

---

# Analyse des relations entre comportement mécanique et suffusion des milieux granulaires : Proposition d'un nouveau critère de stabilité interne.

N. Abdoulaye Hama<sup>1</sup>, T. Ouahbi<sup>1,\*</sup>, S. Taibi<sup>1</sup>, J.M. Fleureau<sup>2</sup>, H.Souli<sup>3</sup>, A. Pantet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR CNRS 6294, Laboratoire d'Ondes et Milieux Complexes, Normandie Université  
53 rue de prony BP540, 76058 le Havre, France

\* E-mail : tariq.ouahbi@univ-lehavre.fr

<sup>2</sup> UMR CNRS 8579, Laboratoire MSS-Mat, Ecole Centrale Paris,  
92295, Chatenay-Malabry, France

<sup>3</sup> UMR CNRS 8579, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes,  
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne, 58 Rue Jean Parot, 42023 Saint Etienne, France

---

*RÉSUMÉ. Les matériaux granulaires sont très utilisés en Génie Civil. Ces sols non cohésifs se composent d'un squelette solide (grosses particules) qui doit supporter et transmettre les contraintes extérieures et les particules fines susceptibles d'être déplacées dans les constrictions formées par les gros éléments.*

*L'objectif de ce travail est de comprendre le phénomène de suffusion (érosion interne) dans ses processus et ses conséquences sur le comportement mécanique des sols à faible cohésion par l'établissement d'une relation entre la stabilité interne de ces matériaux et leur critère de rupture.*

*A l'aide d'un code de calcul DEM (Discrete Elements Method), la simulation du comportement mécanique sur des chemins triaxiaux des matériaux avant et après suffusion a été effectuée.*

*Une proposition d'un nouveau critère de stabilité interne est établie, elle est déduite de l'analyse des relations entre le comportement mécanique et la stabilité interne, notamment la contractance du matériau.*

*ABSTRACT. Granular materials are widely used in civil engineering. Non-cohesive soils consist of a solid skeleton (coarse) to support and transmit the external constraints and fines may be displaced in the constrictions formed by the large elements.*

*The objective of this work is to understand the phenomenon of suffusion (internal erosion) in its processes and its consequences on the mechanical behavior of loose soil by establishing a relationship between the internal stability of these materials and their criteria breaking.*

*Using a computer code DEM (Discrete Elements Method), simulation of the mechanical behavior on a triaxial path before and after suffusion was performed.*

*A proposal for a new internal stability criterion is established, it is deduced from the analysis of relations between the mechanical behavior and internal stability, including material contractance.*

*MOTS-CLÉS : stabilité interne ; comportement mécanique ; milieux granulaires ; DEM.*

*KEY WORDS : Internal stability; mechanical behavior, granular medium, DEM.*

---

## 1. Introduction

Les sols non cohésifs soumis aux phénomènes d'écoulement peuvent présenter un comportement dans lequel les particules fines migrent à travers les interstices du squelette solide formé par de grosses particules. Ce phénomène montre l'instabilité interne du sol ou sa susceptibilité de perdre ses particules fines (Terzaghi 1951, Kezdi, 1979, Kenney et Lau 1985-1986, Lafleur et al, 1989, Chapis et al, 1996; Foster & Fell, 2001). Ce processus se produit dans les dépôts naturels des sols et dans les ouvrages en remblai tels que les barrages en terre ; les digues ; les remblais autoroutiers, provoquant ainsi le colmatage des matériaux drainants (filtres granulaires), la réduction de perméabilité des sols, l'érosion des sols, ou la dégradation des matériaux.

Malgré l'existence de nombreux critères empiriques et expérimentaux, le comportement des sols après suffusion n'est toujours pas cerné de façon fiable et les modèles numériques ayant abordé ce sujet sont très limités.

