractérisant la stabilité du grain est de la forme :

$$\theta = \frac{\tau}{\Delta\rho g d} \quad (1)$$

d est le diamètre de la particule, $\Delta\rho$ sa masse volumique déjaugée, g la gravité et τ la contrainte de cisaillement appliquée par l'écoulement. Dans notre contexte d'écoulement en milieu poreux en régime de Forchheimer, la détermination de la contrainte de cisaillement appliquée pose problème. En première approche, Bezuijen [5] propose de l'estimer en considérant que la vitesse de cisaillement $u^* = \sqrt{\tau/\rho_w}$ dans le milieu poreux peut être estimée par la vitesse de pore pondérée d'un coefficient e . La vitesse de pore est simplement reliée à la vitesse de Darcy en la divisant par la porosité. Le coefficient e est fonction du diamètre moyen du sol fin, mais aussi du Reynolds de l'écoulement dans le sol grossier. On obtient, à partir de la relation (1) :

$$u_{cr} = \frac{n}{e} \sqrt{\theta} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} dg} \quad (2)$$

Brauns [3] propose une expression analogue pour la vitesse critique, où le paramètre $n\sqrt{\theta}/e$ est fixé expérimentalement à 0,7.

3.3 Influence des paramètres

Le diamètre médian du sol grossier utilisé était dans l'intervalle 3 à 17mm. Une légère tendance à l'augmentation de la vitesse critique avec la taille du gravier a été observée, sans que son importance soit marquante (figure 3a), sauf pour le mélange de 80% de sable 20% d'illite. Du point de vue théorique, la modification de la taille caractéristique des pores doit entraîner la modification du Reynolds de l'écoulement, et de ce fait, de la sollicitation sur les grains du sol fin. Cette légère dépendance à la taille des grains du sol grossier a été observée par Bezuijen [5]. D'autre part, la diminution de la taille des pores semble provoquer une augmentation de la vitesse critique. On approche dans ce domaine du critère de filtre, et des effets géométriques de frottement et de colmatage peuvent influencer l'érosion. Le sol grossier a aussi tendance à stabiliser l'interface par pavage. Cette augmentation est observée par Brauns [3].

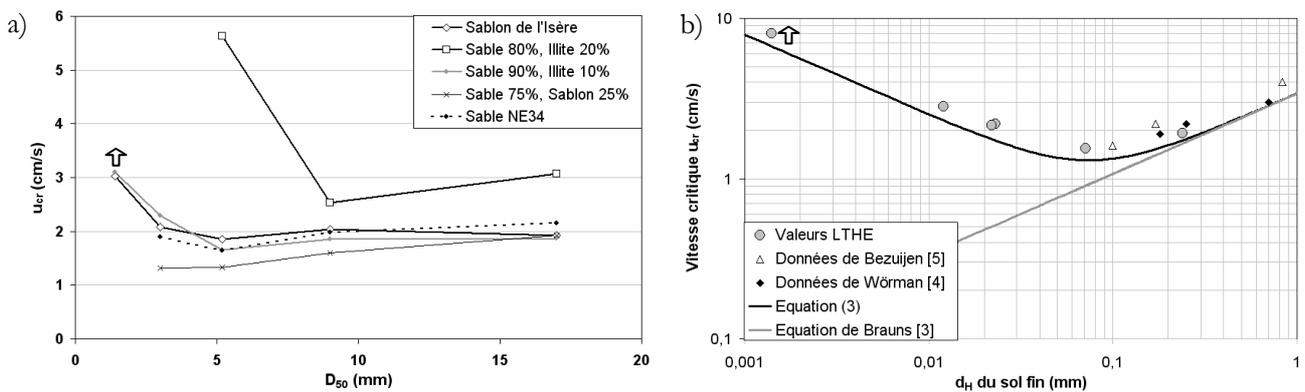


FIG. 3 - Vitesse critique en fonction a) du d_{50} du sol grossier, b) du d_H du sol fin (d'après [10])

Lors d'essais avec le mélange 80% de sable et 20% d'illite, des agrégats de l'ordre du centimètre se détachent de l'interface mais restent piégés dans les pores du filtre. Pour une vitesse d'écoulement plus élevée, ces agrégats se décomposent, et le sol est entraîné. En combinaison avec le sol grossier $d_{50}=1,4\text{mm}$, les deux sols fins testés n'ont pas pu être érodés à 3cm/s, maximum pouvant être atteint par la manipulation.

