

## Modélisation numérique d'une interface solide/fluide avec érosion

B.KISSI<sup>1</sup>, A.ELGHOULBZOURI<sup>2</sup>, L.ELBAKKALI<sup>3</sup>, M.ANGEL PARRON<sup>4</sup>, M.DOLORES CINTAS<sup>4</sup>, Y.RIYAD<sup>5</sup> C.GUEMIMI<sup>1</sup>

1. Université Hassan II, ENSAM Casablanca, Maroc  
Equipe de modélisation et simulation des structures en Génie Civil (M2SGC)
2. Université Mohammed Premier, Maroc
3. Université Abdelmlek Essaadi Tetouan, Maroc
4. Université de Cadix, Espagne
5. Université Chouaib Doukkali, FS El-jadida, 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. 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).

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.

### 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  $\Delta P$  dans lequel l'eau s'écoule en exerçant une contrainte tangentielle sur les bords (figure 1).

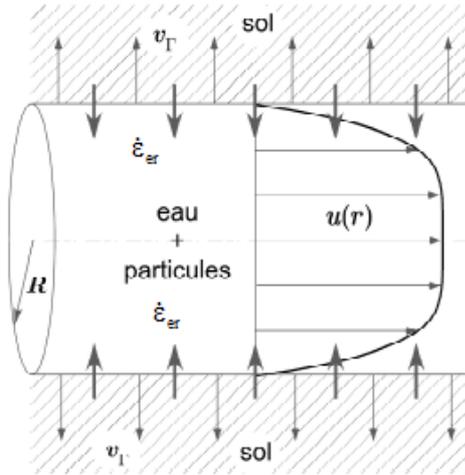


Fig 1. Ecoulement axisymétrique avec érosion et transport des particules

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

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

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

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

Où  $t$  est le temps,  $\rho$  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,  $\mu$  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  $k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + 2\overline{u'v'})$  et la viscosité dynamique

effective  $\mu_t$  donnée par  $\mu_t = C_\mu k^2 / \epsilon$ , où  $C_\mu$  est une constante. Le modèle RNG  $k-\epsilon$  diffère du modèle standard par la forme particulière des équations de transport qui contiennent le terme supplémentaire  $R_\epsilon$ .

Ces équations s'écrivent :

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

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

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

Le terme  $R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho S^3 k^2 \epsilon (\eta_0 \epsilon - S k)}{\eta_0 (\epsilon^3 + \beta S^3 k^3)}$ , où  $\eta_0$  et  $\beta$  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  $k-\epsilon$  sont des valeurs dérivées analytiquement par la théorie de RNG. Ils sont données par :  $C_{1\epsilon} = 1.42$ ,  $C_{2\epsilon} = 1.68$ ,  $C_\mu = 0.0845$ ,  $\eta_0 = 4.38$  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

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

Où  $C_v = 100$  [Fluent 6.2 Users Guide. Fluent Inc. 2005].

L'inverse nombre effectif de Prandtl  $\alpha$  est calculé selon la formule suivante obtenue analytiquement par la théorie

$$\text{RNG: } |\alpha - 1.3929|^{0.6321} |\alpha + 2.3929|^{0.3679} = 0.8684 \mu / \mu_t. \quad [\text{Fluent 6.2 Users Guide. Fluent Inc. 2005}].$$

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  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  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

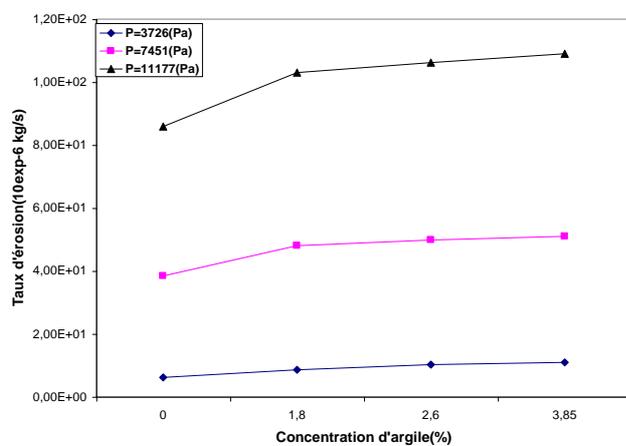


Fig.2: Taux d'érosion en  $10^{-6} kg/s$  en fonction de la concentration d'argile pour les trois gradients de pressions.

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

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. Le gradient de pression et la concentration d'argile ont un effet important sur le taux d'érosion. Cela permet en faisant valoir que les caractéristiques des flux sont complexes dans la configuration HET réel, puisque la concentration d'argile ne varie pas même le long de la longueur du trou et augmente dans le sens de l'écoulement d'une valeur maximale à l'extrémité de sortie

#### 4. Conclusion

Une modélisation bidimensionnelle de l'essai d'érosion de tube a été effectuée au moyen de logiciel amélioré CFD (Fluent). La paroi du trou avait été supposée être

rigide et avoir une géométrie cylindrique circulaire. 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 a montré qu'il n'a 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. Il serait intéressant d'examiner comment la déformation du tube peut affecter l'écoulement du fluide qu'il contient en développant un modèle numérique qui rend compte du couplage de manière plus complète dans l'étude suivante.

#### Références

- [1] Bonelli S., Benahmed N., Brivois O. 1-3 November (2006),
- [2] Bonelli, S. et Brivois, O. (2007),
- [3] Bonelli, S., and O. Brivois, (2008),
- [4] Choudhury, D.(1993),
- [5] Foster, M.A., R. Fell and M. Spannagle. (2000),
- [6] Fluent 6.2 Users Guide. Fluent Inc., (2005),
- [7] S. B. Pope. (2000),
- [8] Wan, C.F. and R. Fell. (2004) ,