



Modélisation de l'érosion par renard hydraulique : du laboratoire à l'ouvrage

Damien Lachouette, Stéphane Bonelli

► To cite this version:

Damien Lachouette, Stéphane Bonelli. Modélisation de l'érosion par renard hydraulique : du laboratoire à l'ouvrage. XXVI Rencontres Universitaires de Genie Civil, Jun 2008, Nancy, France. 8 p. hal-00305373

HAL Id: hal-00305373

<https://hal.science/hal-00305373>

Submitted on 24 Jul 2008

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.

Modélisation de l'érosion par renard hydraulique : du laboratoire à l'ouvrage

Damien Lachouette — Stéphane Bonelli

Cemagref

3275 Route de Cézanne, CS 40061

13182 Aix-en-Provence Cedex 5

France

{damien.lachouette, stephane.bonelli}@cemagref.fr

RÉSUMÉ. L'érosion interne par renard est l'une des causes de rupture des ouvrages hydrauliques. Elle est liée à la formation et au développement d'un conduit continu entre l'amont et l'aval. Un modèle simplifié est proposé pour simuler l'agrandissement du conduit par érosion dans un ouvrage hydraulique. Ce modèle est mécaniquement fondé : il est déduit des équations de Navier-Stokes et des équations de saut avec érosion sur l'interface eau/sol. Il a été initialement développé pour interpréter les essais de laboratoire au Hole Erosion Test. La comparaison avec des mesures publiées, qui ont été réalisées sur un essai de grande dimension, montre que le modèle donne également les ordres de grandeurs de l'évolution du diamètre du conduit, et du débit d'écoulement sur un ouvrage.

ABSTRACT. A phenomenon called « piping » often occurs in hydraulics works, involving the formation and the evolution of a continuous tunnel between the upstream and the downstream side. A simplified model is proposed in order to simulate the pipe enlargement in a hydraulic structure. This model is mechanically motivated: it has been inferred from the Navier-Stokes equations, and from the jump equation with erosion on the water/soil interface. This model has initially been developed in order to interpret Hole Erosion Tests. The comparison with published experimental data, obtained on a large scale test, shows that the model is also able to provide orders of magnitude for a hydraulic structure, concerning the evolution of the hole diameter, and of the flow rate.

MOTS-CLÉS : renard hydraulique, contrainte critique, ouvrages hydrauliques.

KEYWORDS: piping erosion; critical shear stress; hydraulic structures.

1. Introduction

L'érosion hydraulique est l'une des principales causes de rupture des ouvrages hydrauliques (digues, barrages, levées). L'enjeu est défini par les zones susceptibles d'être inondées en aval. Nous nous intéressons à la phase de progression d'une érosion interne à l'ouvrage par écoulement localisé dans un conduit circulaire, souvent dénommé « Renard », ou « piping ». Ce type d'érosion peut être modélisé à l'aide des modèles classiques utilisés en mécanique des fluides, en considérant qu'il s'agit d'une érosion d'interface, entre le sol et le fluide en écoulement dans le conduit, avec transport des particules érodées par le fluide. L'érosion peut être représentée par la célérité de cette interface singulière, qui est traversée par le flux de masse érodée (Brivois *et al.*, 2007). On en déduit, par intégration spatiale et par développements asymptotiques, un modèle simplifié. La vitesse d'érosion étant petite devant la vitesse de l'écoulement, on peut négliger l'influence de la présence des particules de sols dans l'écoulement, et faire l'hypothèse d'un écoulement dilué (Lachouette *et al.*, accepté). La comparaison avec les résultats expérimentaux valide la modélisation pour une sollicitation à pression constante, qui correspond à l'essai de laboratoire (Bonelli *et al.*, 2006, 2007, 2008). Concernant les ouvrages, l'état de l'art est donné par les résultats des projets CADAM (Paquier *et al.*, 1998) et IMPACT (2004) : il n'existe aucune modélisation cohérente avec les essais de laboratoire, ni de modèle 1D, 2D ou 3D. Le modèle simplifié développé pour les essais de laboratoire est ici utilisé pour simuler une situation d'ouvrage.

