



HAL
open science

Modélisation de l'érosion interne et de l'initiation du renard hydraulique dans un barrage

Fatima Yakhlef, Abdallah Jabbouri, Philippe Dubujet, Miguel Parron Vera,
Abdellatif Khamlichi

► **To cite this version:**

Fatima Yakhlef, Abdallah Jabbouri, Philippe Dubujet, Miguel Parron Vera, Abdellatif Khamlichi. Modélisation de l'érosion interne et de l'initiation du renard hydraulique dans un barrage. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03390942

HAL Id: hal-03390942

<https://hal.science/hal-03390942>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MODELISATION DE L'EROSION INTERNE ET DE L'INITIATION DU RENARD HYDRAULIQUE DANS UN BARRAGE

F. YAKHLEF^a, A. JABBOURI^a, A. KHAMLICH^a, M. BEZZAZI^a, Ph. DUBUJET^b
M. PARRON VERA^c, M.D. RUBIO CINTAS^c, C.L. OLEGARIO^c

a. Université Abdelmalek Essaâdi, UAE, Martil, Maroc

b. Ecole Nationale des Ingénieurs de Saint-Etienne, ENISE, Av. Jean Parot, Saint-Etienne, France

c. Ecole Polytechnique Supérieure d'Algéciras, EPSA, Ave. Ramon Pujol, Algéciras, Espagne

Résumé:

On modélise l'amorce du renard hydraulique susceptible de se produire dans un barrage. Le modèle construit pour représenter ce problème est bidimensionnel. Il couple l'équation de Darcy, l'équation de conservation de la masse de la phase fluide, l'équation d'élasticité en déformations planes et une loi classique d'érosion interne. On analyse les conditions qui favorisent l'amorce du renard hydraulique en fonction des divers paramètres qui interviennent dans le problème.

Abstract:

Initiation of piping phenomenon which may occur under dams is modelled. A two dimensional model of the problem is build. It couples the Darcy equation, the mass conservation in the fluid phase, equations of elastic deformation under plane strain hypothesis and a classical law for internal erosion. Conditions which are favourable of piping initiation are analysed as function of the various parameters intervening in the problem.

Mots clés: érosion interne, renard hydraulique, milieu poreux, Loi de Darcy, déformations planes

1 Introduction

L'érosion interne est un endommagement progressif qui se produit dans les sols non cohésifs sous l'action de l'écoulement d'un fluide. Ce phénomène présente un vrai risque pour les ouvrages hydrauliques (digues, barrages). Il peut causer la rupture de ces ouvrages et ainsi des inondations. Une étude statistique [1] montre que les conséquences peuvent être catastrophiques, des milliers de morts et beaucoup de pertes économiques.

L'érosion interne est produite par la filtration progressive des particules fines qui sont arrachées et transportées par le fluide à travers le milieu poreux. Ce qui conduit à une augmentation de la porosité du sol et à la détérioration de ses propriétés mécaniques.

Les mécanismes d'érosion interne sont complexes et dépendent de plusieurs paramètres qui interagissent mutuellement. En général l'érosion interne est liée à deux phénomènes principaux [2]. La suffusion qui résulte d'une redistribution interne des particules fines contenues initialement dans le sol massif. La

distribution granulométrique des particules du sol ne change pas, mais l'homogénéité des sols n'est plus la même et la perméabilité diminue dans certaines régions, là où les particules fines s'attachent. Cette redistribution des particules provoque des pressions élevées, localisées en aval de l'écoulement, qui peuvent conduire au départ des particules de plus grand diamètre. De manière générale, l'évolution de ce phénomène de suffusion est très lente, ce qui permet sa détection. L'autre phénomène est le renard hydraulique (*Piping*) qui intervient en stade avancé de l'érosion interne. Il est associé à un écoulement régressif de départ des particules qui commence à l'aval et se propage à l'amont en provoquant la formation d'une cavité au sein du sol. Ce phénomène est difficile à détecter car il est bref, ce qui ne permet qu'un très court temps pour agir contre lui.

