



HAL
open science

Modélisation simplifiée de l'essai d'érosion de tube

Abdellatif Khamlichi, Mohamed Bezzazi, Larbi El Bakkali, Miguel Parron Vera,
Maria Dolores Rubio Cintas

► **To cite this version:**

Abdellatif Khamlichi, Mohamed Bezzazi, Larbi El Bakkali, Miguel Parron Vera, Maria Dolores Rubio Cintas. Modélisation simplifiée de l'essai d'érosion de tube. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. <hal-03390741>

HAL Id: hal-03390741

<https://hal.science/hal-03390741v1>

Submitted on 21 Oct 2021

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.



HAL Authorization

MODELISATION SIMPLIFIEE DE L'ESSAI STANDARD D'EROSION DE TUBE

A. KHAMLICI^a, L. EL BAKKALI^a, M. BEZZAZI^a, PH. DUBUJET^b, H. WONG^c
M. PARRON VERA^d, M.D. RUBIO CINTAS^d, C.L. OLEGARIO^d

a. Université Abdelmalek Essaâdi, UAE, Martil, Maroc

b. Ecole Nationale des Ingénieurs de Saint-Etienne, ENISE, Av. Jean Parot, Saint-Etienne, France

c. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, ENTPE, Av. Maurice Audin, Vaulx-en-Velin, France

d. Ecole Polytechnique Supérieure d'Algéciras, EPSA, Ave. Ramon Pujol, Algéciras, Espagne

Résumé :

L'essai d'érosion de tube a été développé pour caractériser le phénomène d'érosion de surface qui se produit dans les fissures se développant dans les ouvrages hydrauliques tels que les barrages et les digues. L'essai permet de décrire expérimentalement les caractéristiques érosives du sol au moyen d'un indice appelé vitesse d'érosion et d'une contrainte critique qui caractérise l'amorce du phénomène. Dans ce travail, on propose une modélisation analytique simplifiée de cet essai. La loi d'évolution décrivant le phénomène d'érosion est ainsi dégagée selon le régime d'écoulement. Elle montre que le phénomène d'érosion qui se produit dans le tube est gouverné par une dynamique de premier ordre où deux paramètres seulement interviennent: le temps caractéristique du phénomène lié à la vitesse d'érosion et le seuil à partir duquel le phénomène s'amorce.

Abstract :

The Hole Erosion Test was developed to characterize surface erosion phenomenon which occurs in cracks and piping that appear in hydraulic infrastructures such as dams and levees. This test enables determining experimentally the main erosive properties of soils by means of an index called erosion rate and a critical stress which indicates the threshold of beginning of surface erosion. In this work, a simplified analytical modelling of this test is introduced. The evolutionary law describing erosion taking place inside the tube is obtained according to the flow regime. It shows that the Hole Erosion Test is governed by a first order dynamics having only two parameters: the characteristic time which is linked to the erosion rate and the stress threshold indicating the beginning of erosion.

Mots clefs : Erosion de surface, Barrage, Digue, Renard hydraulique, Erosion de tube

1 Introduction

L'érosion interne et le renard hydraulique constituent les causes principales de rupture des barrages, [1]. Dans le but de caractériser la résistance du sol à ces phénomènes, plusieurs protocoles d'essais expérimentaux ont été développés, [2]. Parmi ceux-ci, on trouve un essai introduit récemment par Wan et al. [2] et qui consiste à pratiquer le test d'érosion dans un tube perforé initialement dans l'échantillon de sol. Cet essai s'est révélé capable de caractériser la résistance du sol vis-à-vis de l'érosion de surface se produisant dans les fissures intra rocheux ou bien dans les cavités du renard hydraulique. Il permet de déterminer la vitesse d'érosion et une contrainte critique qui caractérise le seuil de la vitesse d'écoulement à partir de laquelle le phénomène s'amorce. Une échelle allant de 1 à 6 a été introduite afin de classer la résistance à l'érosion d'un sol donné contenant une fissure siège d'un écoulement fluide. Seok [3] a utilisé cet essai afin de caractériser le phénomène d'érosion en fonction du degré de saturation des sols argileux qu'ils a étudiés. Bonelli et al. [4], [5] ont présenté une modélisation mathématique de cet essai. Dans le présent travail, on propose de simplifier la modélisation précédente en introduisant des hypothèses nouvelles concernant la nature du régime d'écoulement et l'expression explicite du coefficient de frottement du fluide sur la paroi interne du tube. Ceci permet de considérer les différents régimes d'écoulement dans le tube et de traduire

l'effet du nombre de Reynolds sur la forme de la loi d'évolution du rayon interne du tube.

