
Etude expérimentale de l'érosion interne d'une kaolinite

Nadia Benahmed — Stéphane Bonelli

Cemagref
3275 Route de Cezanne, CS 40061
13182 Aix-en-Provence Cedex 5
France
{nadia.benahmed, stephane.bonelli}@cemagref.fr

RÉSUMÉ. Un dispositif d'essai de laboratoire permettant la réalisation d'essais d'érosion interne dans un échantillon de sol a été développé. Ce dispositif a été finement instrumenté et permet ainsi la mesure précise de plusieurs paramètres tels que la turbidité, la pression, le débit massique, le débit volumique, la température, etc. Un programme d'essais d'érosion à débit constant a été réalisé sur des échantillons d'argile (une Kaolinite). Un trou a été foré au centre de ces échantillons pour simuler un défaut préexistant. Les résultats obtenus ont bien mis en évidence l'apparition du phénomène d'érosion dans ce trou et sa progression. A partir des équations d'écoulement diphasique avec diffusion, et des équations de saut avec érosion, un modèle différentiel a été élaboré en intégrant spatialement ces équations de champ, pour interpréter les essais réalisés. La comparaison avec les expérimentations valide la modélisation.

ABSTRACT. A new device to carry out hole erosion tests on laboratory has been developed. This device was fitted with accurate transducers in order to measure precisely different parameters such as pressure, turbidity, mass flow, temperature, etc. Erosion tests were carried out on cohesive soil, Kaolinite. A hole was drilled on the centre of samples to simulate a preexisting default (microfissures or cracks). The results obtained show clearly the appearance of the erosion phenomena and its progression on the preformed hole. From equations of diphasic flow with diffusion and the equation of jump with erosion, a useful piping model was develop to interpret the hole erosion tests. Comparison with experimental results validates the model.

MOTS-CLÉS: renard hydraulique, essai d'érosion, sol cohésif.

KEYWORDS: piping, erosion test, cohesive soil.

1. Introduction

L'érosion interne d'un sol est un phénomène complexe représentant une source importante de problèmes vis-à-vis de la sécurité des digues et des barrages. En effet, ce phénomène, qui se traduit par l'apparition de fuites parfois très importantes sous les ouvrages hydrauliques, peut être l'une des causes majeurs de leur rupture. La survenance de tels accidents peut engendrer des pertes matérielles et en vies humaines désastreuses et avoir des conséquences dramatiques sur le plan socio-économique. De nombreux cas de ruptures de barrages à travers le monde et qui ont ponctué l'histoire ont été rapportés dans la littérature (Fry et al., 1994, Foster et al., 2000). Un des exemples récent qu'on pourrait citer est la rupture du barrage des Ouches dans le Puy-de-Dôme en juillet 2001.

Contrairement aux problèmes de stabilité générale d'ouvrages, relativement bien connus maintenant, les phénomènes d'érosion interne, qui s'initient localement et se développent progressivement, souvent de manière régressive, sont beaucoup plus difficiles à appréhender et à prévoir. Plusieurs mécanismes de ces phénomènes ont été identifiés (Fry, 1997) et parmi eux le phénomène d'érosion localisée le long d'un chemin préférentiel crée à l'aval de l'écoulement et dans lequel l'eau va s'infiltrer et circuler en arrachant les particules de sol et en les entraînant le long du conduit dans un phénomène d'érosion régressif se propageant de l'aval vers l'amont avec agrandissement du dit conduit. C'est à ce dernier phénomène, appelé plus communément « renard hydraulique » ou « piping » en anglais, encore relativement mal connu, difficilement détectable et analysable, et particulièrement dangereux par sa rapidité d'apparition et de dégénérescence en rupture de l'ouvrage que l'on s'intéresse dans le cadre de cette étude.