Plusieurs progrès ont été faits sur la modélisation de l'érosion interne, en particulier dans le cadre des questions relatives à la production froide des huiles lourdes [3] et [4]. De nombreux travaux ont été réalisés récemment en France dans le cadre du projet ERINOH (*ERosion Interne dans les Ouvrages Hydrauliques*). Parmi lesquels Bendahmane et al. [5] présentent une étude expérimentale dans le but d'examiner l'influence de trois paramètres critiques sur les mécanismes d'érosion d'un mélange sable argile. Les auteurs montrent qu'à faible gradient hydraulique, l'érosion de la structure argileuse est due à la suffusion. Lorsque le gradient hydraulique devient plus important, l'érosion de la fraction sableuse est de type régressive. Ils montrent encore que l'ampleur de l'érosion dépend de la teneur en argile et que la contrainte de confinement joue un rôle complexe dans ce phénomène d'érosion. Bonelli et Marot [6] ont présenté un modèle où l'érosion par suffusion d'un mélange sable argile est considérée comme une érosion de surface à l'échelle microscopique. Les auteurs montrent que le coefficient d'érosion de surface de la matrice argileuse peut être utilisé pour quantifier la vitesse d'érosion. La loi d'érosion qu'ils ont ainsi construite dépend de la fraction volumique de la phase argileuse et rend compte de l'effet du gradient hydraulique. Des comparaisons avec des résultats d'essais expérimentaux ont permis de valider la modélisation proposée. En s'intéressant au renard hydraulique, Bonelli et al. [7] présentent une modélisation de l'essai d'érosion au trou qui sert à quantifier la cinétique d'érosion par renard. Partant des équations d'écoulement diphasique avec diffusion, et des équations de saut avec érosion, ils ont développé un modèle pour l'érosion par renard. Les auteurs proposent une formule qui permet d'évaluer le temps caractéristique de ce mécanisme d'érosion et valident leur approche par comparaison avec des résultats expérimentaux.

Dans ce travail, on s'intéresse aux conditions d'amorce du renard hydraulique telles qu'elles peuvent apparaître dans un ouvrage réel, barrage en béton armé. Le but est de caractériser par modélisation numérique les effets de variation de la retenue d'eau et de la perméabilité sur la porosité maximale induite par érosion. Seul le stade associé à la suffusion est examiné et le sol est considéré comme un milieu continu composé de trois phases: le squelette, le fluide interstitiel et le solide fluidifié produit par l'érosion. Le modèle physique s'obtient par couplage des équations suivantes:

- la loi de Darcy traduisant l'écoulement dans le milieu poreux pour laquelle la perméabilité est supposée obéir à la loi de Kozeny-Carman;
- la loi de conservation de la masse de la phase fluide interstitiel contenant le solide fluidifié;
- les relations d'élasticité en déformations planes avec un comportement élastique endommageable du sol;
- une loi classique d'érosion interne.

Des difficultés numériques surgissent lorsque la méthode des éléments finis dans sa version classique est appliquée pour intégrer directement le système couplé formé par les équations de consolidation et d'érosion suffisante avec transport du produit d'érosion. Une méthode de résolution qui suppose un découplage partiel est considérée dans cette étude. Ainsi, le problème de la consolidation sera résolu dans un premier temps en ignorant la partie érosion interne avant de déterminer en deuxième lieu la porosité du sol telle qu'elle est affectée par le phénomène d'érosion. Le modèle est intégré sous l'environnement Comsol Multiphysics version 3.4. Les conditions qui favorisent l'amorce du renard hydraulique sont ensuite discutées.

2 Modèle d'érosion interne dans le massif du sol sous le barrage

La figure 1 décrit la géométrie du modèle adopté dans cette étude pour le barrage. Trois zones interviennent dans le problème: l'eau de la retenue du barrage, la structure du barrage et le sol perméable traversé par l'écoulement.