Le phénomène d'érosion de surface se produisant dans le tube sera ainsi assimilé à un problème essentiellement monodimensionnel. La paroi interne du tube sera supposée parfaitement étanche de sorte qu'il n'y a aucun débit qui la traverse. Le départ de la matière produite par l'érosion sur la paroi interne sera supposé uniforme sur toute la longueur du tube. La vitesse moyenne de l'écoulement est également supposée uniforme sur toute la longueur du tube. On admet aussi que la densité du fluide, la viscosité cinématique, le coefficient de perte de charge de l'écoulement sur la paroi interne sont uniformes. Le gradient hydraulique est donc uniforme et constant si la charge hydraulique associée à la différence de pression entre l'amont et l'aval du tube est maintenue constante.

Nous montrons que la loi d'évolution du rayon interne est obtenue comme étant la solution d'une équation différentielle ordinaire de premier ordre à coefficients constants. Deux constantes phénoménologiques caractérisent alors le phénomène d'érosion de surface au sein du tube et ce quelque soit le régime d'écoulement considéré. Il s'agit du temps caractéristique de réponse qui est lié au coefficient d'érosion et au gradient de pression imposé et d'un deuxième paramètre seuil qui fixe les conditions minimales favorisant l'occurrence du phénomène d'érosion de surface au sein du tube. Ce dernier dépend du rayon initial du tube, de la résistance du sol à l'érosion et du gradient de pression imposé.

2 Description du montage expérimental utilisé dans l'essai standard d'érosion de tube

L'essai standard d'érosion de tube appelé en anglais *Hole Erosion Test* (HET) consiste à introduire à l'intérieur d'un moule normalisé l'échantillon cylindrique du sol dont on veut déterminer les paramètres qui caractérisent le phénomène d'érosion de surface. La longueur de l'échantillon est $L = 117$ mm. Un trou de 6 mm de diamètre est perforé le long de l'axe de symétrie longitudinal de l'échantillon. Une charge hydraulique, maintenue constante, est appliquée entre les deux extrémités de l'échantillon. Selon la nature du sol composant l'échantillon examiné, la hauteur piézométrique amont est fixée à un niveau qui dépasse celle régnant en aval de 50 à 1200 mm. La figure 1 présente le schéma de principe du montage expérimental utilisé pour effectuer l'essai d'érosion de tube.

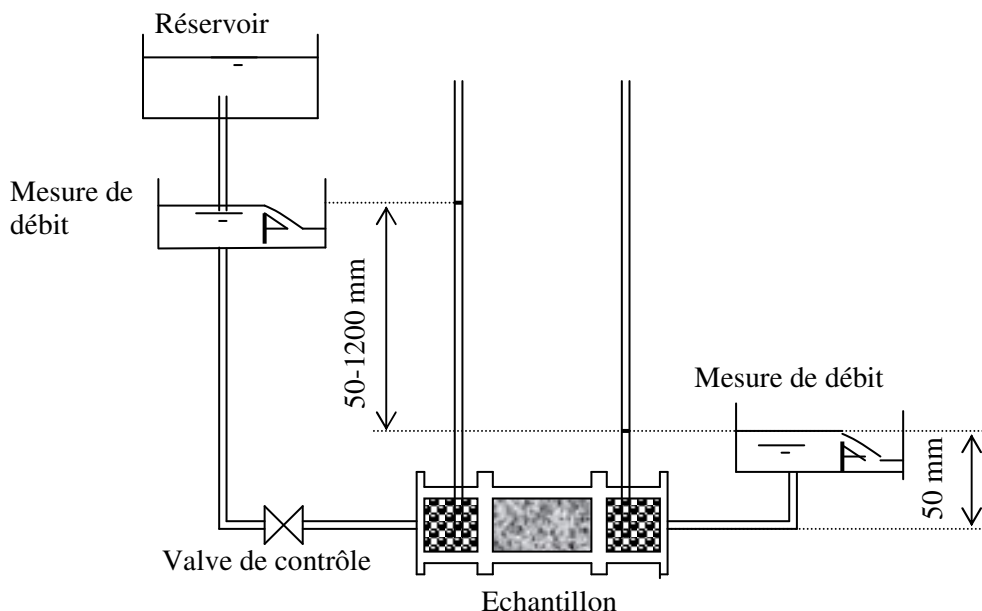


FIG. 1 - Schéma du dispositif expérimental utilisé dans l'essai d'érosion de tube

La figure 2 présente les faces avant et arrière de l'échantillon introduit dans le moule d'essai juste avant son

montage.