2. Le modèle simplifié de l'érosion de conduit

On considère un ouvrage homogène (hauteur H_{dam} , base L_{dam}) traversé par un conduit cylindrique de longueur $L(t)$ et de rayon $R(t)$ variables (Figure 1a). Le niveau d'eau amont, noté $\Delta H_w(t)$, est variable. Le modèle simplifié a été obtenu à partir des équations de conservation et des lois de comportement, via une intégration spatiale sur le cylindre (Bonelli et Brivois, 2008). Cette intégration tient compte du flux de matière érodée (eau+particules) traversant l'interface, noté $\dot{m}(t)$, et suppose que le cylindre est initialement droit, et le reste au cours de l'érosion (Figure 1b). Si l'on garde les termes instationnaires et inertiels, le système obtenu est :

$$\underbrace{\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\dot{m}}{\rho_{sol}}}_{\text{Saut de masse}}, \quad \underbrace{\frac{\partial V}{\partial x} = 0}_{\text{Conservation de la masse}}, \quad \underbrace{\rho_w \frac{R}{2} \frac{\partial V}{\partial t} + V\dot{m} = \frac{R}{R_0} P - \tau_b}_{\text{Equation du mouvement}} \quad [1]$$

où

$$P(t) = \frac{R_0 \Delta p(t)}{2L(t)} \quad (\text{pression motrice}) \quad [2]$$

Dans ces équations, $V(t) = \langle u(x, t) \rangle$ est la moyenne sur une section de la vitesse axiale $u(x, t)$, ρ_{sol} la masse volumique totale du sol, ρ_w la masse volumique de l'eau, $\tau_b(t)$ la contrainte tangentielle exercée par l'écoulement sur le sol, $\Delta p(t)$ la chute de pression entre l'amont et l'aval, et R_0 la valeur initiale du rayon.

Outre l'hypothèse d'écoulement dilué, les deux hypothèses qui ont permis d'aboutir à ce système sont l'uniformité longitudinale du rayon (qui implique celle de la vitesse moyenne), et un profil de vitesse turbulent tel que $\langle u^2 \rangle \approx V^2$, où $\langle u^2 \rangle$ est la moyenne spatiale du carré de la vitesse longitudinale. Lever ces hypothèses conduit à un modèle inutilement complexe pour la présente application (Lachouette *et al.*, accepté).

Nous avons de plus supposé que les vitesses tangentielles sont continues à travers l'interface, ce qui implique la continuité des contraintes tangentielles via l'équation de saut de la quantité de mouvement (Bonelli et Brivois, 2008). Physiquement, cette dernière hypothèse signifie que la matière érodée quitte l'interface avec une direction normale à celle-ci, ce qui est contre-intuitif. Toutefois, nous n'avons aucun résultat expérimental permettant de lever cette hypothèse. De plus, dans le cas d'un écoulement turbulent tangentiel à l'interface, une analyse par développements asymptotiques montre que la discontinuité de contrainte tangentielle est nécessairement petite, et peut être négligée.

Ces équations de conservation doivent être complétées par des lois de comportement. La loi de comportement de l'interface, qui est la loi d'érosion, est une loi de seuil à temps caractéristique, de la forme :

$$\dot{m} = k_{er}(\tau_b - \tau_c) \text{ si } \tau_b > \tau_c, \quad 0 \text{ si } \tau_b \leq \tau_c \quad (\text{érosion}) \quad [3]$$

où τ_c est la contrainte critique (ou seuil) d'érosion, et k_{er} est le coefficient d'érosion. Cette loi d'érosion, introduite pour les écoulements à surface libre par Partheniades en 1965, a été utilisée par Temple et Hanson (1994) pour interpréter les essais d'érosion de jet et par Wan et Fell (2004) pour les essais d'érosion de trou.

Nous faisons l'hypothèse d'une loi quadratique pour représenter l'écoulement turbulent, bien adaptée aux écoulements de conduit (Brown, 2002) :

$$\tau_b = \rho_w f_b V^2 \quad (\text{écoulement}) \quad [4]$$

où f_b est le coefficient de frottement de l'écoulement sur le sol, ici considéré comme constant. Dans le cadre d'une modélisation plus fine, f_b peut être fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité de l'interface (Shockling *et al.*, 2006).

Pour un écoulement dilué, la concentration en particules solides n'a pas d'influence sur le système. Cette situation est celle d'un conduit qui n'est pas suffisamment long pour que l'accumulation des particules de sol érodé conduise à un écoulement dense : $L \ll R(f_b k_{er} V)^{-1}$ (Bonelli *et al.*, 2008).