Terzaghi a introduit en 1951 un critère qui se traduit par une double inégalité (1) présentée comme suit :

$$d_{15(f)} / d_{85(s)} < 5 \quad \text{et} \quad 5 < d_{15(f)} / d_{15(s)} < 20 \quad [1]$$

où les indices (f) et (s) sont liés respectivement à la portion constituée des particules grossières qui agit comme un filtre et une autre portion constituée par des fines.

Kézdi (1969) évalue le potentiel d'auto-filtration d'un sol en appliquant le critère de rétention de Terzaghi en tout point de sa courbe granulométrique. Pour ce faire, les matériaux sont divisés en deux composants à un point arbitraire de sa courbe granulométrique ( $d_n$ ). Un de ces deux composants ( $S_1$ ) agit comme filtre par rapport à l'autre ( $S_2$ ) et le critère de rétention de Terzaghi doit être vérifié.

Kenney et Lau (1985) ont élaboré une méthode permettant d'évaluer la stabilité interne des matériaux granulaires compactés et ayant des particules supérieures à 80 micromètres. Selon cette méthode, il suffit de vérifier si la structure primaire des matériaux agit comme filtre par rapport à sa base qui est constituée de particules fines. Cette approche établit une courbe de forme H(F) indépendante de la taille des grains et uniquement fonction de l'allure de la courbe granulométrique des matériaux.

F représente le pourcentage en masse des particules ayant un diamètre inférieur à D et H est le pourcentage en masse des particules ayant un diamètre compris entre D et 4D.

Si dans le plan (F ; H) la granulométrie des matériaux se trouve sous un seuil donné par la droite H/F = 1 sur une partie de sa fraction fine, correspondant à  $F < 0,20$  pour une granulométrie étalée ( $C_u > 3$ ) ou à  $F < 0,30$  pour une granulométrie serrée ( $C_u < 3$ ), alors ces matériaux seront instables sous écoulement. Les fractions ( $F < 0,20-0,30$ ) correspondent à la quantité maximale de particules libres qui est susceptible d'être érodée selon Kenney et Lau.

Les divergences affichées parfois par les deux critères sur une même granulométrie et le fait qu'ils ne traitent que de la stabilité interne sans faire mention de l'aspect mécanique, pose la question sur le choix du critère et sa pertinence pour les matériaux sollicités en cisaillement (Abdoulaye Hama et al. 2016).

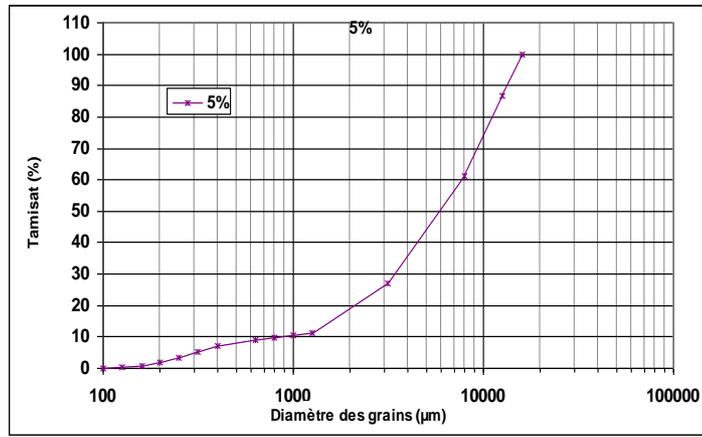
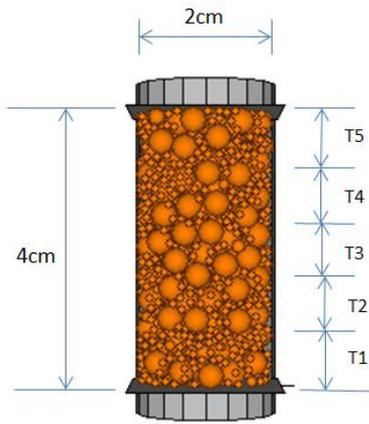
Dans ce travail, un nouveau critère de stabilité interne est proposé. Ce critère tient compte du comportement mécanique du matériau, il classe stables les granulométries ayant de meilleures performances mécaniques et de bonnes capacités d'auto filtration lorsqu'elles sont soumises à un écoulement.