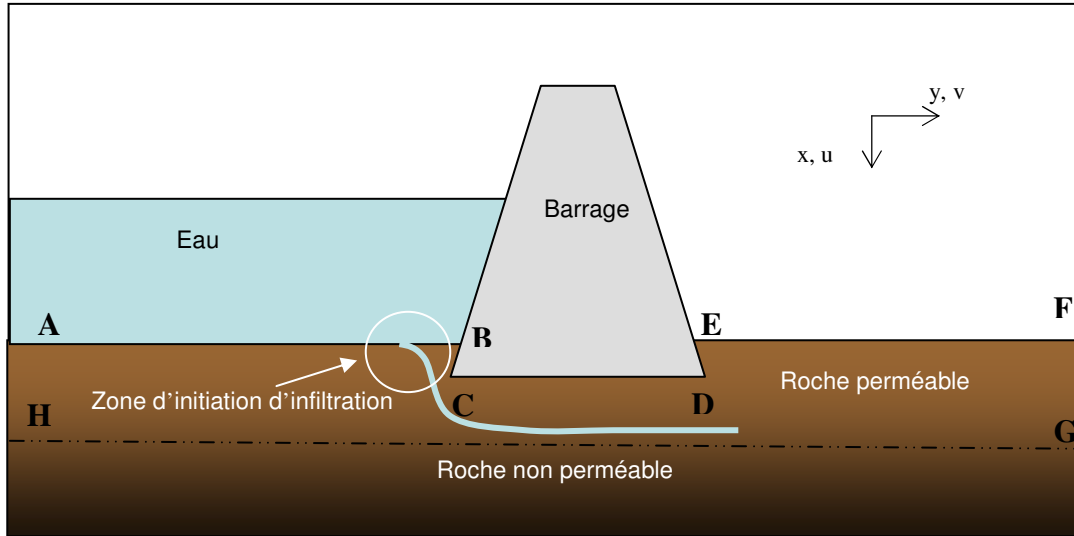


FIG.1 - Configuration géométrique du barrage

La structure du barrage est supposée rigide et imperméable. L'action de l'eau de la retenue est schématisée par la simple pression qu'elle exerce sur le fond. Pour le massif de fondation, on fait les hypothèses que les trois phases (squelette, fluide interstitiel, particules érodées) sont homogènes et isotropes et qu'elles sont régies par le principe de conservation de masse. L'écoulement de la phase liquide est supposé obéir à la loi de Darcy. La perméabilité est supposée suivre la loi de Kozeny-Carman. On suppose par ailleurs que les particules érodées et le fluide ont la même vitesse et que l'érosion est décrite par une loi classique, [10], qui relie directement la variation de la porosité au débit du fluide. Enfin, le comportement mécanique du sol est traité sous l'hypothèse des déformations planes. On montre alors que les équations du problème s'écrivent

Loi de Darcy

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k_0 \varphi^3}{g[\rho_w(1-c) + \rho_s c](1-\varphi)^2} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{k_0 \varphi^3}{g[\rho_w(1-c) + \rho_s c](1-\varphi)^2} \frac{\partial p}{\partial y} \right] = -(1-\varphi) \left[\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial y} \right] \quad (1)$$

Equilibre du sol

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{E_0(1-\varphi)(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{E_0(1-\varphi)}{2(1+\nu)} \frac{\partial u}{\partial y} \right] = \rho_s g + \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{E_0(1-\varphi)}{2(1-2\nu)(1+\nu)} \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{E_0(1-\varphi)}{2(1+\nu)} \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{E_0(1-\varphi)(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \frac{\partial v}{\partial y} \right] = \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{E_0(1-\varphi)}{2(1-2\nu)(1+\nu)} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \quad (3)$$

Loi d'érosion interne dans le sol

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \rho_s \frac{1}{\tau_{er}} \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_0} \right) \cdot |q| + \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial y} \quad (4)$$

Evolution de la concentration des particules érodées

$$\varphi \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{k_0 \varphi^3}{g[\rho_w(1-c) + \rho_s c](1-\varphi)^2} \left[\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial y} \right] \left[\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} \right] = (1-c) \left[\frac{\partial \varphi}{\partial t} - (1-\varphi) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial y} \right) \right] \quad (5)$$

où x est la coordonnée selon l'axe vertical descendant, y la coordonnée selon l'axe horizontal, t le temps, u la vitesse verticale, v la vitesse horizontale, p la pression de l'eau, φ la porosité du sol, c la concentration des particules érodées, q le débit, τ_{er} la résistance du sol à l'érosion, g l'accélération de

pesanteur, k_0 la perméabilité initial du sol, E_0 le module d'Young du sol, ν son coefficient de Poisson, ρ_s la masse volumique des grains solides du sol et ρ_w la masse volumique de l'eau.