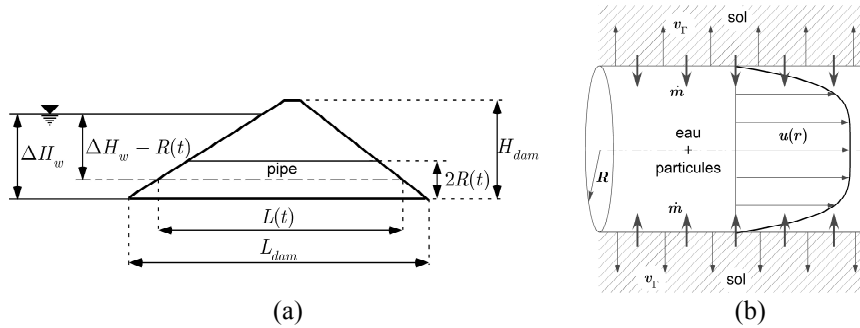


Figure 1. a) *Erosion de conduit dans un ouvrage en terre*, b) *écoulement axisymétrique avec érosion*

La chute de pression dans le conduit et la longueur du conduit sont des grandeurs moyennes sur une section. Ces grandeurs essentielles qui pilotent le système sont difficiles à évaluer. En effet, l'hypothèse initiale ayant permis l'obtention du modèle simplifié par développements asymptotique est que l'écoulement est allongé, c'est à dire $L \gg R$. Cette hypothèse a notamment pour conséquence que la pression est constante sur une section, au premier ordre, mais elle est plutôt mal vérifiée dans le cas de la Figure 1a.

Dans le cas d'un écoulement en charge, le conduit est rempli d'eau, la pression s'exerce sur tout le périmètre : il est pertinent de considérer la pression moyenne et la longueur moyenne. Par contre, si la hauteur d'eau amont est inférieure au diamètre du conduit, l'écoulement est dénoyé (i.e une partie de l'écoulement est à surface libre), la modélisation de cette situation, qui est très différente, reste à proposer. Afin d'obtenir des ordres de grandeurs, la présente modélisation a tout de même été utilisée (hors de son champ d'application donc) avec une pression moyennée sur le périmètre mouillé seulement. Ceci revient à supposer que la surface libre est connue et horizontale dans le conduit. On obtient le modèle n°1 :

$$\Delta p(t) = \begin{cases} \rho_w g [\Delta H_w(t) - R(t)] & \text{si } \Delta H_w(t) \geq 2R(t) \text{ (écoulement en charge)} \\ \rho_w g \frac{[\Delta H_w(t)]^2}{4R(t)} & \text{si } \Delta H_w(t) < 2R(t) \text{ (écoulement dénoyé)} \end{cases} \quad [5]$$

$$L(t) = B_{dam} - \frac{R(t)}{H_{dam}} \quad [6]$$

où g est la constante gravitationnelle. Afin de mieux quantifier cette hypothèse, une expression différente, qui donne le modèle n°2, a également été utilisée, qui est basée sur les valeurs de pression et de longueur à la base du conduit :

$$\Delta p(t) = \rho_w g \Delta H_w(t), \quad L(t) = B_{dam} \quad [7]$$

4. Comparaison avec un essai de grande dimension

Un essai d'érosion de conduit de grande dimension a été réalisé en 2003 (Løvoll et Vaskin, 2003), dans le cadre du projet norvégien Stability and Breaching of Embankment Dams, et du projet européen du 5^{ème} PCRD IMPACT (Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty). L'ouvrage est un barrage homogène en moraine de 4,3 m de haut et de 18,3 m de base, avec une pente de 1:1,4 pour les talus amont et aval. La moraine, constituée de 10% de sable et de 90% de gravier ($d_{10}=0,06$ mm, $d_{50}=5,5$ mm et $d_{max}=200$ mm), a une cohésion nulle et un angle de frottement interne de 45°. Elle a été mise en place par compactage (vibrant) de couches de 50 cm, à une teneur en eau de 8,5 % et une porosité de 0,24. Le conduit initial a un rayon de 10 cm. La rupture du barrage a été rapide : il s'est passé moins de 20 mn entre l'ouverture du conduit et l'effondrement du toit, survenu pour un diamètre de 4,2 m (Figure 2). Le niveau amont initial de 3.9 m n'a pas été maintenu constant. Le débit sortant est mesuré 200 m en aval.