## 2. Comportement Mécanique

### 2.1 Modélisation DEM

La méthode des éléments discrets (DEM) est très utile pour la modélisation numérique du comportement des systèmes granulaires et de particules.

La simulation triaxiale présentée ici est effectuée à l'aide du logiciel PFC3D. Elle consiste à confiner un échantillon cylindrique (Figure 1) d'un matériau granulaire à l'intérieur de trois parois. Les deux parois dont l'une située en haut et l'autre à la base de l'échantillon sont des plaques rigides qui simulent le chargement et la paroi latérale simule la pression de confinement latéralement appliquée à l'échantillon.



**Figure 1.** Matériau « naturel à 5% de fines » (Souli et al. 2011).

La déformation axiale peut être calculée par l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \quad [2]$$

Où  $H_0$  est la hauteur initiale de l'échantillon.

Le chargement est effectué en mode de déformation contrôlée en imposant la vitesse des parois supérieure et inférieure. Des conditions d'un essai idéal ont été simulées en définissant le coefficient de frottement entre l'échantillon et les parois égal à zéro, évitant ainsi tout frottement entre l'échantillon et les plaque de chargement. Tout au long de l'essai, la vitesse de la paroi latérale est contrôlée de telle façon à maintenir la contrainte de confinement constante (Itasca, (2008), Zhao et al. (2011), Zhao et al. (2013)). La contrainte de la paroi est déterminée et sa vitesse est ajustée pour réduire la différence entre sa contrainte actuelle  $\sigma^w$ , et sa contrainte cible  $\sigma^t$ . La vitesse de la paroi  $\dot{u}^w$  doit satisfaire à:

$$\dot{u}^w = G(\sigma^w - \sigma^t) = G\Delta\sigma \quad [3]$$

Où  $G$  est le paramètre gain estimé par la fonction 'get\_gain' par la méthode suivante :

L'incrément maximal de la force occasionnée par le mouvement de la paroi pour un pas de temps est donnée par :

$$\Delta F^w = k_n^w N_c \dot{u}^w \Delta t \quad [4]$$

Où  $N_c$  est le nombre de contact agissant sur la paroi,  $k_n^w$  la rigidité normale moyenne de ces contacts. Ainsi, la variation de la contrainte moyenne de la paroi est obtenue par la relation suivante :

$$\Delta\sigma^w = \frac{k_n^w N_c \dot{u}^w \Delta t}{A} \quad [5]$$

Où  $A$  est la section de la paroi.

Pour maintenir la simulation dans un état stable, la valeur absolue de la variation de la contrainte de la paroi doit être inférieure à celle de la différence entre les contraintes calculée et cible. Sinon cela conduirait à une oscillation de la contrainte calculée qui augmenterait de façon illimitée et conduirait à l'instabilité. Au lieu de cela, la contrainte de paroi doit tendre lentement vers la contrainte cible soit par valeur supérieure ou inférieure. En pratique, un facteur de relaxation  $\alpha$  ( $\alpha=0,5$ ) est utilisé afin que la condition de stabilité soit atteinte (Patankar, (1980), Zhao, (2013)) :

$$|\Delta\sigma^w| < \alpha|\Delta\sigma| \quad [6]$$

En substituant les équations (3) et (5) dans l'équation (6), on obtient :

$$\frac{k_n^w N_c G |\Delta\sigma| \Delta t}{A} < \alpha|\Delta\sigma| \quad [7]$$

Le gain est donc déterminé en condition de stabilité par :

$$G = \frac{\alpha A}{k_n^w \Delta t} \quad [8]$$

La vitesse de la paroi est ajustée avant chaque cycle pour satisfaire à l'équation (3) et le gain est ajusté pour satisfaire à l'équation. (8).

