

# Modélisation des renards hydrauliques : vers une approche discrète couplée

D.K. TRAN<sup>a</sup>, N. PRIME<sup>a</sup>, F. FROIHO<sup>a\*</sup>, C. CALLARI<sup>b</sup> et E. VINCENS<sup>a</sup>

a. Université de Lyon, LTDS, UMR CNRS 5513, Ecole Centrale de Lyon  
36 av. Guy de Collogue, 69134 Ecully cedex, France

b. Università del Molise  
Via De Sanctis, 86100 Campobasso, Italy

## Résumé :

*Une approche numérique discrète est présentée dans cette contribution afin de modéliser le front régressif d'érosion dans le phénomène de « renard hydraulique » pour les barrages et digues en terre. Les méthodes numériques discrètes DEM et LBM sont utilisées pour reproduire respectivement le comportement du squelette granulaire et du fluide interstitiel dans la région du front d'érosion.*

## Abstract :

*In this contribution a discrete numerical approach is presented for the modelling of the backward erosion front in piping erosion of earth dams and levees. Two discrete numerical methods, namely DEM and LBM, are used to represent the behaviour of the granular skeleton and of the pore fluid in the erosion front region, respectively.*

**Mots clefs : ouvrages hydrauliques en terre, érosion interne, renard hydraulique, front d'érosion, DEM, LBM**

## 1 Contexte de l'étude

L'érosion est la principale cause de rupture des digues ou barrages en terre. En effet, entre 1970 et 1990, plus de 90% des ruptures de ces ouvrages hydrauliques dans le monde ont été attribuées à ce phénomène [1] ; dans la moitié des cas, lorsque le mode de rupture a été clairement identifié, une érosion interne à l'ouvrage ou à ses fondations en a été la cause. La présente contribution se focalise sur l'érosion interne de type « renard hydraulique » au cours de laquelle un conduit d'érosion se forme de manière régressive depuis l'aval de l'ouvrage jusque l'amont, conduisant à une perte d'étanchéité et de stabilité du remblai. La bonne compréhension de ce mécanisme nécessite l'analyse des conditions d'arrachement et transport de particules dans deux configurations distinctes : au niveau des parois du conduit d'érosion, par effet de l'écoulement tangentiel turbulent à l'intérieur du conduit et ayant pour conséquence l'élargissement de ce dernier ; au niveau du front du conduit, qui se propage régressivement sous l'effet d'un flux principalement normal.

Les interactions complexes entre l'écoulement et le squelette granulaire, responsables du développement d'un conduit d'érosion, représentent un verrou scientifique majeur. Ceci justifie le nombre croissant de travaux concernant ce phénomène, à différentes échelles d'étude (ouvrage, conduit, grains) et avec différentes approches (empirique, numérique ou analytique). In situ,

l'expertise d'ouvrages érodés a contribué à renforcer les connaissances empiriques concernant le mode de propagation de l'érosion de conduit ainsi que sa détection [2]. A cette échelle, le développement de modèles semi-empiriques a permis d'établir un critère d'érosion lié au gradient hydraulique [3]. Par ailleurs, à l'échelle du renard, de nombreuses études se sont intéressées à l'élargissement du conduit. Empiriquement le 'Hole Erosion Test' a permis de relier la masse érodée à la contrainte de cisaillement sur la paroi du conduit due à l'écoulement [4,5]. Ces lois empiriques ont pu être utilisées pour des développements numériques [6] ou analytiques [7]. Cependant, un nombre beaucoup plus limité de travaux portent sur la propagation du front d'érosion. Les travaux analytiques et numériques de Vardoulakis et al. [8,9] et Papamichos et Vardoulakis [10], qui concernent les problèmes de production de sable dans les puits pétroliers, constituent quelques-unes des rares approches qui peuvent être reliées aux mécanismes d'érosion au front des renards hydrauliques, étant donné la configuration de l'écoulement, essentiellement normal à la surface du sol. Enfin, à l'échelle granulaire, quelques premières approches numériques visent à reproduire, en modélisation discrète avec couplage fluide-solide, les mécanismes associés à l'écoulement tangentiel [11] ou normal à la surface du squelette solide [12]. Notre contribution s'inscrit dans la continuité de ces dernières études à l'échelle discrète, en s'intéressant particulièrement à l'évolution régressive du front d'érosion.