Durant cette dernière décennie, plusieurs travaux de recherche ont été menés pour reproduire et étudier le phénomène d'érosion interne au laboratoire. L'accent a tout d'abord été mis sur le développement d'expérimentations destinées à mettre en évidence ce phénomène. Toutefois, les premières études étaient plus qualitatives que quantitatives et ne permettaient d'identifier que la dispersivité des matériaux étudiés (Sherard et al., 1976). Plus récemment, des efforts considérables ont été réalisés pour caractériser le phénomène d'érosion interne quantitativement (Lefebvre et al., 1985). Un des essais qui a été le plus distingué est l'essai d'érosion dans un trou (hole erosion test) et une avancée considérable a été atteinte dans ce domaine, notamment avec les travaux de Wan et Fell (2002, 2004) qui ont réalisé un grand nombre d'essais de type hole erosion test sur différents sols.

2. Dispositif expérimental et procédure

2.1 Appareil d'érosion de trou

Un dispositif d'essai pour la réalisation d'essais d'érosion de type « érosion de trou » ou « érosion de fente » a été développé. Il est similaire à celui développé par Wan et Fell (2002, 2004) mais doté d'une instrumentation que l'on a voulue plus moderne et précise en terme de mesure (Fig. 1 et 2). Celui-ci est constitué d'une boîte rectangulaire en aluminium, de 1000mm de long, 150mm de haut et 150mm de large. Il est muni de grilles interchangeables offrant ainsi la possibilité de réaliser des échantillons de plusieurs longueurs. La partie supérieure de la boîte (couvercle) est fabriquée en plexiglas afin de pouvoir visualiser le processus d'érosion dans le cas d'essais d'érosion de fente.

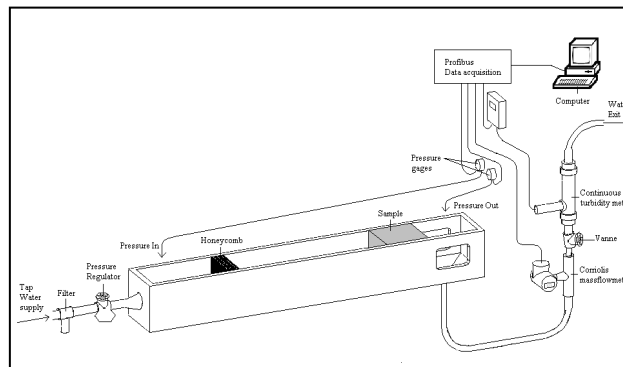


Figure 1. Représentation schématique de l'appareil d'érosion interne de trou



Figure 2. Photo de l'appareil d'érosion interne de trou

Un turbidimètre et un débitmètre massique à effet Coriolis ont été installés à l'aval du dispositif. Deux capteurs de pression ont été montés à l'amont et l'aval de la boîte pour la mesure de la pression d'entrée et la pression de sortie, et donc du gradient de pression appliqué. Un régulateur de pression a été installé à l'aval, et un nid d'abeille a été ajouté à l'intérieur de la boîte pour assurer un écoulement uniforme.

2.2 Préparation de l'échantillon et procédure d'essai

Afin de découpler l'effet physico-chimique de l'effet mécanique sur le phénomène d'érosion, le choix s'est porté sur la kaolinite qui est un matériau chimiquement inerte. Son poids spécifique est de 2,6 et son pH est de 5. La limite de liquidité est de 49%, la limite de plasticité de 33% et l'indice de plasticité est de 16%. La distribution granulométrique est donnée sur la figure 3. Le D50 est de 2,2 μm . Les caractéristiques à l'optimum proctor, obtenues à l'essai proctor selon les normes ASTM sont données sur la figure 4.