## 2.2 Résultats Triaxiaux

Selon Kenney et Lau, un matériau est d'autant plus stable que le ratio de stabilité est élevé (supérieur à 1). Pour Kezdi, un matériau est d'autant plus stable que l'indice de rétention est petit (inférieur à 4). Pour tenter de relier la stabilité interne des matériaux granulaires et leur comportement mécanique, nous nous sommes proposé d'analyser l'évolution de la contrainte maximale du cisaillement et de la contractance maximale obtenus sur des chemins triaxiaux, en fonction du ratio minimum de stabilité  $(H/F)_{\min}$  et de l'indice maximal de rétention  $(D_{15}/d_{85})_{\max}$ .

L'échantillon (figure 1) ayant subi un écoulement sous un gradient de  $i=1.6$ , les 5 tranches ont des valeurs différentes des paramètres  $\frac{H}{F}$  et  $D_{15}/d_{85}$ . Les valeurs respectives mini et maxi de ces paramètres sont résumées dans le tableau 1.

**Tableau 1:** Comparaison des paramètres de stabilité internes des échantillons T1 à T5

Echantillon	$(H/F)_{\min}$	$(D_{15}/d_{85})_{\max}$
T1	1.85	15.5
T2	2.47	1.95
T3	3.87	3.18
T4	3.38	3.38
T5	0	3.58

Dans la suite, chacun de ces échantillons sera soumis à une sollicitation triaxiale. Toutes ces sollicitations sont effectuées à un indice des vides initial  $e=0.66$ .

Les résultats triaxiaux pour un confinement de 200 kPa montrent que: les échantillons classés stables (T2, T3 et T4) à la fois par les deux critères présentent des performances mécaniques meilleures (forte résistance au cisaillement et faible contractance) que ceux classés instables ou ceux sur lesquels les deux critères divergent (T1 et T5). La stabilité interne procure donc bien à un matériau granulaire de bons comportements mécaniques et que nos résultats montrent que les matériaux véritablement stables sont ceux qui remplissent les conditions des deux critères. Un des points communs à ces matériaux est qu'ils obéissent tous à la loi  $H/F \geq D_{15}/d_{85}$ .

## 3. Nouveau critère de stabilité : proposition et validation

### 3.1 Proposition d'un nouveau critère de stabilité

De nos analyses sur le rapport comportement mécanique-stabilité interne et en tenant compte des critères ci-haut étudiés, nous proposons un nouveau critère de stabilité interne des milieux granulaires. La force de ce critère est sa prise en compte du comportement mécanique du matériau tout en restant moins conservatif que ceux de Kezdi et de Kenney & Lau.

Ce nouveau critère caractérise les matériaux stables par la formulation suivante :

$$\frac{H}{F} > D_{15}/d_{85} - 3$$

La figure 2 représente le schéma de principe de ce critère. La limite de stabilité proposée et celles de Kenney & Lau et de Kezdi subdivisent le plan  $(H/F ; D_{15}/d_{85})$  en 6 zones différentes.

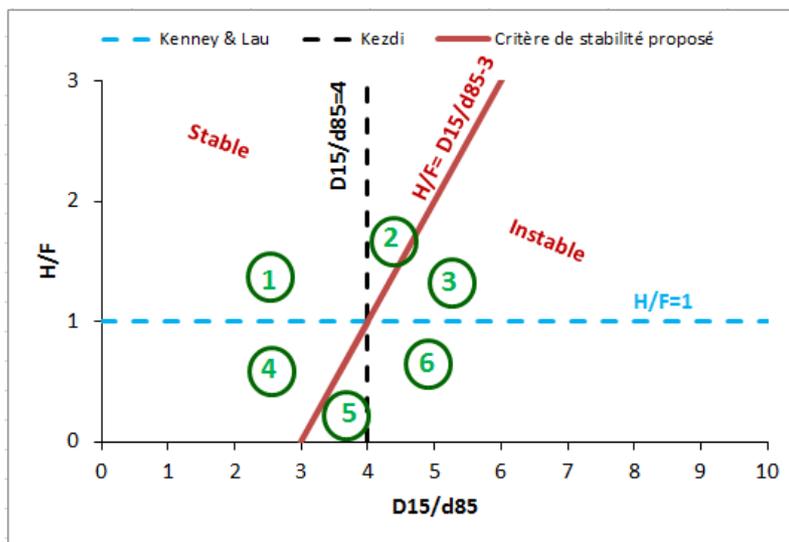


Figure 2. Schémas de principe du critère de stabilité interne.