Les paramètres d'érosion sont inconnus. La moraine est un matériau granulaire : on peut évaluer la contrainte seuil à partir de la contrainte de Shields, qui est $\tau_c = 0.047(\rho_s - \rho_w)gd$, soit τ_c [Pa] $\approx 0,8d$ [mm], ce qui conduit à une valeur correspondant au d_{50} de l'ordre de 5 Pa. Le coefficient d'érosion k_{er} , le coefficient d'érosion C_e et l'indice d'érosion I_e de Wan et Fell (2004), et le coefficient d'érosion k_d de Temple et Hanson (1994) sont reliés par les équations suivantes :

$$k_d \text{ [m.s}^{-1}\text{.Pa}^{-1}] = \frac{k_{er} \text{ [s.m}^{-1}]}{\rho_{sol} \text{ [kg.m}^{-3}]} = \frac{C_e \text{ [s.m}^{-1}]}{\rho_d \text{ [kg.m}^{-3}]}, \quad I_e = -\log(C_e) \text{ [s.m}^{-1}] \quad [8]$$

où ρ_d est la masse volumique sèche du sol. Dans la littérature, k_d est souvent exprimé en $\text{cm}^3.\text{s}^{-1}.\text{N}^{-1}$ (ce qui correspond à $10^{-6} \text{ m.s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$). Le coefficient d'érosion peut être estimé à partir de la corrélation proposée par Temple et Hanson (1994), qui est $I_e = 2 + 0.052(\rho_d / \rho_w)^{3.1} c_{\%}^{0.406}$, où $c_{\%}$ le pourcentage de fines. On obtient comme ordre de grandeur $k_{er} \approx 10^{-2} \text{ s/m}$, puisqu'ici $c_{\%} = 0$.

Le tableau 1 contient les paramètres du modèle, qui ont tous un sens mécanique. La figure 3 compare l'évolution du diamètre mesuré à partir d'images vidéo du talus aval, et l'évolution du diamètre donné par les deux modèles. Cette figure montre également l'évolution du niveau d'eau amont. Le modèle n°2, qui surestime la sollicitation, surestime également la cinétique d'érosion et donne un temps de rupture environ deux fois plus petit que le temps observé. Le modèle n°1, qui tient compte (mais de manière très approximative) de la transition écoulement en charge/écoulement dénoyé, montre que le changement de pente de l'évolution du rayon est dû à cette transition.

La figure 4 compare l'évolution du débit mesuré 200 m en aval du barrage, et l'évolution du débit moyen dans le conduit donné par les deux modèles. Le fait que la mesure soit faite si loin en aval conduit à une transformation du signal : celui-ci est retardé de plusieurs minutes, et la cinétique est lissée. Une comparaison directe est donc impossible. On constate néanmoins que les deux modèles donnent l'ordre de grandeur du débit de pointe (environ 200 m³/s). Nous n'avons pas connaissance de données ou mesures en diamètre et en débit sortant permettant de valider la modélisation. Dans le cas présent, cette validation nécessite des travaux complémentaires intégrant d'une part la connaissance de la relation hauteur/volume de la retenue, et d'autre part une modélisation simplifiée de la propagation de l'écoulement entre l'ouvrage et le point de mesure aval.



Figure 2. a) Début du renard hydraulique, b) fin du renard hydraulique juste avant l'effondrement du toit (Løvoll et Vaskin, 2003)

6. Conclusion

La modélisation proposée de l'agrandissement d'un conduit par érosion dans un ouvrage hydraulique est simplifiée, mais mécaniquement fondée, et cohérente avec l'interprétation des essais de laboratoire. Elle permet d'obtenir des ordres de grandeurs de l'évolution du diamètre du conduit et du débit d'écoulement jusqu'à l'effondrement du toit. Ce résultat est un progrès par rapport à l'état de l'art publié. Néanmoins, des travaux complémentaires sont nécessaires, essentiellement sur les deux points suivants : 1) une modélisation simple mais mécaniquement fondée de l'écoulement dénoyé, 2) une expression du diamètre maximum avant effondrement, fonction de paramètres géotechniques. Les résultats sont très sensibles à la valeur du coefficient d'érosion, qui peut être obtenu au laboratoire. C'est ce point capital qui justifie le développement d'un tel modèle : un sol ayant un coefficient d'érosion dix fois plus petit conduit à un temps de rupture dix fois plus grand, ce qui peut changer le type de gestion d'un tel incident.

