

Modélisation numérique d'une interface solide/fluide avec érosion

**BENAISSA KISSI¹, LARBI EL BAKKALI², MIGUEL ANGEL PARRON³,
YAHYA RIYAD⁴, CHAFIK GUEMIMI¹, A.ELGHOULBZOURI⁵**

1. Université Hassan II, ENSAM Casablanca, Maroc

Equipe de modélisation et simulation des structures en Génie Civil (M2SGC)

2. Université Abdelmlek Essaadi Tetouan, Maroc

3. Université de Cadix, Espagne

4. Université Chouaib Doukkali, FS El-jadida, Maroc

5. Université Mohammed Premier, Maroc

Résumé :

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. Nous avons exploré lors de ce travail la modélisation des phénomènes d'érosion en se basant sur l'essai d'érosion de tube (HET). Ce travail rentre dans le cadre des études de recherches sur les phénomènes d'érosion de sol. Il concerne une étude numérique sur la modélisation diphasique d'une interface solide/fluide avec érosion, appliquée à l'érosion interne. Pour ce faire des simulations numériques sur le code de calcul Fluent ont été effectuées. Une étude de caractérisation de l'érosion interne du sol pendant l'essai d'érosion de tube (HET) a été faite. La première partie de ce travail concerne l'étude de l'effet de la concentration de l'argile contenue dans le mélange (eau+argile) sur le développement de l'érosion pendant l'essai d'érosion de tube (HET). Dans la deuxième partie de ce travail nous avons caractérisé l'érosion du tube en tenant compte de l'effet de la rugosité de la paroi d'interface sur le développement d'érosion. L'étude de l'effet de la concentration d'argile et de la rugosité de la paroi a montré que leurs variations ont un effet considérable sur la contrainte de cisaillement sur la paroi et donc d'affecter en grande partie la surface, l'érosion qui se développe à l'interface fluide / échantillon de sol. Les résultats trouvés ont été comparés avec des résultats expérimentaux effectués par plusieurs auteurs afin de valider notre modèle.

Mots clefs : Erosion de surface, essai d'érosion de tube, concentration d'argile, rugosité de paroi, lois de paroi, turbulence.

Abstract:

The erosion of a soil is a complex phenomenon representing a major source of problems when considering the safety of dikes and dams. We explored in this work the modeling of erosion based on the erosion test tube (HET).

This work returns within the framework of the studies of research on the phenomena of erosion of ground. It represents a numerical study on the modelling of a solid/fluid interface with erosion, application of internal erosion, by CFD simulation en Fluent. The objective is to characterize the internal erosion of ground during the test of erosion of tube (HET). The first goal of this work is to study the effect of the concentration of the clay contained in the mixture (water+clay) on the development of erosion during the test of erosion of tube (HET). The second goal of this work is to characterize the erosion of tube by taking account the effect of the surface roughness of interface on the development of erosion. The found results were compared with experimental results carried out by several authors in order to validate our model.

Predicting erosion rate at the start of piping formation can be done by the proposed model. Flow features are however very complex in the real HET configuration. In particular, clay concentration does not vary equally along the hole length. The erosion law coefficients are variable. Transport phenomenon of some soils particles that detach is present in the problem. Further investigations including these aspects should be performed in order to render more profoundly the complex physics involved in this experiment.

Mots clefs : CFD, Turbulence, Near, Erosion, Hole Erosion Test, Piping, Erosion, Turbulence, Wall roughness, Clay concentration.

1 Introduction

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. De nombreux cas de ruptures de barrages à travers le monde ont été rapportés dans la littérature [Foster MA and al 2000].

On peut définir aussi l'érosion de sol comme une dégradation progressive du sol qui est induite 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, [Wan C.F., Fell R 2004a], [Wan C.F., Fell R 2004b] et [Bonelli S and al 2006]. L'érosion est associée au détachement des particules fines par l'effet des forces engendrées par l'écoulement du fluide. On distingue deux types d'érosion : l'érosion interne et l'érosion externe.