### 3.2 Validation du nouveau critère

La figure 3 illustre une première validation du critère proposé appliqué à nos échantillons. La limite de stabilité est décrite par la droite dont l'équation est  $H/F = D_{15}/d_{85} - 3$ . Avec ce critère, nos résultats montrent qu'à densité constante, un matériau stable présente moins de contractance et plus de résistance au cisaillement qu'un matériau instable. Le tableau 2 compare les trois critères appliqués à nos 5 échantillons.

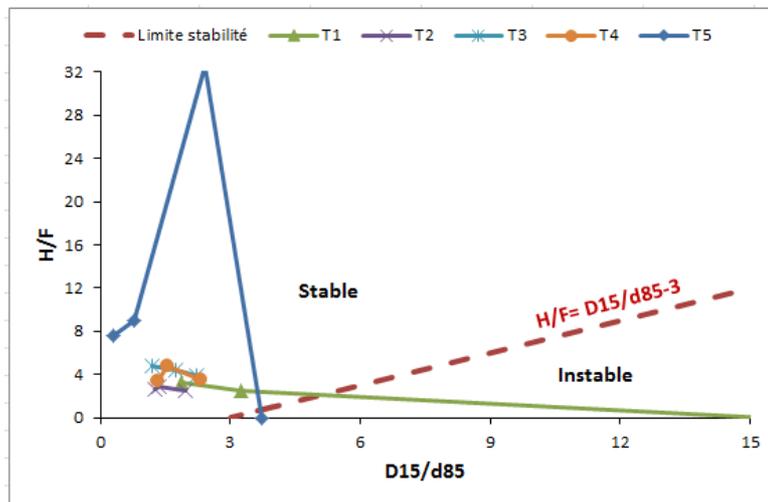
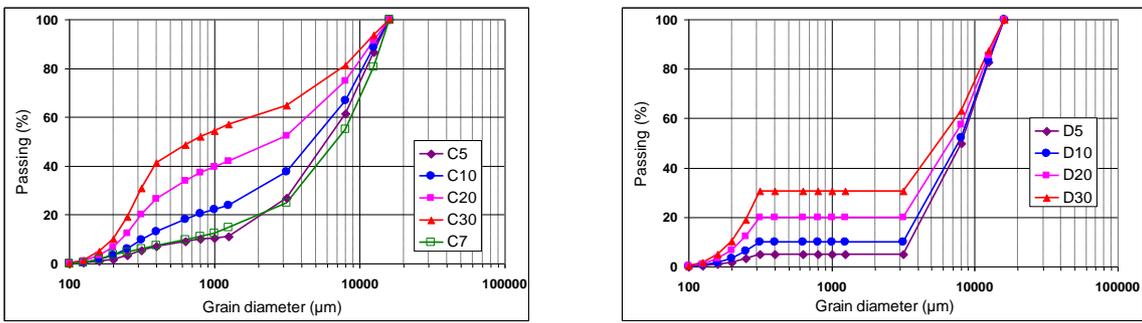