3 Résolution par la méthode des éléments finis du modèle d'érosion

On peut remarquer que la concentration c n'apparaît pas dans les équations (1)-(4). Ces équations peuvent donc être intégrées de manière découplée de l'équation (5). Une fois la solution du système (1)-(4) est obtenue, elle peut être utilisée pour intégrer l'équation (5) et obtenir la distribution spatiale et temporelle de la concentration en particules érodées. Les difficultés ne sont pas pour autant toutes levées car les équations (1)-(4) ne peuvent pas être intégrées directement en utilisant la méthode des éléments finis dans sa version classique Bubnov-Galerkin car le problème obtenu est très mal conditionné. Les instabilités numériques polluent en fait la solution et empêchent tout calcul du modèle. En considérant le cas pratique de l'amorce du renard hydraulique, on peut constater que la porosité ne subit généralement que de faibles variations autour de sa valeur initiale ϕ_0 . On peut admettre alors que la porosité reste constante, $\phi = \phi_0$, dans les équations (1)-(3) en supposant que l'érosion n'affecte pas directement la solution du problème de consolidation. Ceci permet de découpler partiellement le problème et d'intégrer séparément le système (1)-(3) et l'équation d'érosion (4). Cette dernière s'intégrant analytiquement une fois la solution du problème de consolidation est calculée.

Cette approximation du problème d'érosion permet de lever le problème des instabilités numériques qui caractérise le problème fortement couplé. Elle n'est pas très restrictive car on peut vérifier a posteriori que les conditions d'amorce du renard hydraulique sont effectivement associées à une porosité qui reste voisine de la valeur initiale. Par ailleurs, les études effectuées par Vardoulakis et al. [8], puis par Papamichos et al. [9] dans le cadre du problème d'ensablement rencontré en production des huiles lourdes a permis de montrer qu'un modèle partiellement découplé permet de rendre compte de l'essentiel des observations expérimentales. Le modèle qu'ils ont utilisé suppose que l'écoulement du fluide et l'érosion se produisent dans une matrice qui reste rigide à l'instant t de sorte que la déformation du squelette ne les affecte pas directement. Le squelette solide se déforme lui de manière quasi-statique sous le seul effet des contraintes.

L'amorce du renard hydraulique est caractérisée par une variation locale subite de la porosité qui est mise en évidence par la résolution du système (1)-(4). Le développement du phénomène du renard hydraulique ne peut pas être appréhendé au travers de ce simple système qui, rappelons le, suppose entre autres que le sol est homogène. La phase de développement du renard hydraulique peut être analysée de manière simplifiée à l'aide du concept du temps restant jusqu'à la formation de la brèche, Bonelli et al. [7].

Afin d'intégrer le problème (1)-(4), un modèle éléments finis est développé en utilisant le logiciel commercial Comsol Multiphysics version 3.4. lorsque des conditions initiales et aux limites sont spécifiées. La figure 2 présente le modèle géométrique développé sous Comsol.