L'érosion externe : est engendrée par des circulations d'eau, même peu importantes, sur la crête des ouvrages. Ceci arrive lorsque la transparence de l'ouvrage est insuffisante pour évacuer l'eau de l'inondation, provoquant alors une surverse. Lors de la surverse au-dessus de la couche de la chaussée, l'eau coule jusqu'au talus aval où l'écoulement devient torrentiel et possède un grand pouvoir érosif. Les vitesses d'écoulement sont supérieures aux limites d'arrachement. Le mécanisme d'érosion s'amorce à partir du bord aval de la crête et progresse jusqu'à ce qu'une brèche soit ouverte. Le phénomène peut durer quelques minutes à quelques heures selon la taille des matériaux, leur cohésion, le revêtement de la crête, la hauteur de l'eau qui s'écoule au-dessus de l'ouvrage. L'endommagement du pied de talus ou raidissement de la pente du talus aval, conduit donc à la destruction partielle ou totale du remblai (formation d'une brèche).

L'érosion interne : correspond à l'entraînement des matériaux au sein du corps de l'ouvrage ou de sa fondation. Le conduit de fuite s'agrandit par érosion jusqu'à provoquer l'effondrement de la structure.

L'érosion des sols ne se développe que si deux conditions sont réunies : l'arrachement des particules et leur transport. Quelques mécanismes de rupture particuliers sont liés aux hétérogénéités du remblai ou à la présence de défauts ; ils ne constituent pas des typologies simples mais plutôt combinées.

2 Modélisation axisymétrique

Considérons le trou percé dans l'échantillon de la cellule d'essai. Il peut être modélisé par un cylindre creux de rayon R et de longueur L , soumis à une différence de pression ΔP dans lequel l'eau s'écoule en exerçant une contrainte tangentielle sur les bords (figure 1).

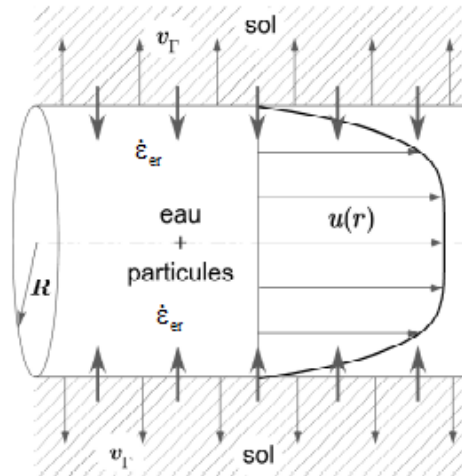


Fig 1. Ecoulement axisymétrique avec érosion et transport des particules

Pour le cas particulier d'un problème axisymétrique, les équations incompressibles de Navier Stokes s'écrivent :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ru^2)}{\partial r} + \frac{\partial(uv)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \rho \overline{(u')^2} \right) \right] + \mu \frac{u}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \rho \overline{u'v'} \right) \right]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ruv)}{\partial r} + \frac{\partial(v^2)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \rho \overline{(v')^2} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\mu \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \rho \overline{u'v'} \right) \right]$$

Où t est le temps, ρ est la densité de fluide, u la vitesse moyenne dans la direction radiale r , v la vitesse moyenne dans la direction axiale z , p la pression, μ la viscosité dynamique, u' la composante fluctuante de la vitesse radiale, v' la composante fluctuante de la vitesse axiale.

Les équations de mouvement contenant les contraintes de Reynolds qui résultent du processus de calcul de la moyenne ; leur détermination peut être exprimée en fonction de l'hypothèse de Boussinesq en termes de gradients de vitesse moyenne comme :

$$-\overline{u'^2} = \mu_t \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{3} \left[k + \mu_t \frac{1}{r} \left(\frac{\partial(ur)}{\partial r} \right) + \mu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right]$$

$$-\overline{u'v'} = \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right)$$

$$-\overline{v'^2} = \mu_t \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{2}{3} \left[k + \mu_t \frac{1}{r} \frac{\partial(ur)}{\partial r} + \mu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right]$$

