

Rupture des ouvrages hydrauliques par Renard Hydraulique

B.KISSI^a, A. EL GOULBZOURI^b, M. ANGEL PARRON VERA^c

a. Université Hassan II, ENSAM Casablanca, Maroc

Equipe de Modélisation et Simulation des Structures en Génie Civil M2SGC

kissifst@gmail.com

b. Université Mohammed I, ENSA Hoceima, Maroc

e.abdelouafi@hotmail.fr

c. Université de Cadix, Ecole polytechnique supérieure d'Algeiras, Espagne

miguelangel.parron@uca.es

Résumé :

L'érosion interne/externe d'un sol est un phénomène complexe représentant une source très importante de problèmes lorsqu'on considère la sécurité des digues et des barrages. Ce phénomène qui se traduit par l'apparition de fuites très graves sous les ouvrages hydrauliques, le renard hydraulique, est l'une des causes majeures de leur rupture. La survenance de tels accidents peut engendrer des pertes matérielles et en vies humaines désastreuses. Elle est liée à la formation et au développement d'un tunnel continu entre l'amont et l'aval de l'ouvrage, le conduit de fuite s'agrandit par érosion (renard) jusqu'à provoquer l'effondrement de la structure.

L'érosion interne de sol est modélisée en utilisant le logiciel Fluent. L'écoulement fluide dans un barrage en terre est supposé être gouverné par les équations de Navier-Stokes et le corps du barrage est supposé obéir au système des équations de Biot qui couple l'équation de Darcy avec les déformations poroélastiques axisymétriques. Une équation explicite qui exprime la loi d'érosion est écrite sur l'interface qui sépare l'eau et la paroi du barrage.

Mots clefs : Erosion, érosion de surface, loi de Darcy, Renard hydraulique.

1 Introduction

L'érosion d'un sol est un phénomène complexe représentant une source importante de problèmes lorsqu'on considère la sécurité des digues et des barrages. Ce phénomène, qui se traduit par l'apparition de fuites très graves sous les ouvrages hydrauliques, le renard hydraulique, est l'une des causes majeures de leur rupture. La survenance de tels accidents peut engendrer des pertes matérielles et en vies humaines désastreuses. Elle peut avoir aussi des conséquences dramatiques sur le plan socioéconomique. De nombreux cas de ruptures de barrages à travers le monde ont été rapportés dans la littérature [1]. Une étude statistique [4] montre que les conséquences peuvent être catastrophiques, des milliers de morts et beaucoup de pertes économiques. Parmi les exemples récents dans ce domaine, on pourrait citer la rupture du barrage des Ouches survenue dans le Puy-de-Dôme en juillet 2001.

L'érosion est un phénomène de dégradation progressive du sol qui est induit par l'action d'un écoulement interne le traversant. Lors des dernières décennies, de nombreux travaux de recherche ont porté sur la caractérisation expérimentale et théorique de ce phénomène, [2], [3]. [6],

L'érosion est associée au détachement des particules fines par l'effet des forces de l'écoulement fluide. Afin de préciser le phénomène de détachement des particules et leur transport au sein d'un sol, huit types de mécanismes ont ainsi été répertoriés: la boullance, la suffusion, l'érosion régressive, le débouillage, la dissolution, la dispersion, l'entraînement et l'exsolution; et deux types de transport: transport dans un conduit, et transport dans l'espace poreux inter particulaires. Cette description très générale de ces phénomènes a été simplifiée selon [1] en quatre mécanismes d'initiation et de progression: érosion par écoulement localisé dans une fissure ou un trou, érosion régressive, suffusion, érosion de contact entre deux sols.

Lorsqu'on s'intéresse à l'érosion interne, on peut distinguer, selon [1], quatre phases de développement de ce type d'érosion: l'initiation, la filtration, la progression et la rupture par brèche. L'initiation représente le fait que la sollicitation hydraulique est supérieure à un seuil d'érosion. La filtration est une phase qui dépend de la présence d'un filtre, et de son efficacité. La progression est la phase de développement de l'érosion interne au sein du matériau. La rupture par brèche est la phase ultime spécifique à l'ouvrage.

Nous nous intéressons dans le contexte de cette étude à la phase de progression d'une érosion interne par écoulement localisé dans un barrage, dénommé «Renard hydraulique», ou «piping». On peut parler alors d'érosion interne lorsqu'on prend comme référence le sol dans sa globalité ou d'érosion de surface lorsqu'on focalise l'attention sur les mécanismes d'interaction entre l'écoulement fluide et le sol qui délimite le trou.