FIG. 2 - Faces avant et arrière de l'échantillon avant essai

3 Modélisation simplifiée de l'essai d'érosion de tube

Le phénomène d'érosion de surface qui se produit sur la paroi du tube est considéré dans la suite comme étant purement monodimensionnel. On supposera que la paroi interne du tube est parfaitement étanche. On supposera de plus les grandeurs suivantes uniformes sur toute la longueur du tube, notée L :

- le départ de la matière produite par l'érosion au niveau de la paroi du tube ;
- la vitesse moyenne de l'écoulement ;
- la densité du fluide ρ_w ;
- la viscosité cinématique ν ;
- le coefficient de perte de charge de l'écoulement sur la paroi interne du tube f_L

Les pressions en amont et en aval du tube sont supposées garder durant l'essai des valeurs constantes de sorte que le gradient hydraulique qui en résulte reste constant lors de l'essai.

Ces hypothèses permettent de montrer que toutes les grandeurs qui caractérisent l'érosion de surface sont uniformes le long du tube de sorte que seule la variable temporelle intervient effectivement dans le problème.

Signalons que ces hypothèses constituent des approximations au problème réel. On peut souligner en particulier l'hypothèse qui admet que le départ des particules érosives et leur présence au sein de l'écoulement ne modifie ni le régime d'écoulement, ni les propriétés de l'écoulement, c'est-à-dire d'une part la densité et la viscosité du fluide et d'autre part l'action provoquant l'arrachement des particules du sol par érosion: coefficient d'érosion et seuil d'érosion.

Les équations qui gouvernent le problème sont alors obtenues à partir :

- des équations d'équilibre;
- de l'expression de la perte de charge hydraulique en terme du coefficient de frottement de l'écoulement sur la paroi interne du tube qui est fonction du régime d'écoulement (nombre de Reynolds);
- de la loi d'érosion de surface;
- de la définition de la vitesse d'érosion;
- de l'expression du débit volumique du fluide traversant les sections droites du tube.

La relation exprimant la perte de charge associée aux conditions d'équilibre appliquées à un volume de contrôle délimité par la paroi interne du tube et par les deux sections d'entrée et de sortie de l'écoulement fluide qui le traverse permettent d'écrire

$$\tau = \frac{\rho_w v^2}{8} f_L \quad (1)$$

où τ est la contrainte de cisaillement agissant sur la paroi du tube et v la vitesse moyenne de l'écoulement au sein du tube.

Le coefficient de friction est obtenu expérimentalement en fonction du nombre de Reynolds Re . En régime laminaire, il est donné par la loi de Darcy-Weisbach. Lorsque le régime est turbulent, la loi de Blasius permet de le prédire lorsque la paroi interne du tube est lisse. Pour une conduite rugueuse la formule de Blasius ne s'applique plus. Elle définit cependant la limite inférieure du coefficient de friction. La loi de Colebrook permet d'estimer de manière plus précise ce coefficient si l'indice de rugosité du conduit est connu. Dans la suite, on supposera que le tube est lisse et le coefficient de friction s'écrit alors selon le régime d'écoulement

$$\begin{cases} f_L = \frac{64}{Re} = \frac{32\nu}{vR} & \text{laminaire} \\ f_L = \frac{0.316}{Re^{1/4}} = 0.266 \left(\frac{\nu}{vR} \right)^{1/4} & \text{turbulent} \end{cases} \quad (2)$$

En se rappelant que le débit du fluide traversant le tube est $Q = \pi R^2 v$ et que la perte de charge est donnée

par $\Delta P = \frac{\rho_w v^2 L}{4R} f_L$, l'équation (2) entraîne

$$\begin{cases} \Delta P = \frac{8\rho_w \nu L Q}{\pi R^4} & \text{laminaire} \\ \Delta P = \frac{0.158}{2^{5/4} \pi^{7/4}} \frac{\rho_w \nu^{1/4} L}{R^{19/4}} Q^{7/4} & \text{turbulent} \end{cases} \quad (3)$$

Sachant que durant l'essai d'érosion, la perte de charge ΔP est maintenue constante, l'équation (3) permet d'exprimer le débit actuel en fonction du rayon interne du tube à l'instant t sous la forme

$$\begin{cases} \frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{R}{R_0} \right)^4 & \text{laminaire} \\ \frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{R}{R_0} \right)^{19/7} & \text{turbulent} \end{cases} \quad (4)$$

où R_0 est le rayon initial du tube et Q_0 le débit initial.

