HAL
open science

Impact de l'érosion interne sur la stabilité d'une digue : approche innovante par modélisation multiphysique de l'aléa

Farid Laouafa, Jie Yang, Zhen-Yu Yin, Pierre-Yves Hicher

To cite this version:

Farid Laouafa, Jie Yang, Zhen-Yu Yin, Pierre-Yves Hicher. Impact de l'érosion interne sur la stabilité d'une digue : approche innovante par modélisation multiphysique de l'aléa. Rapport Scientifique INERIS, 2018, 2017-2018, pp.46-47. ineris-02044870

HAL Id: ineris-02044870

https://ineris.hal.science/ineris-02044870

Submitted on 21 Feb 2019

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.

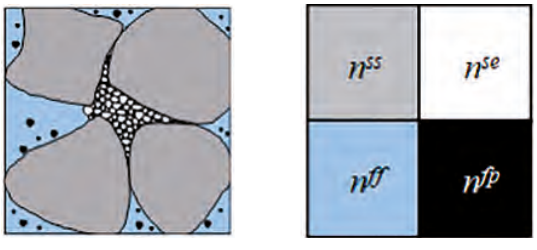
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Impact de l'érosion interne sur la stabilité d'une digue : approche innovante par modélisation multiphysique de l'aléa

Contributeurs
Farid LAOUAFA
Jie YANG
/
Collaborateurs
Prof. Zhen-Yu YIN
et
Prof. Pierre-Yves HICHER
(Ecole centrale de Nantes)

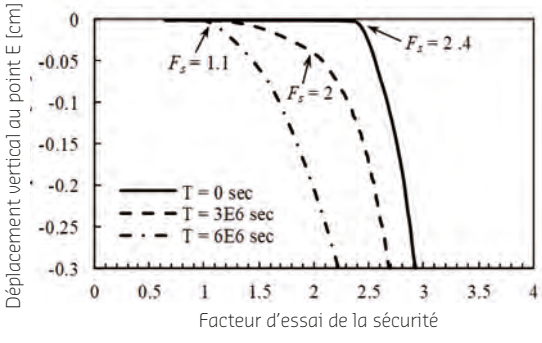
L'érosion interne est un processus hydrodynamique responsable de l'arrachement de particules et de leur transport dans les ouvrages hydrauliques tels que les barrages, les digues et leur fondation. Les ruptures par érosion interne et par renard hydraulique représentent un peu plus de la moitié des ruptures des ouvrages hydrauliques. Elles peuvent toucher aussi bien la fondation que le remblai, y compris le noyau étanche. Ce phénomène a fait l'objet par le passé de nombreux essais de laboratoire et de modélisations numériques. Cependant, la plupart des modèles numériques mis en œuvre sont trop simplifiés d'un point de vue du comportement mécanique des sols et des ouvrages car ils sont fondés sur l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire du sol et ne prennent pas en compte un comportement réel plus réaliste qui peut être mieux approximé en élastoplasticité. De ce fait, les travaux menés ont conduit à développer et mettre en œuvre un modèle hydromécanique couplé pour l'érosion interne en assimilant le sol à un milieu poreux continu. Dans cette approche, le squelette du sol saturé par un fluide (eau) est traité comme la superposition de quatre constituants (Figure 1) qui interagissent. L'érosion interne du squelette du sol et le transport des fines (particules de petite taille, érodables et transportables par l'eau interstitielle) sont modélisés par un transfert de masse entre les phases solide et fluide. La relation contrainte-déformation (i.e. le modèle de comportement de la matrice de sol) pour le squelette solide est calculée à l'aide d'un modèle constitutif basé sur l'état critique qui peut prendre en compte la dégradation progressive des propriétés mécaniques du sol induite par l'érosion interne. Les développements théoriques et numériques ont été implémentés dans un code de modélisation numérique par éléments finis. On dispose ainsi d'un outil intéressant qui permet *in fine* d'évaluer l'influence de l'érosion interne sur la stabilité d'un ouvrage hydraulique en calculant le facteur de sécurité compte tenu de la réduction de la résistance des matériaux (Figure 2).

Figure 1 / Distribution spatiale des particules et conceptualisation à quatre constituants représentés dans le modèle.



Echelle micro — 4 constituants

Figure 2 / Déplacement vertical pour différentes périodes d'érosion T et différents facteurs de sécurité Fs.



Effet du couplage hydromécanique

Dans le modèle développé, l'effet de couplage hydromécanique est divisé en deux parties :

1- l'érosion interne qui entraîne une évolution de la porosité du matériau et conduit, de ce fait, au changement de sa perméabilité. En conséquence, la pression interstitielle et les contraintes effectives sont redistribuées au sein de différents matériaux ;

2- la perte de particules fines due à l'écoulement d'infiltration, phénomène qui affecte le comportement mécanique du sol par une modification de la porosité (l'indice des vides).