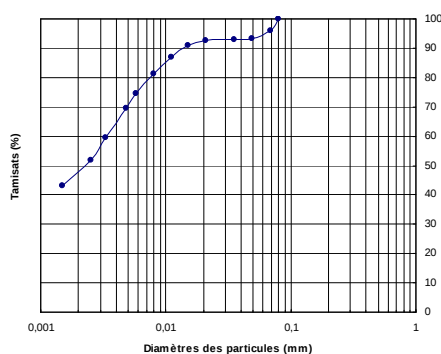


Figure 3. *Courbe granulométrique*

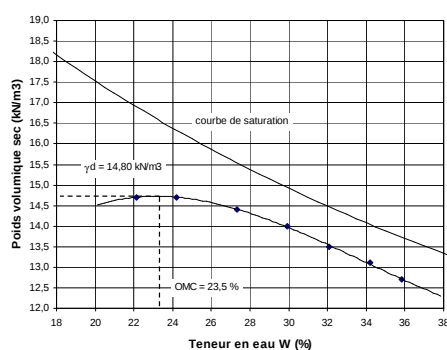


Figure 4. *Courbe Proctor*

Pour préparer l'échantillon, de la kaolinite en poudre est malaxée avec de l'eau du réseau, dont la quantité est prédéterminée afin d'obtenir une teneur en eau de 23,3%, égale à la teneur en eau optimum obtenue à l'essai proctor. Le sol obtenu est conservé pendant 72h dans un sac hermétique afin d'assurer une bonne uniformisation de la teneur en eau. La reconstitution de l'échantillon se fait ensuite directement dans la boîte d'essai, en cinq couches successives, compactées manuellement à l'aide d'une damme. La hauteur des couches est fixée préalablement pour obtenir la densité sèche désirée. La longueur de l'échantillon est de 170mm. Un trou de 6mm de diamètre est foré au centre de celui-ci. Cette étape est réalisée avec précaution afin de remanier le moins possible le pourtour de la cavité.

Une fois l'échantillon reconstitué et le dispositif d'essai fermé, on procède à la circulation de l'eau à travers le trou. Le débit est contrôlé par une vanne installée à la partie aval. L'effluent est caractérisé par sa turbidité en terme d'Unité Néphélométrique de Turbidité (NTU). L'acquisition des données se fait par un système d'acquisition Profibus.

3. Résultats expérimentaux

Les caractéristiques des éprouvettes sont données dans le tableau 1. Tous les essais ont été réalisés à débit constant. L'augmentation du débit se fait par paliers successifs (Fig.5). Le temps d'attente entre chaque palier dépend de la durée du processus d'érosion de l'échantillon. On procède à l'application d'un nouveau palier lorsque la valeur de la turbidité avoisine zéro (négligeable), montrant que l'érosion s'est arrêtée.

Sol	Essai	Teneur en eau compactée (%)	Degré de compactage (%)	Densité sèche (kN/m ³)
Kaolinite	K-W23-C85	23,30	85	12,58
	K-W23-C90	23,30	90	13,32
	K-W23-C95	23,30	95	14,06
	K-W23-C95	23,30	95	14,06

Tableau 1. *Caractéristiques des éprouvettes.*

Les résultats sont donnés en terme de turbidité et de gradient de pression en fonction du temps (Fig. 6). Mis à part une petite valeur de turbidité mesurée en début d'essai et qui correspond au "lavage" du trou, on constate qu'après les deux premiers paliers de débit durant lesquels la turbidité reste quasi nulle, indiquant qu'il n'y a pas d'érosion, celle-ci augmente rapidement lors de l'application du troisième palier où la différence de pression atteint la valeur de 18,42 kPa. Cette brusque évolution témoigne bien de l'apparition du phénomène d'érosion dans l'échantillon qui signifie que le seuil critique de la contrainte d'érosion a été dépassé. Par la suite, la turbidité décroît progressivement jusqu'à atteindre une valeur négligeable autour de laquelle elle se stabilise. Tant que le débit n'est pas augmenté, l'érosion semble se stabiliser. Une fois qu'un nouveau palier est appliqué, on assiste à une nouvelle apparition de l'érosion avec un pic de turbidité puis une régression et une stabilisation. Concernant la différence de pression, l'allure de la courbe durant chaque phase d'érosion montre qu'en effet le diamètre initial du trou s'agrandit durant le processus d'érosion, qui se traduit ici par la chute progressive de la différence de pression. Un exemple de l'agrandissement du trou par érosion est donné sur la figure 7.

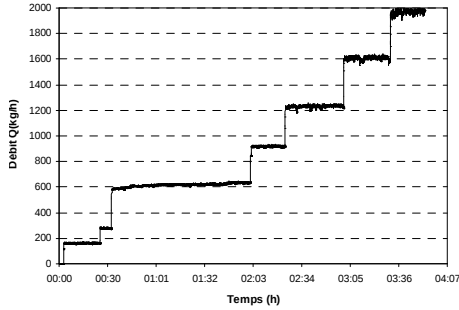


Figure 5. Débit en fonction du temps.