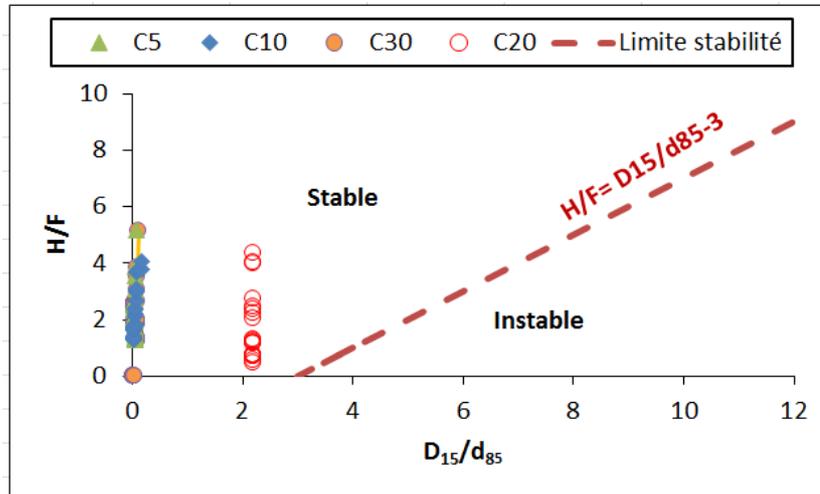
Figure 3. Critère de stabilité interne déduit de nos résultats : Classification des tranches T1 à T5

Une Deuxième validation du critère proposé sur les échantillons d'alluvions du Rhône en France (Andrianatrehina et al. 2012) Il s'agit de huit granulométries de sables dont 4 continues (C5 ; C10 ; C20 et C30) et 4 discontinues (D5 ; D10 ; D20 et D30) (figure 4). Ils sont distingués par le pourcentage en éléments dont le diamètre est inférieur à 0,315 mm considérés comme des fines.

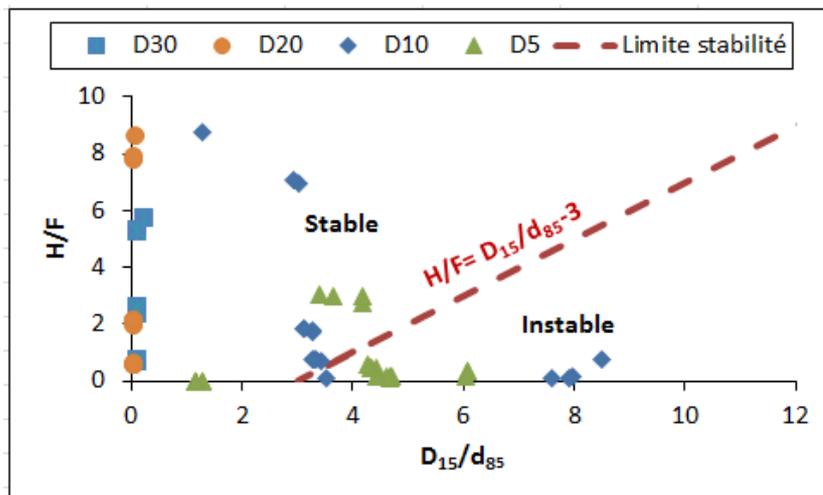


**Figure 4.** *Granulométries continues C et discontinues D (Andrianatrehina et al. 2015)*

Les figures 5 et 6 présentent respectivement la classification des granulométries continues et discontinues selon le critère proposé. Une comparaison de ce critère avec d'autres critères existents est établie au tableau 2 et montre qu'il est moins conservatif que ces derniers.



**Figure 5.** *Classification des granulométries continues.*



**Figure 6.** *Classification des granulométries discontinues.*

**Tableau 2.** Comparaison des résultats de classification des granulométries continues et discontinues selon le critère proposé et quelques critères précédents (U: unstable; S: stable; LS: limit stability).