L'objectif de ce travail consiste à élaborer un modèle numérique 2D, instationnaire, basé sur la méthode des éléments finis afin de décrire un écoulement turbulent diphasique érodant un milieu poreux de type sol sujet à un écoulement de Darcy. L'écoulement est diphasique (de l'eau et une phase continue de particules en suspension). Mais, il sera supposé homogène en prenant des caractéristiques homogénéisées. Le sol est également diphasique (une phase continue de particules en contact formant un milieu poreux contenant de l'eau).

L'objectif de ce travail est de caractériser l'érosion interne (renard hydraulique) et calculer le taux d'érosion au sein d'un barrage afin d'éviter sa rupture.

2 Equations du problème

Les équations qui gouvernent l'écoulement dans le sol et la consolidation qui s'y produit sont issues du modèle poroélastique de Biot qui couple la loi de Darcy et les déformations axisymétriques du sol. La théorie de la poroélasticité présentée initialement en 1955 par Biot [5] permet de décrire ainsi l'interaction entre l'écoulement fluide et la déformation du milieu poreux.

La figure 1 montre la géométrie du barrage étudié. 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.

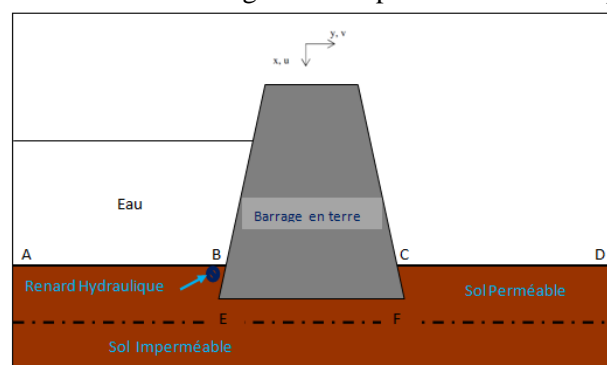


Figure.1 : géométrie du barrage

Les équations du problème s'écrivent :

Loi de Darcy

Dans le cas d'un problème 2D, la loi de Darcy s'écrit sous la forme :

$$q = - \frac{K_0 \phi^3 (1 - \phi_0)^2}{\eta_w \phi_0^3 (1 - \phi)^2} \left[\begin{array}{c} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} + \xi \rho_s g \end{array} \right]$$

Equilibre du sol

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{2E_0(1 + \phi_0 - \phi)(1 - \nu)}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{E_0(1 + \phi_0 - \phi)}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{E_0(1 + \phi_0 - \phi)}{2(1 + \nu)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) - \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{E_0(1 + \phi_0 - \phi)}{2(1 + \nu)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{E_0(1 + \phi_0 - \phi)}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2E_0(1 + \phi_0 - \phi)(1 - \nu)}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - [\rho_s(1 - \phi + \xi \phi c) + \rho_w \phi(1 - c)] g - \frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

Loi d'érosion interne dans le sol

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\rho_s K_0 \phi^3 (1 - \phi_0)^2}{\eta_w \tau_{er} \phi_0^3 (1 - \phi)^2} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_c} \right)^a \left\langle \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} - \xi \rho_s g \right)^2} - \frac{\eta_w \phi_0^3 (1 - \phi)^2}{K_0 \phi^3 (1 - \phi_0)^2} q_{cr} \right\rangle + \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x}$$

Où x coordonnée selon l'axe vertical descendant, y 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, E est le module de Young, ν coefficient de Poisson, η_w viscosité dynamique de l'eau en $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}$

K_0 Perméabilité hydraulique en m.s^{-1} ; ξ constante.

3 Modélisation

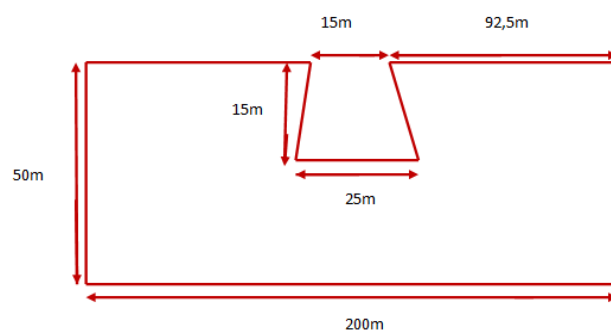


Figure.2 : Modèle géométrique pour le problème du barrage

Le modèle 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.