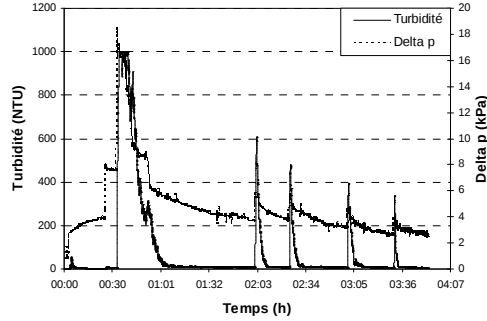


Figure 6. Turbidité et différence de pression en fonction du temps



Figure 7. Exemple d'agrandissement du trou durant l'essai d'érosion.

4. La loi d'échelle

On considère une loi d'érosion à seuil écrite sous la forme :

$$\dot{m} = \begin{cases} k_{er} (|\tau_b| - \tau_c) & \text{si } |\tau_b| > \tau_c \\ 0 & \text{sinon} \end{cases},$$

où $\dot{m}$ est le débit de la masse érodée, τ_c est la contrainte critique (ou seuil) d'érosion, k_{er} est le coefficient d'érosion, et τ_b est la contrainte tangentielle du fluide sur le sol.

A partir des équations d'écoulement diphasique avec diffusion, des équations de saut avec érosion et de la loi d'érosion précédemment définie, un modèle différentiel a été élaboré en intégrant spatialement ce système d'équations sur un cylindre de longueur L et de rayon R (Bonelli et al., 2006, 2007).

La vitesse d'écoulement de référence est $V_0 = Q_0 / \pi R_0^2$, où Q_0 est le débit. Le temps caractéristique d'écoulement est $t_0 = R_0 / V_0$. La pression motrice est $P = R(p_{in} - p_{out}) / (2L)$ (valeur initiale P_0), où p_{in} et p_{out} sont les pressions

d'entrée et de sortie. On note $V_{er} = k_{er} P_0 / \rho_g$ la vitesse d'érosion de référence, où ρ_g est la masse volumique du sol. Le temps caractéristique d'érosion est alors $t_{er} = R_0 / V_{er}$. Le débit total de matière érodée est $Q_{er} = 2\pi R_0 L V_{er}$. La concentration moyenne de référence est $c_0 = (1-n)Q_{er} / Q_0$ où n est la porosité. Nous définissons alors $\tilde{k}_{er} = k_{er} V_0$ comme étant le nombre de cinétique d'érosion. On réécrit les équations intégrées en adimensionnant les variables par ces valeurs de référence. On suppose ensuite que $\tilde{k}_{er} \ll 1$ (faible cinétique d'érosion), ce qui implique que $t_0 \ll t_{er}$ et $V_{er} \ll V_0$; on peut alors considérer l'écoulement comme permanent et négliger les termes inertiels. Par ailleurs, si $c_0 \ll 1-n$, l'écoulement est dilué et n'est pas influencé par les particules érodées.

A partir de ces hypothèses, le système d'équation se simplifie et donne pour l'évolution temporelle du rayon à débit constant imposé l'équation suivante :

$$\frac{d\tilde{R}}{d\tilde{t}} = \frac{1}{\tilde{R}^4} - \tilde{\tau}_c \quad \text{avec} \quad \tilde{R} = R/R_0, \quad \tilde{\tau}_c = \tau_c/P_0, \quad \tilde{t} = t/t_{er}$$

La résolution de cette équation, non développée ici, montre que le rayon adimensionné $\tilde{\tau}_c^{1/4} \tilde{R}$ peut être tracé en fonction du temps adimensionné $\tilde{\tau}_c^{5/4} \tilde{t} - f(\tilde{\tau}_c^{1/4})$, où f est la solution exacte de $df/dR = R^4(R^4 - 1)$.