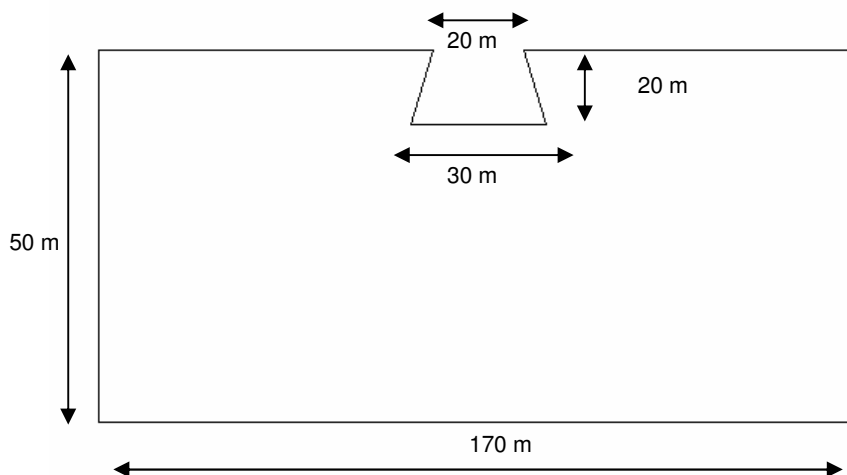


FIG.2 - Modèle géométrique Comsol adopté pour le problème du barrage

Pour l'étude paramétrique effectuée dans la suite, on suppose que la consolidation sous le poids du barrage et de l'eau de la retenue s'est achevée. On s'intéresse seulement à l'effet de l'augmentation du niveau de la retenue sur l'érosion interne qui peut se développer sous le barrage; le terme $\rho_s g$ est donc omis du second membre de l'équation (2).

Le modèle simplifié qui est proposé dans cette étude suppose que l'eau de la retenue agit en tant qu'une simple pression statique qui s'exerce sur la face AB, que le barrage est étanche et qu'il est indéformable de sorte qu'il n'agit sur la partie CD que par un champ statique de contraintes. Les conditions initiales et aux limites associées au système formé par les équations de consolidation (1)-(3) s'écrivent

Conditions initiales :

$$p = 0, u = 0, v = 0 \quad (6)$$

Conditions aux limites:

$$\nabla u = \nabla v = 0, p = p_{in} \quad \text{sur AB} \quad (7)$$

$$\nabla u = \nabla v = 0, p = 0 \quad \text{sur EF} \quad (8)$$

$$\nabla u = \nabla v = \nabla p = 0 \quad \text{sur BC, DE et CD} \quad (9)$$

$$u = v = \nabla p = 0 \quad \text{sur FG, AH et HG} \quad (10)$$

où ∇ désigne l'opérateur gradient et p_{in} la surpression.

4 Résultats et discussions

On s'intéresse à l'effet de l'augmentation du niveau de la retenue p_{in} sur l'érosion interne qui peut se développer sous le barrage et ce en fonction de la perméabilité k_0 . La résistance à l'érosion τ_{er} sera supposée constante : $\tau_{er} = 10^5$ usi. Les deux paramètres p_{in} et k_0 sont intimement liés à la granulométrie et au type de sol perméable présent sous le barrage.

Les autres paramètres utilisés dans les simulations sont: $\rho_s = 2650 \text{ kg.m}^{-3}$, $\rho_w = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$, $g = 9.8 \text{ m.s}^{-2}$, $E_0 = 5 \times 10^8 \text{ Pa}$, $\nu = 0.2$ et $\phi_0 = 0.36$. Les paramètres k_0 et p_{in} sont considérés variables.

On effectue alors sous Comsol la simulation en transitoire du problème de consolidation gouverné par les trois équations différentielles aux dérivées partielles (1)-(3) lorsqu'elles sont assujetties aux conditions initiales (6) et aux conditions limites (7) à (10). Ensuite, on résout l'équation d'érosion (4). Les résultats obtenus permet alors de tracer sous Comsol les isovlaeurs de la porosité. La figure 3 présente les isovlaeurs de la porosité pour $k_0 = 10^{-6}$ et $p_{in} = 5 \times 10^4$. Le tableau 1 permet de récapituler la valeur de la porosité maximale en fonction de k_0 et de p_{in} .