## 2 Démarche numérique discrète

La méthode des éléments discrets (*Discrete Element Method*, DEM) est connue pour être une approche efficace pour modéliser le comportement mécanique d'assemblages granulaires [13]. En tant qu'outil « d'expérimentation numérique » à des échelles proches du VER, elle constitue aujourd'hui un complément important à l'expérimentation en laboratoire [14]. Dans cet esprit, un code DEM en 2D a été développé en interne pour l'étude micromécanique du front d'érosion dans le phénomène de renard hydraulique, en association avec une méthode numérique permettant la modélisation de l'écoulement fluide inter-granulaire.

La description du fluide inter-granulaire est obtenue par la méthode de Boltzmann sur réseau (*Lattice Boltzmann Method*, LBM). Cette méthode, introduite en 1988 par McNamara et Zanetti [15], a émergé récemment comme un outil puissant de simulation en dynamique des fluides, d'une part par la simplicité de son algorithme de calcul, et d'autre part par sa capacité à modéliser différentes situations d'écoulement, avec prise en compte de géométries complexes. Elle permet la détermination des quantités macroscopiques nécessaires à la description de l'écoulement (densité de masse  $\rho$ , vitesse de l'écoulement  $\vec{u}$ ) par l'intermédiaire de la fonction de distribution  $f(\vec{x}, \vec{v}, t)$  définie dans l'espace des phases  $(\vec{x}, \vec{v})$ , avec  $\vec{x}$  et  $\vec{v}$  respectivement la position et la vitesse (microscopiques) de la particule fluide [16]. La méthode est basée sur la résolution de l'équation de Boltzmann par simplification du terme de collision selon l'approche «BGK» (Bhatnagar-Gross-Krook, [17]). L'algorithme numérique de résolution prévoit une discrétisation de l'équation de Boltzmann pour les trois variables de la fonction de distribution recherchée. Pour des vitesses d'écoulement suffisamment petites par rapport à la vitesse de propagation du son dans le milieu, l'équation de Boltzmann sur réseau donne une approximation satisfaisante des équations de Navier-Stokes pour les fluides incompressibles [18].

Un code LBM en 2D est développé en interne et a été validé sur la base de plusieurs configurations d'écoulement. Un exemple de validation fait référence à la configuration dans les figures 1 et 2 et concerne le calcul des coefficients de traînée  $C_D = 2F_x / (\rho u_m^2 D)$  et de portance  $C_L = 2F_y / (\rho u_m^2 D)$  au cours de l'écoulement autour d'un cylindre fixe (avec  $u_m$  la vitesse moyenne à l'entrée de l'écoulement et  $D$  le diamètre du cylindre). Les forces de traînée  $F_x$  et de portance  $F_y$  sur le cylindre ont été

calculées à partir de la variation de la quantité de mouvement du fluide au niveau de la frontière fluide-solide [19]. Les résultats quantitatifs ( $C_D=3.296$ ,  $C_L=1.0048$ ) fournis par le code sont compatibles avec ceux reportés dans un benchmark de plusieurs méthodes numériques en mécanique de fluides [20].

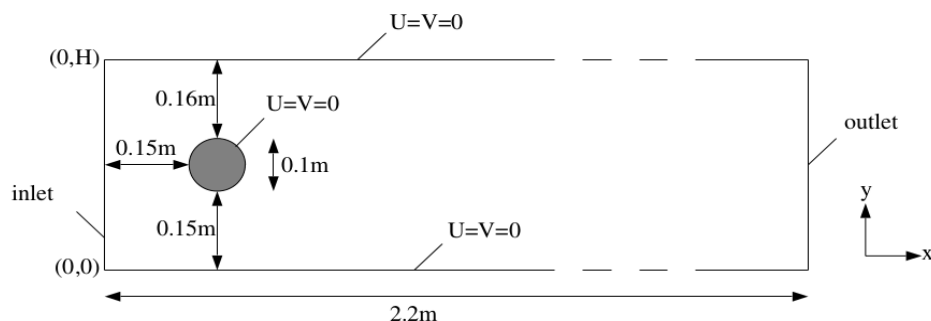


Figure 1 : Écoulement autour d'un cylindre [20] : configuration géométrique et conditions aux limites de non glissement (avec  $U$  et  $V$  respectivement vitesses d'écoulement horizontale et verticale).

