



HAL
open science

L'essai d'érosion de conduit HET, Hole Erosion Test

Nadia Benahmed, Stéphane Bonelli

► **To cite this version:**

Nadia Benahmed, Stéphane Bonelli. L'essai d'érosion de conduit HET, Hole Erosion Test. 2010, pp.6. <hal-02596317>

HAL Id: hal-02596317

<https://hal.inrae.fr/hal-02596317v1>

Submitted on 15 May 2020

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

L'essai d'érosion de conduit

HET

Hole Erosion Test

Décembre 2010

Auteurs : Nadia BENAHMED, Stéphane BONELLI

Cemagref
Unité de Recherche Ouvrages Hydrauliques
3275 Route CEZANNE - CS 40061
13182 Aix-en-Provence Cedex 5
Tél. 04 42 66 99 10 - Fax 04 42 66 88 65

Deux types d'érosion sont susceptibles de conduire très rapidement à la rupture d'un ouvrage hydraulique : la surverse et l'érosion de conduit (Figures 1b et 1c). Le Cemagref met en œuvre un appareil d'érosion de conduit, dénommé "Hole Erosion Test" ou **HET**, dérivé des appareils canadiens [12], [14] et australiens [15], [16], et du même type que celui déployé aux états-unis [8].

Cet appareil a été développé entre 2003 et 2008 au Cemagref. Il permet de caractériser la résistance à l'érosion mécanique des sols vis à vis de l'écoulement d'eau dans un conduit¹. Le mode opératoire a été élaboré pour que l'essai soit reproductible et ne dépende pas de l'opérateur. La durée d'un essai est de 3 à 6h. A ce temps, il convient de rajouter la préparation de l'échantillon, qui suit également un mode opératoire précis. La durée de l'interprétation d'un essai est de 1 à 3h. Cet essai ne peut être réalisé que sur un sol ayant une cohésion, et comportant des éléments inférieurs à 5 mm.

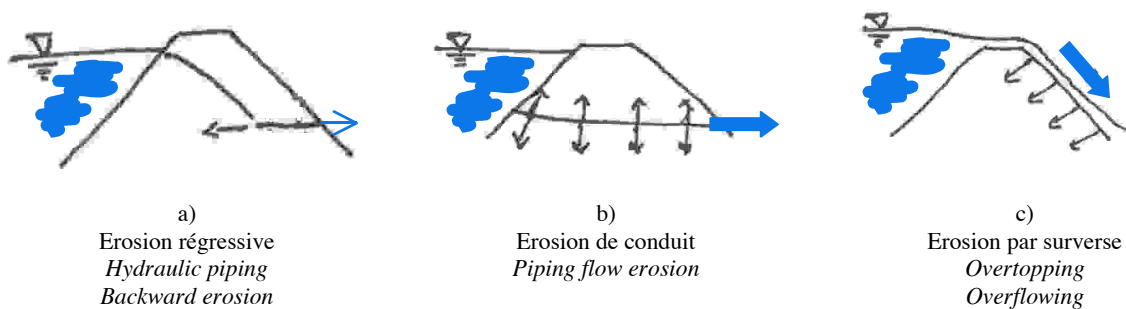


Figure 1. Trois types d'érosion rencontrés sur les ouvrages hydrauliques

Le dispositif d'essai est constitué d'une cellule cylindrique en plexiglas, divisée en trois parties amovibles (Figure 2). La partie centrale est destinée à recevoir l'échantillon. La partie amont est connectée à une arrivée d'eau. La partie aval est connectée à un turbidimètre et à un débitmètre. Deux capteurs de pression sont montés à l'amont et à l'aval du dispositif pour la mesure de la chute de pression entre l'entrée et la sortie.

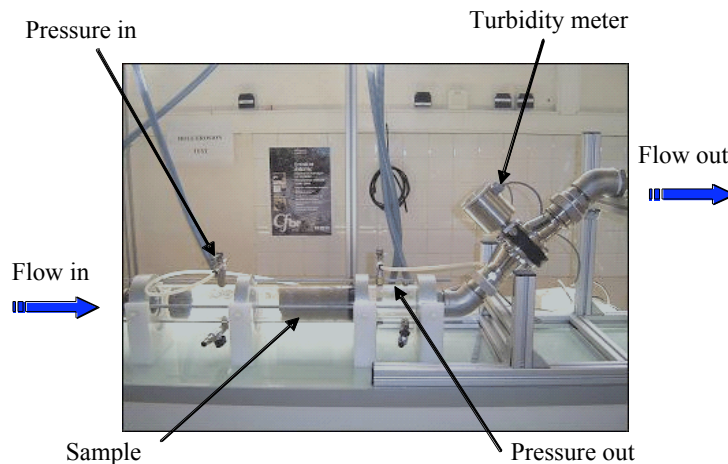


Figure 2. Appareil Hole Erosion Test (HET). Photo DR Cemagref

¹ Ce mécanisme ne doit pas être confondu avec l'érosion régressive (Figure 1a), introduite par Terzaghi en 1927 sous le nom de *Hydraulic piping* et dénommée *Renard* par la communauté francophone. C'est pour cela que nous l'appelons *Erosion de conduit* (*Piping Flow Erosion*).