L'expression (2), proposée dans les études précédentes prédit une diminution de la vitesse critique pour une diminution du diamètre des particules, la force de traînée devenant prépondérante devant le poids déjaugé. Son application au sable, donne une vitesse critique de 1,6 cm/s cohérente avec nos résultats. Néanmoins, cette expression a été établie pour des sables et ne prend pas en compte l'adhérence ou la cohésion pouvant apparaître entre les particules. Celles-ci deviennent non négligeables dans le domaine des limons et des argiles. Son application au sablon donne effectivement un résultat très différent des observations. Afin de mettre en évidence ces phénomènes, nous avons testé des mélanges de sable et d'argile de fraction croissante. Nous avons effectivement constaté une augmentation de la vitesse critique, liée à la stabilisation apportée par cette fraction fine. Une expression empirique a été proposée [10] pour décrire la vitesse critique dans ce domaine de granulométrie, sur la base de l'équation de Brauns modifiée sur deux points. D'abord, la moyenne géométrique des classes de diamètres d_H des sols est préférée au d_{50} . Ensuite, une masse volumique artificielle est ajoutée aux grains fins pour modéliser l'effet d'adhésion [11]. De cette manière l'expression (2) devient :

$$q_{c,eff} = 0,7n_F \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} + \frac{9 \cdot 10^{-6}}{\rho_w d_H^2} \right) g d_H} \quad (3)$$

Cette expression fournit une estimation conservatrice de la vitesse critique observée expérimentalement (figure 3b). Elle met en évidence un minimum de vitesse critique pour des sols du type de notre mélange sable-limon ayant une granulométrie défavorable.

4 Evolutions de l'érosion

Une fois ce seuil de début de transport dépassé, on observe, de manière analogue aux écoulements à surface libre, du transport par charriage et saltation, sur une épaisseur de quelques grains ou en suspension à plus grande distance de l'interface dans le milieu poreux avec chemins préférentiels d'écoulements dans le filtre. L'existence de zones plus érosives entraîne la modification de la géométrie de l'interface. L'équilibre des particules fines en surface ainsi que l'écoulement en sont localement modifiés. Des mécanismes localement stables ou instables apparaissent alors. Deux schémas fréquents ont été identifiés. Le premier apparaît lorsqu'une zone de sol grossier se colmate avec des particules fines transportées provoquant la modification de l'interface sous la forme d'une « dune ». La déviation de l'écoulement à l'amont de la dune entraîne une érosion plus prononcée sur cette face. Au contraire, à l'aval de l'écoulement, le dépôt est favorisé. Cette structure se déplace donc vers l'aval en interagissant avec le sol grossier. Le second apparaît lorsque l'existence d'une zone plus érosive entraîne la formation d'une cavité dans l'interface. L'augmentation de la section disponible à l'écoulement entraîne une concentration de celui-ci dans la cavité. Ceci provoque l'accentuation de l'érosion, amplifiée par la courbure des lignes de courant à cet endroit. On observe un affouillement très marqué dans ces cavités avec des grains fins qui partent en transport en suspension. Ces trous s'agrandissent jusqu'à l'effondrement du sol grossier, et le remplissage du vide qui avait été créé.

A partir de l'entrée de la cellule, l'écoulement se charge en matière solide. Si les conditions de détachement et de transport se conservent, la concentration augmente avec la longueur parcourue le long de l'interface. On observe néanmoins une érosion préférentielle à l'entrée de la cellule alors que la partie finale est peu modifiée (figure 5). Celle-ci est généralement une zone où apparaissent du transport et du dépôt sans que l'interface se creuse en dessous des conditions initiales. Il est probable que la concentration en matière solide modifie la capacité érosive du fluide. En particulier, le taux de cisaillement peut en être diminué.

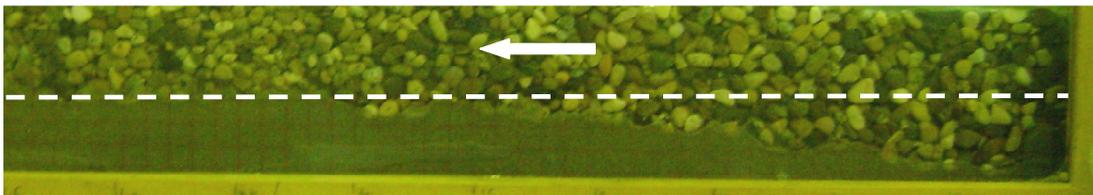


FIG. 5 – Erosion préférentielle à l'entrée de la cellule, interface initial en pointillés et sens d'écoulement

D'un point de vue quantitatif, à l'échelle de notre cellule expérimentale, une concentration moyenne de sol transporté est attribuée à chaque palier, qui permet de calculer un taux d'érosion moyen en ($\text{kg}/\text{cm}^2/\text{s}$) pour toute la surface de l'interface. Considérant une surface suffisamment grande pour s'affranchir des effets locaux, il est généralement admis dans la littérature que ce taux d'érosion est une fonction linéaire de la différence entre la contrainte de cisaillement appliquée à l'interface et la contrainte seuil. Ce résultat a été validé expérimentalement par de nombreux auteurs [12, 13]. Cette hypothèse amène à une loi du type $\dot{e} = k_{er}(\tau - \tau_{cr})$, k_{er} étant un coefficient d'érosion, et τ_{cr} la contrainte de cisaillement critique. La détermination de la contrainte de cisaillement dans notre configuration restant sujette à cautions, nous avons, en première approche, choisi de confronter nos taux d'érosion à la vitesse moyenne d'écoulement, (figure 6). La relation entre vitesse moyenne de l'écoulement et contrainte de cisaillement reste à définir.