Les conditions initiales et aux limites associées au système :

Conditions initiales :

$$p = 0, u = 0, v = 0$$

Conditions aux limites:

$$p = \text{pinlet sur EF}$$

$p=0$ sur la partie supérieure du barrage
 Paroi sur la partie gauche et droite du barrage.

Le tableau suivant donne la porosité et la perméabilité en fonction de la surpression du barrage :

Surpression du barrage (Pa)	Porosité maximale φ_{\max}	Perméabilité (ms^{-1})
30000	0.382	10^{-5}
50000	0.4	10^{-7}

Tableau.1 : perméabilité et porosité du sol en fonction de la surpression du barrage.

4 Résultats et discussions

Les résultats trouvés dans le cas du modèle couplé écoulement fluide/consolidation de Biot indiquent que la modélisation 2D est nécessaire si l'on veut décrire avec raffinement l'effet de l'écoulement au sein du barrage. En particulier les détachements localisés qui s'observent parfois au niveau de la paroi interne du barrage.

Le phénomène de couplage de l'écoulement avec la consolidation du sol induit localement des surpressions et un excès de contrainte de cisaillement qui favoriserait l'érosion de surface.

La contrainte de cisaillement augmente en fonction de la surpression du barrage, ainsi le taux d'érosion devient très important lorsque la surpression augmente.

Le taux d'érosion est égal à la masse de sol érodée par unité de surface et de temps. Il est alors possible de classer l'érodabilité du sol en fonction de taux d'érosion.

La figure suivante donne le taux d'érosion en fonction de la surpression du barrage.

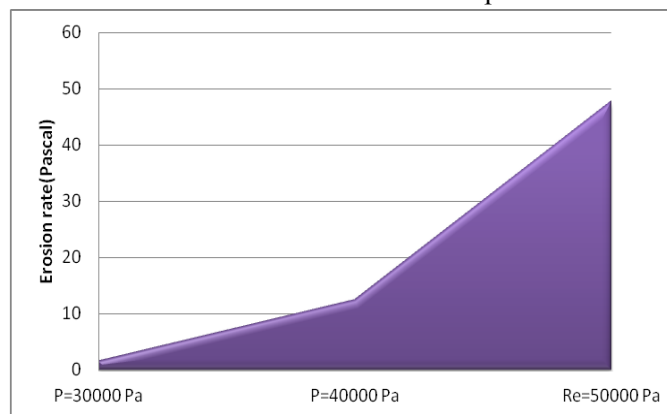


Figure.3 : taux d'érosion en fonction de la surpression du barrage.

5 Conclusions

La modélisation bidimensionnelle du barrage a été effectuée dans ce travail. Le barrage est modélisé en tenant compte l'effet de l'écoulement de Darcy et des déformations élastiques axisymétriques du milieu poreux sol. La prise en compte du déplacement de la paroi interne du barrage induit une localisation des contraintes qui apparaît dans la zone affecté par le renard hydraulique. Des surpressions apparaissent alors dans la paroi du barrage. Il peut en résulter une érosion locale accélérée de la paroi interne.

L'érosion du sol n'est pas uniforme sur toute la paroi interne du barrage infecté par le renard hydraulique.

Le taux d'érosion augmente en fonction de la pression, de la rugosité et de la concentration de l'argile. En particulier, le taux d'érosion à l'extrémité de sortie du trou est maximal.

Le renard hydraulique est difficilement détectable et évolue très rapidement, ce qui laisse peu de temps pour agir contre lui. Quand il arrive, c'est souvent trop tard. Le calcul du temps nécessaire pour évacuer un barrage avant la destruction est très important.

Références

[1] Foster M.A., Fell R., Spannangle M. The statistics of embankment dam failures and accidents. Canadian geotechnical Journal 37(5), 100-1024, 2000.

[2] Fjar E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M., Risnes R., Petroleum related rock mechanics, revised edition Elsevier, Amsterdam, 2004.

[3] Bonelli S., Brivois O., Borghi R., Benahmed N. On the modelling of piping erosion, Comptes Rendus de Mécanique 8–9 (334) (2006) 555–559.

[4] 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.

[5] Biot, M. A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. J. Appl. Phys. 26(2) 182-185, 1955.

[6] Kissi Benaissa, Parron Vera Miguel Angel, Rubio Cintas Maria Dolores, Dubujet Philippe, Khamlichi Abdellatif, Bezzazi Mohammed, El Bakkali Larbi. Predicting initial erosion during the Hole Erosion Test by using turbulent flow CFD Simulation. Applied Mathematical Modelling. 36 (2012) 3359–3370