Avec l'énergie cinétique turbulente $k = ((u')^2 + (v')^2 + 2u'v')/2$ et la viscosité dynamique effective μ_t donnée par $\mu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$, où C_μ est une constante. Le modèle RNG $k - \varepsilon$ diffère du modèle standard par la forme particulière des équations de transport qui contiennent le terme supplémentaire R_ε . Ces équations s'écrivent :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rku)}{\partial r} + \frac{\partial(kv)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha \mu_t r \frac{\partial k}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \mu_t \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \alpha \mu_t \frac{k}{r^2} + \mu_t S^2 - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\varepsilon u)}{\partial r} + \frac{\partial(\varepsilon v)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha \mu_t r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \mu_t \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \alpha \mu_t \frac{k}{r^2} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\rho k} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{\rho k} - \frac{1}{\rho} R_\varepsilon$$

Où α est le nombre de Prandtl efficace inverse pour tous les deux k et ε , $C_{1\varepsilon}$ et $C_{2\varepsilon}$ sont constants.

Le terme $R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho S^3 k^2 \varepsilon (\eta_0 \varepsilon - S \kappa)}{\eta_0 (\varepsilon^3 + \beta S^3 k^3)}$, ou η_0 et β sont constants, et

$$S = \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2}$$

Les constantes du modèle de RNG $k - \varepsilon$ sont des valeurs dérivées analytiquement par la théorie de RNG. Ils sont données par : $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $C_\mu = 0.0845$, $\eta_0 = 4.38$ et $\beta = 0.012$

Le terme $\mu_t S^2$ représente la génération de l'énergie cinétique de turbulence due aux gradients moyens de vitesse qui est calculée d'une manière compatible avec l'hypothèse de Boussinesq.

La viscosité effective pour de haut nombre de Reynolds est calculée par l'utilisation de $C_\mu = 0.0845$, tandis qu'il y a une option disponible dans la théorie de RNG qui laisse inclure des effets de bas nombre de Reynolds. Dans ce cas la viscosité efficace est calculée en utilisant la relation

$$\text{différentielle } d(k / \sqrt{\varepsilon}) = \frac{1.72 \mu^2}{\rho^{3/2}} \frac{\mu_t}{\sqrt{\mu_t^3 + (C_v - 1) \mu^3}} d\mu_t,$$

Où $C_v = 100$ [Fluent 6.2 Users Guide.Fluent Inc.2005]. L'inverse nombre effectif de Prandtl α est calculé selon la formule suivante obtenue analytiquement par la théorie RNG: $|\alpha - 1.3929|^{0.6321} |\alpha + 2.3929|^{0.3679} = 0.8684 \mu / \mu_t$. [Fluent 6.2 Users Guide.Fluent Inc.2005].

Dans le cas d'un nombre de Reynolds élevé $\mu = \mu_t$, $\alpha = 1.393$.

Pour plus de détails, une description complète de la théorie RNG et son application à la modélisation de la turbulence peut être trouvée dans [D.Choudhury 1993], [S.B.Pope 2000 et Fluent User's Guide [Fluent 6.2 Users Guide.Fluent Inc. 2005].

3 Résultat et Discussions

La modélisation sous Fluent a été effectuée en utilisant la densité de l'eau et la viscosité dynamique à la température 20°C pour lequel $\rho = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$ et $\eta = \rho \mu = 0.001 \text{ Pa.s}$. Considérant le mélange « eau-argile » les valeurs expérimentales de la densité et la viscosité dynamique à 20 ° C sont données dans le tableau 1 en fonction de la concentration en masse d'argile.

Concentration d'argile %	Densité du mélange (kg / m^3)	Viscosité du mélange ($Pa.s$)
0	1000	0.001
1.8	1005	0.00177
2.6	1011	0.00189
3.85	1020	0.00194

Tableau 1: la densité et la viscosité homogénéisées pour les mélanges eau-argile en fonction de la concentration d'argile

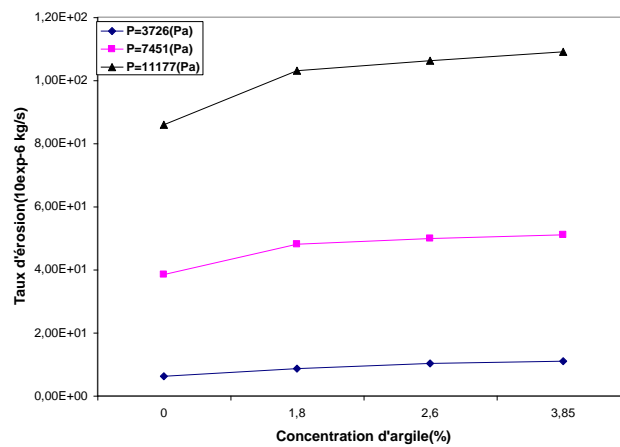


Fig.2 : Taux d'érosion en $10^{-6} \text{ kg} / \text{s}$ en fonction de la concentration d'argile pour les trois gradients de pressions.