5. Comparaison de la loi d'échelle avec les résultats expérimentaux

L'évolution du rayon durant les essais d'érosion du trou est déterminée indirectement à partir des mesures de la différence de pression en fonction du temps. La loi d'échelle introduite est appliquée à l'interprétation de résultats expérimentaux obtenus. La figure 8a représente l'évolution du rayon normalisé en fonction du temps normalisé pour les différents essais réalisés.

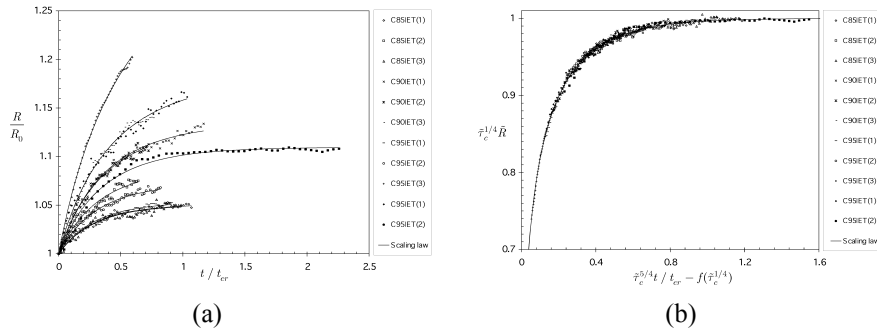


Figure 8. Essai d'érosion de trou, comparaison essais (symboles)/modèle (traits continus). Loi d'échelle reliant le rayon au temps.

La figure 8b montre que toutes les valeurs expérimentales se regroupent sur une courbe principale. Ce résultat valide la loi d'échelle de l'érosion par renard hydraulique à débit constant pour un écoulement dilué.

6. Conclusion

Le dispositif d'essai d'érosion de trou développé permet de bien reproduire au laboratoire le phénomène d'érosion interne par renard hydraulique et de le caractériser. Les résultats d'essais montrent qu'il existe un seuil critique au delà duquel l'érosion interne est initiée. Un modèle analytique a été développé à partir des équations d'écoulement diphasique avec diffusion, et des équations de saut avec érosion. Une loi d'échelle a été proposée. La comparaison avec les expérimentations a montré que le modèle permet de regrouper les résultats expérimentaux obtenus sur une courbe principale.

Remerciements : ce projet de recherche est soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ERINOH, contrat 0594C0115).

7. Bibliographie

- Bonelli S., Brivois O., Benahmed N., «Modélisation du renard hydraulique et interprétation de l'essai d'érosion de trou», *Revue Française de Géotechnique*, 2007, à paraître.
- Bonelli S., Brivois O., Borghi R., Benahmed N., «On modelling of piping erosion», *Comptes Rendus de Mécanique*, vol. 8-9, n° 334, 2006, p. 555-559.
- Foster M., Fell R., M. Spannagle M., «The statistics of embankment dam failures and accidents», *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 2000, pp. 1000-1024.
- Fry J.-J., Brun P., Royet P., «Internal erosion problems in some old embankment dams in France», *Reservoir Safety and the Environment*, Proceedings of 8th Conference of British Dam Society, Exeter, 1994, pp. 23-34. Thomas Telford, London.
- Fry J.-J., «Internal Erosion: Typology, Detection, Repair», *Barrages and Reservoirs* No. 6, 1997, French Committee of Large Dams, Le Bourget-du-lac Cedex.
- Lefebvre G., Karol R., Douville S., «Erosivity of naturel intact structured clay: Evaluation», *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, 22, pp. 508-517.
- Sherard J.-L., Dunnigan L.P., Decker R.S., Steele E.F., «Pinhole test for identifying dispersive soils». *Journal of the Geotech. Eng. Div.*, ASCE, Vol. 102, N° GT1, 1976, pp. 69-84.
- Wan C.F., Fell R., «Investigation on internal erosion and piping of soils in embankment by Slot Erosion Test and the Hole Erosion Test», UNICIV report No. R-412 july 2002. ISBN 85841 379 5.
- Wan C.F., Fell R., «Laboratory Tests on the Rate of Piping Erosion of Soils in Embankment Dams», *Geotechnical Testing Journal*, 2004, Vol. 27, No. 3, pp. 01-09.