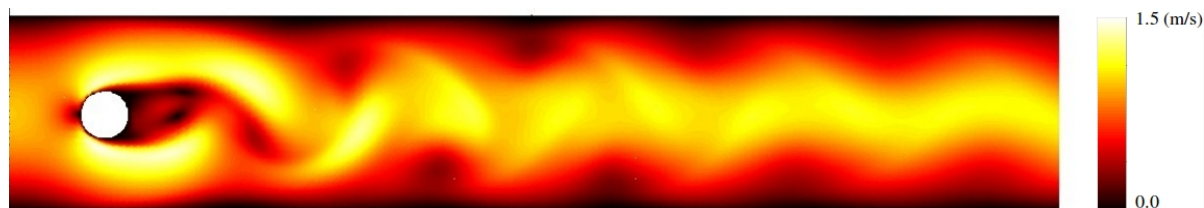


Figure 2 : Étude de la configuration en figure 1 : simulation numérique avec le code LBM développé en interne ( $Re=100$  ;  $\rho = 1 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $\nu=10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $u_m=1.0 \text{ m s}^{-1}$ ).

### 3 Perspectives de l'étude

Le couplage entre les deux codes (DEM et LBM, cf. [11,21]) est en phase finale de développement et de validation. Cet outil numérique sera employé initialement pour une modélisation 2D d'un élément de volume représentatif de l'interface sol-conduit au niveau du front d'érosion. Cette étude bidimensionnelle constituera une première prospection afin d'établir les potentialités de la méthode et les principaux verrous à lever.

L'état de développement actuel du code permet cependant de simuler l'écoulement au sein d'un assemblage granulaire 2D fixe (essai de filtration). La figure 3 montre la configuration d'un assemblage de 800 disques (rayon moyen 0.2 mm) obtenue, avec l'outil DEM, par une procédure de compression isotrope sans frottement au contact, avec un rapport entre contrainte de confinement et raideur normale au contact de 0.018. La figure 4 représente la configuration hydraulique correspondante : les rayons (géométriques) des particules ont été remplacés par les « rayons hydrauliques » correspondants afin de faire apparaître, dans une modélisation 2D, un réseau connecté de pores ou l'écoulement est représentatif de celui au sein d'un assemblage 3D de particules sphériques [22,23]. L'écoulement est induit par un gradient hydraulique de 0.56 entre l'amont et l'aval du domaine de filtration (respectivement à gauche et à droite dans la figure 4) ; il est confiné par les parois horizontales où une condition de non glissement est appliquée (frontières haute et basse de la figure).

La modélisation réaliste de l'interface sol-conduit au niveau du front d'érosion nécessitera la définition

ou l'affinement de plusieurs aspects concernant d'une part l'assemblage granulaire (conditions de confinement, introduction de la cohésion par la loi de contact, etc.) et d'autre part l'écoulement interstitiel ou dans le conduit en proximité du front (estimation des gradients hydrauliques, prise en compte de nombres de Reynolds élevés, etc.).

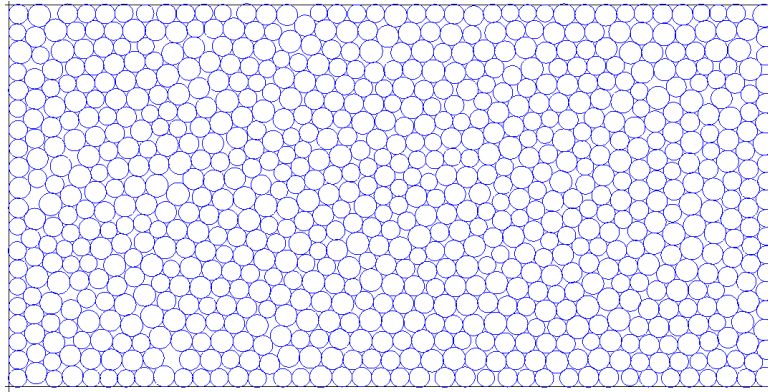


Figure 3 : Assemblage granulaire 2D

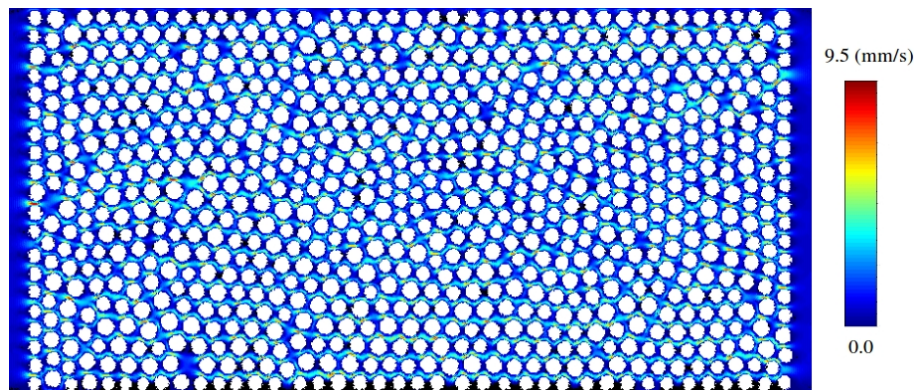


Figure 4 : Filtration à travers la configuration hydraulique de l'assemblage dans la figure 3  
( $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ).