La figure 2 donne le Taux d'érosion en $10^{-6} \text{ kg} / \text{s}$ en fonction de la concentration d'argile pour le cas des trois gradients de pression.

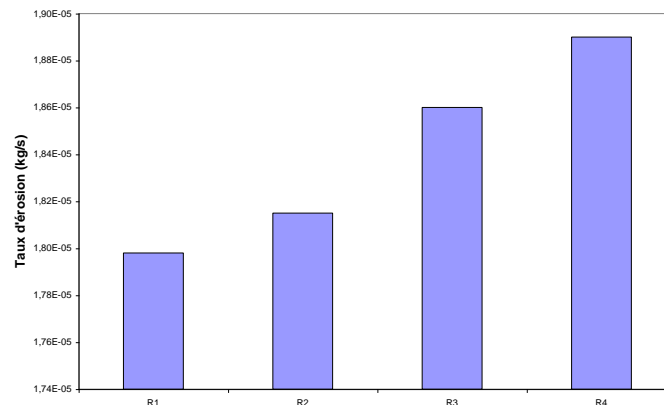


Fig.3 : Taux d'érosion en fonction de la rugosité pour la pression P2 (11000 Pa) et la concentration C1.

La figure 3 donne le Taux d'érosion en fonction de la rugosité de la paroi pour le cas de la pression P2.

Les résultats obtenus indiquent clairement que le caractère bidimensionnel de l'écoulement a lieu à l'intérieur du trou et montrent de fortes variations en comparaison avec les approches unidimensionnelles. Prédire l'érosion dans sa phase initiale peut être fait sous l'hypothèse que la paroi est rigide et que la loi linéaire d'érosion est valide. La concentration d'argile et la rugosité de la paroi d'interface ont un effet important sur le taux d'érosion.

4 Conclusion

Contrairement aux anciens modèles qui sont essentiellement unidimensionnel, la modélisation en deux dimensions a montré que la contrainte de cisaillement sur la paroi n'est pas uniforme le long de la paroi du trou. Il était donc possible grâce à l'aide d'une loi linéaire d'érosion de prédire l'érosion non uniforme le long de la longueur du trou. L'étude de l'effet de la concentration d'argile et la rugosité de paroi d'interface ont montré qu'ils n'ont pas un effet négligeable sur le cisaillement sur la paroi et donc aurait une incidence sur l'érosion de surface qui se développe à l'interface fluide/ échantillon de sol, en particulier à l'extrémité de sortie du trou où il est maximal. Cela a permis de comprendre pourquoi qualitativement le profil de l'érosion de la paroi du trou observé au cours de l'expérience n'est pas uniforme.

Références

- [1] Bonelli S., Benahmed N., Brivois O. (2006), "On the modelling of piping erosion"; C.R. Mécanique, 22: 225-244.
- [2] Bonelli, S. et Brivois, O. (2007), "The scaling law of the hole erosion test with constant pressure drop"; International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics, 32:1573_1595.
- [3] Bonelli, S., and O. Brivois, (2008), "The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop"; International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 32: 1573-1595. DOI: 10.1002/nag.683
- [4] Choudhury, D.(1993), "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling"; Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107.
- [5] Foster, M.A., R. Fell and M. Spannagle. (2000), "The statistics of embankment dam failures and accidents"; Canadian geotechnical Journal 37(5): 1000-1024. DOI:10.1139/cgj-37-5-1000.
- [6] Fluent 6.2 Users Guide. Fluent Inc., (2005),
- [7] S. B. Pope. (2000), "Turbulent Flows"; Cambridge University Press, Cambridge, England.
- [8] Wan, C.F. and R. Fell. (2004). "Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams"; Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 30(4): 373-380. DOI: [10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:4\(373\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:4(373)).