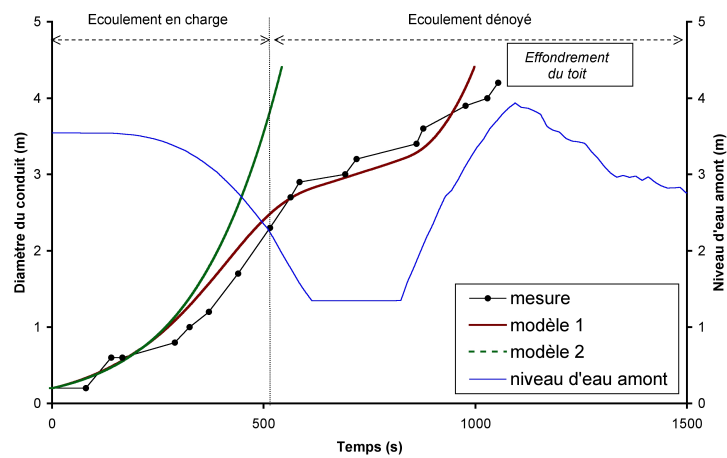
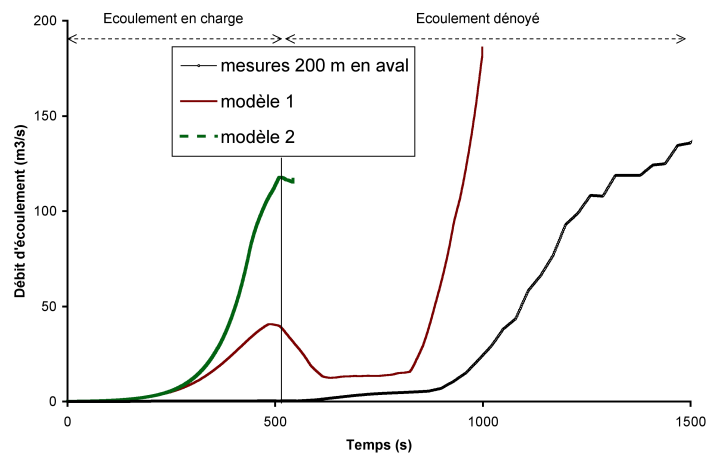
Remerciements : ce projet de recherche est soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ERINOH, contrat 0594C0115), et par l'Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil (IREX).

7. Bibliographie

- Bonelli S., Brivois O., Borghi R., Benahmed N., «On the modelling of piping erosion», *Comptes Rendus de Mécanique*, vol. 8-9, n° 334, 2006, p. 555-559.
- Bonelli S., Brivois O., Benahmed N., «Modélisation du renard hydraulique et interprétation de l'essai d'érosion de trou», *Revue Française de Géotechnique*, vol 118, 2007, p. 13-22.
- Bonelli S., Brivois O., «The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop», *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2008, in press.
- Brivois O., Bonelli S., Borghi R., «Soil erosion in the boundary layer flow along a slope : a theoretical study», *European Journal of Mechanics /B Fluids*, vol 26, 2007, p. 707-719.
- Brown G.O., «The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance». In *Environmental and Water Resources History*, A. Fredrich, and J. Rogers eds., ASCE, Reston, VA, 34-43, 2002.
- Fell R., Fry J.-J., *Internal Erosion of Dams and Their Foundations*. Taylor & Francis, London, 2007.
- IMPACT Project. *Investigation of extreme flood Processes and Uncertainty*. EC Contract EVG1-CT-2001-00037, 2004. Available via <http://www.impact-project.net>.
- Lachouette D., Golay F., Bonelli S., «One-dimensionnal modelling of piping erosion», *C. R. Mécanique*, accepté.
- Løvoll A., Vaskin K., «Data report no. 5, large scale field test 2003», IMPACT (Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty) FP5 European Project.
- Paquier A., Nogues P., Herledan R., «Model of piping in order to compute dam-break wave», CADAM (Concerted Action on Dam Break Modelling), FP5 European Project, Proceedings of the Munich meeting, oct 1998.
- Temple D.M., Hanson G.J., «Headcut development in vegetated earth spillways», *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 10, n°5, 1994, p. 677-682.
- Shockling M.A., Allen J.J., Smits A.J., «Roughness effect in turbulent pipe flow», *J. Fluid Mech.*, vol. 564, 2006, p. 267-285.
- Wan C.F., Fell R., «Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams», *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 30, n°4, 2004, p. 373-380.

Tableau 1. Paramètres de modélisation

H_{dam} (m)	L_{dam} (m)	R_0 (m)	g (m/s ²)	ρ_w (kg/m ³)	ρ_{sol} (kg/m ³)	τ_c (Pa)	k_{er} (s/m)	f_b
4,3	18,3	0,1	9,81	1000	2341	5	$1,6 \times 10^{-2}$	6×10^{-3}

**Figure 3.** Evolution du diamètre du conduit, comparaison mesure/modélisation.**Figure 4.** Evolution du débit, comparaison mesure/modélisation.