Exemple de simulation de l'impact d'une érosion interne sur une digue

Pour illustrer le modèle développé, la stabilité de la pente de la digue de Val d'Orléans a été analysée (Figure 3). Dans cet exemple, le phénomène d'effondrement karstique (formation de cavités par dissolution de la roche) sous

la fondation a conduit à une cavité à travers laquelle l'eau souterraine s'écoule. L'érosion est activée du fait de gradients hydrauliques locaux au voisinage de la cavité. La modélisation vise à évaluer l'impact de l'érosion interne sur la stabilité de la pente de la digue. La géométrie et les dimensions du cas d'exemple étudié sont représentées schématiquement sur la Figure 3 selon la coupe transversale typique de la digue. Le niveau de l'eau se situe au sommet des alluvions et est complètement saturé, alors que la digue est supposée entièrement sèche. Le problème est analysé en deux dimensions (hypothèse de condition de déformations planes). Les propriétés physiques des matériaux sont issues de données *in situ*.

La Figure 2 montre la diminution de la réserve de stabilité de la digue en fonction du temps.

La Figure 4 montre un exemple d'évolution temporelle et spatiale de la porosité induite par l'érosion interne.

Conclusion

Un modèle numérique représentatif du phénomène d'érosion interne des sols a été développé et mis en œuvre. Les équations différentielles régissant le problème physique ont été formulées sur la base du bilan massique des quatre constituants puis implémentées dans un code de calculs par éléments finis. L'érosion interne du squelette du sol et le transport des particules fines dans le fluide ont été modélisés par le transfert de masse entre le squelette solide et l'eau interstitielle. Un modèle de comportement élastoplastique basé sur l'état critique des sols a été utilisé pour prendre en compte l'effet de couplage hydromécanique induit par l'érosion interne. Au travers l'exemple d'une digue, les possibilités du modèle pour simuler l'évolution de l'érosion interne avec le temps ont pu être illustrées. En particulier, cet exemple a montré comment les effets de l'érosion interne pouvaient conduire à une augmentation de la porosité du sol et à la dégradation des propriétés mécaniques des fondations de digues dans le temps et dans l'espace. La méthode de réduction de la résistance au cisaillement a été adoptée pour évaluer la stabilité de la pente de la digue. Les résultats montrent une réduction du facteur de sécurité sous l'effet de l'érosion interne, augmentant le risque d'instabilité mécanique de la digue. Ces travaux peuvent être étendus à la prévention des risques liés aux ouvrages linéaires du type canalisations enfouies transportant un fluide (gaz, liquide) et présentant des fuites.

ABSTRACT /

A numerical model has been developed for internal erosion. It is based on the approach of continuous porous media. The soil skeleton saturated by a pore fluid (water) is treated as the superposition of four constituents in interaction: solid skeleton, erodible fines, fluidized particles and fluid. The detachment and transport or advection of fine particles are modeled by the mass exchange between solid and fluid phases. In order to take into account the influence of the change in void ratio induced by internal erosion on the soil skeleton, a critical state based constitutive model is used to calculate the effective stress-strain response of the soil skeleton. This coupled hydro-mechanical analysis is applied to study the impact of erosion on a dyke. The numerical simulations show the progressive development of internal erosion within the foundation of the dyke. The effect of the mechanical degradation due to internal erosion is demonstrated by evaluating the factor of safety of the dyke slope by means of the shear strength reduction method.

Figure 3 / Modèle géométrique de la digue.

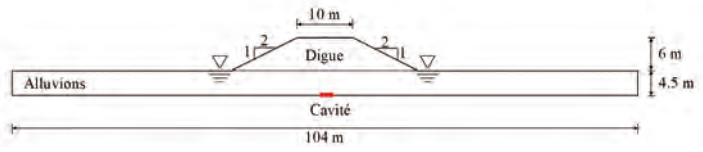
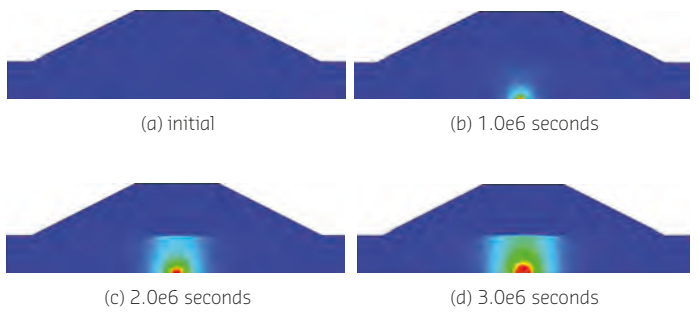


Figure 4 / Distribution spatiale de la porosité à différents instants 10, 20 et 30 jours environ (1.e6 = 10^6 secondes soit environ 10 jours).



Références

Yang J. ; Yin Z-Y. ; Laouafa F. ; Hicher P.-Y. Internal erosion in dike-on-foundation modeled by a coupled hydro-mechanical approach. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* (à paraître)

Yang J. ; Yin Z-Y ; Hicher P-Y. ; Laouafa F. A Finite Element Modeling of the Impact of Internal Erosion on the Stability of a Dike. Poromechanics VI2017. p. 354-361.

Yang J. ; Yin Z-Y. ; Hicher P-Y. ; Laouafa F. How Spatial Variability of Initial Porosity and Fines Content Affects Internal Erosion in Soils. Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering: Springer, 2018. p. 439-443.