Surpression du barrage, p_{in} (Pa)	Perméabilité k_0 (m.s^{-1})	Porosité maximale ϕ_{max}
5×10^4	10^{-6}	0.382
	10^{-7}	0.362
10^5	10^{-6}	0.403
	10^{-7}	0.365

Tableau 1: valeurs de la porosité maximale en fonction de la perméabilité k_0 et de la surpression p_{in}

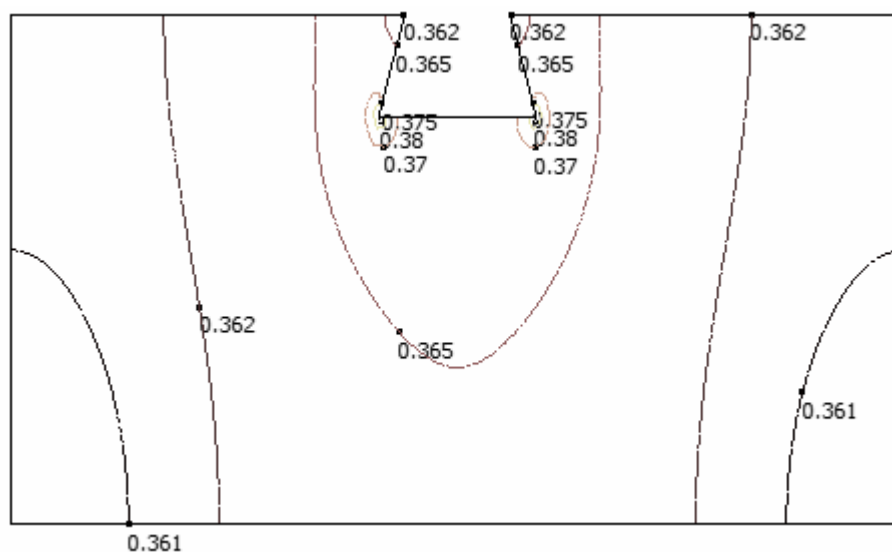


FIG.3 - Iso valeurs de la porosité pour $k_0 = 10^{-6}$ et $p_{in} = 5 \times 10^4$

5 Conclusions

La modélisation de l'amorce du renard hydraulique a été effectuée dans ce travail. Une simplification des équations obtenues a été considérée afin d'éliminer le problème des instabilités numériques qui affectent la résolution par éléments finis du problème fortement couplé. L'estimation quantitative de l'effet de cette approximation n'est pas actuellement disponible mais des éléments récupérés dans la littérature permettent d'augurer de son adéquation. Des études paramétriques ont ensuite été effectuées sur les conditions d'amorce du renard hydraulique en fonction de la variation du niveau de la retenue du barrage et de la perméabilité du sol qui le supporte. Il a été possible de vérifier que le modèle d'érosion proposé prédit toujours une amorce au droit des discontinuités de la fondation du barrage, là où les gradients hydrauliques sont les plus forts.

Références

- [1] Hei X.Y., Wang Z.Y., Huang J.C., Temporal and spatial distribution of dam failure events in China, *International Journal of Sediment Research* 23, 398-405, 2008.
- [2] Stavropoulou M., Papanastasiou P., Vardoulakis I. Coupled wellbore erosion and stability analysis. *International Journal for Numerical and analytical Methods in Geomechanics*, 22: 749-769. 1998.
- [3] Vardoulakis I, Stavropoulou M., Papanastasiou P. Hydromechanical aspects of sand production problem. *Transp. Porous Media*, 22: 225-244, 1995.
- [4] Vardoulakis I. Fluidisation in artesian flow conditions: Hydromechanically stable granular media. *Géotechnique*, 54 (2): 117-130, 2004.
- [5] Bendahmane F., Marot D., Alexis A. Experimental Parametric Study of Suffusion and Backward Erosion. *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.* 134(1): 57-67, 2008.
- [6] S. Bonelli, D. Marot. On the modelling of internal soil erosion. The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Goa, India, October 2008.
- [7] Bonelli S., Brivois O. and Lachouette D. The scaling law of piping erosion. 18^{ème} Congrès Français de Mécanique Grenoble, 27-31, août 2007.
- [8] Vardoulakis I., Stavropoulou M., and Papanastasiou P. Hydromechanical aspects of sand production problem. *Transport in Porous Media*, 22: 225-244, 1996.
- [9] Papamichos E., Vardoulakis I., Tronvoll J. and Skjerstein A. Volumetric sand production model and experiment. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 25(8), 789-808, 2001.
- [10] Papamichos E, Stavropoulou M. An erosion-mechanical model for sand production rate prediction. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 35 (4-5): 531-532, 1998.