	C5	C10	C20	C30	D5	D10	D20	D30
Critère proposé	S	S	S	S	U	U	S	S
Andrianatrehina et al. (2012)	U	S	S	S	U	U	U	S
Kenney & Lau (1985, 1986)	S	S	S	S	U	U	U	U
Kenney & Lau (1985,1986) + Kezdi (1979)	U	U	S	S	U	U	U	U
Terzaghi, USACE (1953)	S	S	S	S	U	U	U	U

#### 4. Conclusion

L'évolution des comportements mécaniques (résistance au cisaillement et contractance) en fonction du ratio minimum de stabilité  $(H/F)_{\min}$  et d'indice maximal de rétention  $(D_{15}/d_{85})_{\max}$  a montré que les matériaux classés stables à la fois par les deux critères présentent des performances mécaniques meilleures que ceux sur lesquels les deux critères divergent. Elle a permis aussi de remarquer qu'à densité et contrainte de confinement constantes, la résistance au cisaillement et la contractance/dilatance dépendent du ratio minimum de stabilité  $(H/F)_{\min}$  et de l'indice maximal de rétention  $(D_{15}/d_{85})_{\max}$ .

De ce constat, un nouveau critère de stabilité interne a été proposé. Il tient compte des conditions des critères de Kenney & Lau et celui de Kezdi tout en étant moins conservatif. Ce critère classe stable les granulométries ayant de meilleurs comportements mécaniques et de bonnes performances d'auto filtration lorsqu'elles sont soumises à un écoulement.

#### 5. Bibliographie

- [ABD 16] Abdoulaye Hama N., Ouahbi T, Taibi S. et al. Analysis of mechanical behaviour and internal stability of granular materials using discrete element method. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, *doi: 10.1002/nag.2510*.
- [AND 15] Andrianatrehina, L., Souli, H., Rech, J., Taibi, S., Fry, J. J., Ding, L., & Fleureau, J. M. (2015). Analysis of the internal stability of coarse granular materials according to various criteria. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-18.
- [BUR 93] Burenkova V.V. (1993). - Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils. *Proc. of the First International Conference "Geo-Filters", Filters in Geotechnical Engineering*. Brauns, Heibum & Schuler (eds), Balkema
- [CHAP 96] Chapuis R.P., Contant A., Baass K.A. (1996). "Migration of fines in 0-20 mm crushed base during placement, compaction, and seepage under laboratory conditions," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, p. 168-176.
- [FOS 01] Foster M., Fell, R., Spannagle M. (2001). "Statistics of embankment dam failure sand accidents" *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 5, p. 1000-1024.
- [HUA 13] Yu-Hua Zou, Qun Chen, Xiao-Qing Chen, Peng Cui. Discrete numerical modeling of particle transport in granular filters. *Computers and Geotechnics* 47 (2013) 48–56.
- [ITA 08] Itasca. Itasca Consulting Group Inc. PFC3D (particle flow code in 3-dimensions), version 4.0. ICG, Minneapolis, Minnesota; 2008.
- [KEN 85] Kenney T.C. & Lau .D. (1985). - Internal stability of granular filters, *Canadian Geotechnical Journal*, 22: 215-225.
- [KEN 86] Kenney T.C. & Lau D. (1986). - Internal stability of granular filters: reply, *Canadian Geotechnical Journal*, 23: 420-423.
- [KEZ 79] Kezdi A. (1979). - Soil physics – selected topics. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.
- [LAF 89] Lafleur J., Mlynarek J., Rollin A.L. (1989). "Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No. 12, p. 1747-1768.

[PAT 80] Patankar, S. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow. CRC Press.

[SOU 11] Hanène SOULI, Jean-Marie FLEUREAU, Livah ANDRIANATREHINA, Quoc Tuan PHAN. Compte-rendu des essais sur les alluvions du Rhône. Rapport final (Décembre 2011)

[TER 53] Terzaghi, K. (1951) 'Mécanique théorique des sols', Dunod, Paris.

[ZHA 11] Zhao, H. H., Shao, L. T., & Ji, S. Y. (2011, June). Numerical Simulation of Triaxial Test on the Dense Sand by DEM. In Instrumentation, Testing, and Modeling of Soil and Rock Behavior (pp. 233-241). ASCE.

[ZHA 13] Zhao, S., & Li, S. (2013). Stress-strain analysis of loess triaxial shear test by PFC 3D. Global Geology, 16(4), 217-220.