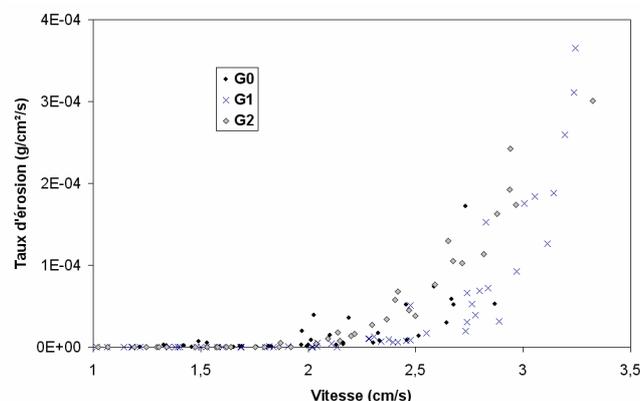


FIG. 6 – Taux d'érosion du sable en fonction de la vitesse d'écoulement pour 3 graviers différents

Les résultats sont dispersés, notamment pour les graviers G1 et G0, graviers les plus petits. Pour les tests avec le gravier G2, une tendance est observée assez nettement. On constate que la vitesse seuil est autour de 2cm/s comme vu précédemment. Néanmoins, l'influence du gravier ne semble pas très sensible. Le diamètre caractéristique est, en effet, multiplié par dix entre le gravier G0 et le G2 sans que d'importants écarts de taux d'érosion soient mis en évidence.

5 Conclusion

Le dispositif expérimental mis en place a permis d'observer et d'analyser le phénomène d'érosion de contact dans une configuration d'écoulement horizontal, parallèle à l'interface entre les deux sols. Des processus proches de ce qui est habituellement observé en érosion en rivières mais interagissant avec le sol grossier ont été mis en évidence. Une vitesse seuil d'érosion a été mesurée, peu sensible aux paramètres investigués.

Deux légères influences ont, néanmoins, été mises en évidence. La granulométrie du sol grossier augmente la vitesse seuil quand on se rapproche du critère de filtre ou quand on tend vers des diamètres plus grands. La granulométrie du sol fin semble montrer une influence du même type avec un minimum, encadré par une augmentation de la vitesse critique dans le domaine des argiles et dans celui des sables. L'évolution de l'érosion a aussi été observée avec l'apparition de structures instationnaires au niveau de l'interface, et l'augmentation continue du taux d'érosion en fonction de la vitesse.

Une observation plus approfondie des mécanismes et en particulier du couplage entre écoulement hydraulique, transport de fines et géométrie du filtre est en cours. Une formulation basée sur la physique des processus observés est recherchée pour établir une relation prédictive du seuil d'érosion et de son évolution en terme de taux d'érosion. D'autres configurations sont aussi à l'étude tel que la disposition inverse avec la couche de sol fin au-dessus du sol grossier.

References

- [1] Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., et al. (1984), 'Basic properties of sand and gravel filters.', *J. Geotech. Eng-ASCE* **110(6)**, 684-700
- [2] Kovacs, X. (1981), *Developments in water science series, 10*, chapter Seepage Hydraulics
- [3] Brauns, J. (1985), 'Erosionsverhalten geschichteten Bodens bei horizontaler Durchstromung', *Wasserwirtschaft* **75**, 448-453.
- [4] Wörman, A., Olafsdottir, R. (1992), 'Erosion in a granular medium interface', *J. Hydraul. Res.* **30(5)**, 639-655
- [5] Bezuijen, A., M. Klein-Breteller, et al. (1987), Design criteria for placed block revetments and granular filters., in 'Proceedings of the 2nd international conference on coastal & port engineering in developing countries, Beijing, China'.
- Bakker, K. J., Verheij, H. J., et al., (1994), 'Design relationship for filters in bed protection', *J. Hydraul. Eng-ASCE* **120(9)**, 1082-1088
- [6] Den Adel, H., Koenders, M.A. , Bakker, K.J. (1994), 'The analysis of relaxed criteria for erosion-control filters', *Can. Geotech. J.* **31(6)**, 829-840.
- [7] Boley, C., Lenz, S., et al. (2008), Large Scale Model Tests on Erosion Processes in Maritime Engineering, in 'Proceedings of the 11th Baltic Sea Geotechnical Conference', 189-196.
- [8] Ho, C. C. (2007), 'The erosion behaviour of revetment using geotextile', PhD thesis, Joseph Fourier University, Grenoble, France
- [9] Shields, A. (1936), 'Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung', PhD thesis, Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, 26, Berlin, Germany
- [10] Guidoux, C., Y.-H. Faure, R. Beguin, C.-C., Ho (soumis en décembre 2008), 'Contact erosion at the interface between granular filter and various base-soils with tangential flow', *J. Geotech. Geoenviron.*
- [11] Zanke, U. (1982). "Grundlagen der Sedimentbewegung." Dusseldorf, Springer-Verlag
- [12] Ariathurai, R and K. Arulanandan (1978), 'Erosion rates of cohesive soils', *J. Hydraul. Div-ASCE* **104(2)**, 279-283
- [13] Bonelli, S., O. Brivois, et al. (2006), 'On the modelling of piping erosion', *CR Mécanique* **334(8-9)**, 555-559.