La loi d'érosion de surface est décrite classiquement, [2], par une relation de la forme

$$\dot{\epsilon}_{er} = \begin{cases} c_{er} (\tau - \tau_s) & \text{si } |\tau| > \tau_s \\ 0 & \text{si } |\tau| \leq \tau_s \end{cases} \quad (5)$$

où $\dot{\epsilon}_{er}$ est la vitesse d'érosion (en $\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$) définie par la perte de masse par unité de temps et par unité de surface, c_{er} est le paramètre de résistance à l'érosion de surface et τ_s la contrainte de cisaillement définissant le seuil à partir duquel l'érosion a lieu.

En utilisant la conservation de la masse du sol, on peut montrer aisément que

$$\dot{\epsilon}_{er} = \rho_d \frac{dR}{dt} \quad (6)$$

où ρ_d est la densité sèche de l'échantillon de sol.

En considérant le cas où l'érosion a effectivement lieu ($\dot{\epsilon}_{er} \neq 0$) et en utilisant les équations (1), (5) et (6), on peut former l'équation différentielle linéaire de premier ordre suivante permettant de décrire l'évolution temporelle du rayon interne du tube

$$\frac{dR}{dt} - \left(\frac{c_{er} \Delta P}{2\rho_d L} \right) R = -\frac{c_{er} \tau_s}{\rho_d} \quad (7)$$

La solution de l'équation (7) vérifiant la condition initiale $R(0) = R_0$ s'écrit

$$R(t) = \left(R_0 - \frac{2L\tau_s}{\Delta P} \right) \exp\left(\frac{c_{er}\Delta P}{2\rho_d L} t \right) + \frac{2L\tau_s}{\Delta P} \quad (8)$$

L'expression de R donnée par l'équation (8) n'est valable que si la condition suivante est satisfaite: $\Delta P \geq \frac{2L\tau_s}{R_0}$. Si cette condition n'est pas remplie, le rayon du tube reste constant en l'absence de toute érosion.

Il apparaît donc que la quantité $\frac{2L\tau_s}{R_0}$ définit une pression critique que le gradient hydraulique doit dépasser si l'érosion de surface devait avoir lieu. Cette limite décroît lorsque le rayon initial du tube croît ou lorsque la longueur du tube ou bien la résistance du sol à l'érosion décroissent.

Le temps caractéristique associé à l'équation (8) est $t_c = \frac{2\rho_d L}{c_{er}\Delta P}$. Cette relation montre que la vitesse d'érosion de surface croît avec le gradient hydraulique et avec le paramètre d'érosion c_{er} , de même qu'elle décroît avec la longueur du tube et avec la densité sèche de l'échantillon de sol examiné.

L'équation (7) coïncide exactement avec l'équation (10) donnée dans la référence, Bonelli et al. [5]. Mais la méthode utilisée ici pour l'obtenir diffère du travail précédent. La différence principale réside dans le fait que le régime d'écoulement est pris en compte de manière explicite selon la valeur du nombre de Reynolds de l'écoulement. Bonelli et al. [5] ont considéré un écoulement turbulent et arrivent à une expression qui exprime la loi de la vitesse en fonction du rayon sous forme d'une loi puissance d'exposant égal à 1/2. Dans notre cas l'exposant obtenu est 5/7 en régime turbulent et 2 en régime laminaire.

4 Validation du modèle

Afin de valider le modèle simplifié d'érosion proposé précédemment, on considère une partie des résultats expérimentaux établis par Wan et al. [2] sur deux sols différents. Plus précisément, on utilise les résultats des essais référencés: BDHET001 et JDHET001 afin de les comparer aux prédictions établies par le modèle analytique simplifié. Le tableau 1 rappelle les résultats expérimentaux associés à ces deux essais. Ils sont exprimés dans le système d'unités international.