## 4 Références

- [1] M. Foster, R. Fell, And M. Spannagle, The statistics of embankment dam failures and accidents, Canadian Geotechnical Journal 37 (2000) 1000-1024
- [2] R. Fell, J.J. Fry (dir.), Internal Erosion of Dams and Their Foundations, Taylor & Francis, London, 2007
- [3] J.B. Sellmeijer, On the mechanism of piping under impervious structures, PhD-thesis, Delft University of Technology, Delft, 1988
- [4] C. Wan, R. Fell, Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by slot erosion test and hole erosion test, Rapport n. R-412, School of Civil & Environmental Engineering, UNSW, Sydney, Australia, 2002
- [5] C. Wan, R. Fell, Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130 (2004) 373-380

- [6] R. Cottreau, P. Diez, A. Huerta, Modeling, with a unified level-set representation, of the expansion of a hollow in the ground under different physical phenomena, *Computational Mechanics* 46 (2010) pp. 315-327
- [7] S. Bonelli, O. Brivois, The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 32 (2008) 1573-1595
- [8] I. Vardoulakis, M. Stavropoulou, and P. Papanastasiou, Hydro-mechanical aspects of the sand production problem, *Transport in Porous Media* 22 (1996) 225-244
- [9] I. Vardoulakis, P. Papanastasiou, and M. Stavropoulou, Sand erosion in axial flow conditions, *Transport in Porous Media* 45 (2001) 267-281
- [10] E. Papamichos, I. Vardoulakis, Sand erosion with a porosity diffusion law, *Computer and Geotechnics* 32 (2005) 47-58
- [11] F. Lominé, L. Scholtès, L. Sibille, P. Poullain, Modeling of fluid-solid interaction in granular media with coupled lattice Boltzmann/discrete element methods: application to piping erosion, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 37 (2013) 577-596
- [12] M. Mansouri, J.Y. Delenne, M.S. El Yousoufi and A. Séridi. A 3D DEM-LBM approach for the assessment of the quick condition for sands. *Comptes Rendus Mécanique* 337 (2009) 675-681
- [13] F. Radjaï, F. Dubois, *Modélisation numérique discrète des matériaux granulaires*, Hermès – Lavoisier, 2010
- [14] J.-N. Roux, F. Chevoir, Simulation numérique discrète et comportement mécanique des matériaux granulaires, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 254 (2005) 109-138
- [15] McNamara and G. Zanetti, Use of the boltzmann equation to simulate lattice-gas automata, *Physical Review Letters* 61 (1988) 2332-2335
- [16] L. Landau, E. Lifchitz, *Physique Théorique: Physique Statistique*, Ellipses, 1998
- [17] L. Bathnagar, E.P. Gross, and M. Krook, A model for collision processes in gases, I. small amplitude processes in charged and neutral one-component system, *Physical Review E* 94 (1954) 511-525.
- [18] S. Hou, Q. Zou, S. Chen, G. D. Doolen, and A. C. Cogley, Simulation of cavity flow by the lattice Boltzmann method, *Journal of Computational Physics* 118 (1995) 329-347
- [19] A. J. C. Ladd, Numerical simulations of particulate suspensions via discretized boltz-mann equation, part i, theoretical fundation, *Journal of Fluid Mechanics* 271 (1994) 285-309
- [20] M. Schafer, S. Turek, Benchmark Computations of Laminar Flow Around a Cylinder, dans: E. H. Hirschel (dir.), *Flow Simulation with High-Performance Computers II*, Springer, 1996, 547-566
- [21] Y. T. Feng, K. Han, and D. R. J. Owen, Coupled lattice Boltzmann method and discrete element modelling of particle transport in turbulent fluid flows : Computational issues, *International Journal for Numerical Methods In Engineering* 72 (2007) 1111-1134
- [22] D. F. Boutt, B. K. Cook, J. R. Williams, A coupled fluid–solid model for problems in geomechanics: application to sand production, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 35 (2011) 997-1018
- [23] X. Cui, H. Li, A. Chan, and D. Chapman, A 2D DEM-LBM study on soil behaviour due to locally injected fluid, *Particuology* 10 (2012) 242-252