On peut observer que le régime d'écoulement associé à ces deux essais est turbulent. Les simulations conduites en utilisant les équations (4) et (8) permettent de tracer les courbes de la figure 3. Les points expérimentaux sont aussi représentés sur cette figure. Comme, on peut le constater sur la figure 3, un très bon accord existe entre la simulation et les données expérimentales si l'on tient compte de toutes les incertitudes qui affectent les valeurs des paramètres et du fait que la formule utilisée pour estimer le coefficient de friction n'intègre pas la rugosité du conduit. Les valeurs identifiées du seuil d'érosion sont $\tau_s = 2.085$ Pa pour l'essai BDHET001 et $\tau_s = 1.938$ Pa pour l'essai JDHET001.

Tableau 1: Données expérimentales relatives aux essais réalisés par Wan et al. [2]

Test	Type de sol	Re	ρ_d	v_0	c_{er}	t_{er}	Q_0	ΔP
BDHET001	Argile sableuse très plastique	6610	2740	2.2	3.02×10^{-4}	223	6.22×10^{-5}	6237
JDHET001	Sable argileux	6769	2680	2.26	5.89×10^{-4}	133	6.39×10^{-5}	6064

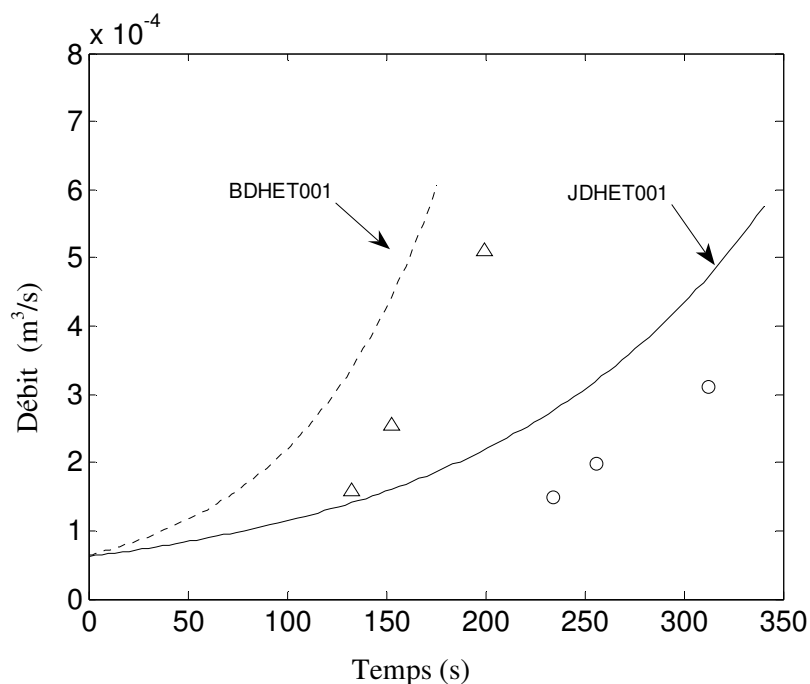


FIG. 3 - Comparaison des résultats de simulation avec l'expérience
 --- simulation BDHET001, — simulation JDHET001
 Δ test BDHET001, ○ test JDHET001

5 Conclusions

Un modèle analytique simplifié a été développé afin de simuler l'essai standard d'érosion de tube. Le modèle permet de traduire la phénoménologie du problème d'érosion de surface qui se produit sur la paroi du tube. Il permet de retrouver la même équation différentielle qui régit l'évolution du rayon intérieur du tube que celle déjà existante dans la littérature et rend compte des différents régimes d'écoulement. Il prédit cependant une évolution différente pour le débit du fluide. La comparaison avec des essais expérimentaux a permis de le valider.

Comme le tube est supposé lisse dans cette étude, il serait intéressant dans le futur d'intégrer sa rugosité afin de déterminer de manière plus rationnelle la loi du coefficient de friction en régime turbulent.

References

- [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] Wan C.F., Fell R., Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 130(4): 373-380, 2004.
- [3] Seok S.L., Experimental investigation of erosion in variably saturated clay soils. PhD thesis. School of Civil and Environmental Engineering, the University of New South Wales, 2006.
- [4] Bonelli S., Brivois O., Borghi R., Benahmed N., On the modelling of piping erosion, C.R. Mécanique, 22: 225-244, 2006.
- [5] Bonelli S., Benahmed N., Brivois O., On modelling of the hole erosion test, ICSE, 3rd International Conference on Scour and Erosion, 1-3 November 2006, Amsterdam, 2006.