L'échantillon de sol à tester peut être directement prélevé dans une carotte de sol intact par pistonnage (Figures 3a et 3b). Lorsque cela est impossible, cet échantillon est préparé avec du sol remanié. Dans ce cas, il est nécessaire de déterminer la teneur en eau initiale du sol remanié et sa compacité². Le sol remanié est malaxé avec de l'eau distillée, puis conservé pendant 48h à 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 partie centrale de la cellule d'essai, en plusieurs couches successives, compactées manuellement à l'aide d'une dame (Figure 3c). La hauteur et le nombre des couches est fixée préalablement en fonction, respectivement, de la densité désirée et de la longueur de l'éprouvette.

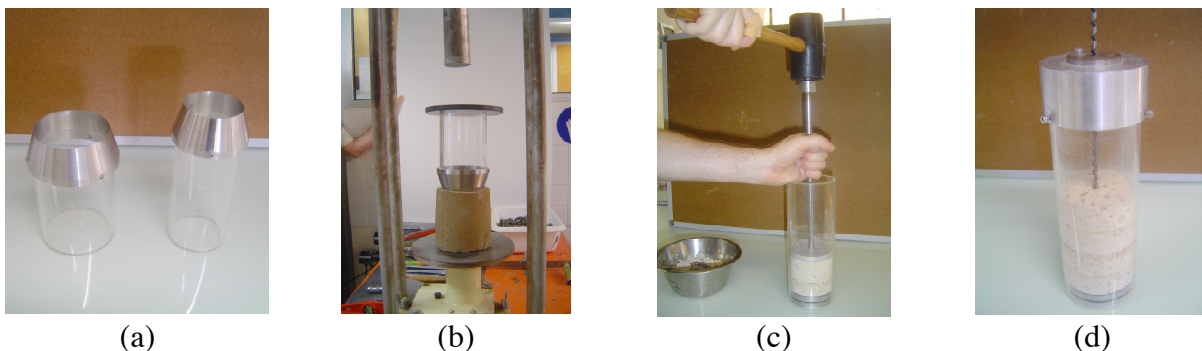


Figure 3. Préparation de l'échantillon de sol pour le *Hole Erosion Test* (HET) : a) Trousse coupante de diamètre adapté à la carotte pour un échantillon intact; b) Prélèvement d'un échantillon intact par pistonnage; c) Compactage manuel d'un sol remanié; d) Percage du conduit initial. Photo DR Cemagref

A l'aide d'un foret, un conduit longitudinal de 6 mm de diamètre est réalisé au centre de l'éprouvette (Figure 3d). Une fois l'échantillon installé dans le dispositif d'essai, on procède au remplissage puis à la mise en circulation de l'eau dans le conduit, à débit contrôlé³. L'effluent est caractérisé par sa turbidité en terme d'Unité Néphéométrique de Turbidité (NTU). Si l'écoulement est suffisamment intense pour provoquer une érosion, le conduit est agrandi par érosion, ce qui provoque une diminution de la vitesse d'écoulement, donc de la contrainte d'érosion. A débit contrôlé, cette érosion s'arrête au bout d'un temps fini. La valeur du palier de débit est maintenue suffisamment longtemps pour que la turbidité soit redescendue à une valeur faible (<5 NTU). Un exemple d'échantillon érodé est donné Figure 4. Un exemple de résultats est donné Figure 5 en terme de pression et débit, et Figure 6 en terme de turbidité.



Figure 4. Exemple d'échantillon érodé au *Hole Erosion Test* (HET). Photo DR Cemagref

² Pour comparer des sols entre eux, Robin Fell a proposé d'utiliser la teneur en eau de l'optimum Proctor, et 95% de la densité optimum.

³ Contrôler le débit permet de réaliser un essai plus précis, et nécessitant moins d'eau. Cet essai peut également être réalisé à chute de pression contrôlée [14], [15]. Il ne s'agit que d'un pilotage technique de la sollicitation mécanique ici représentée par l'écoulement. La loi d'érosion ne dépend pas de cet aspect technique.

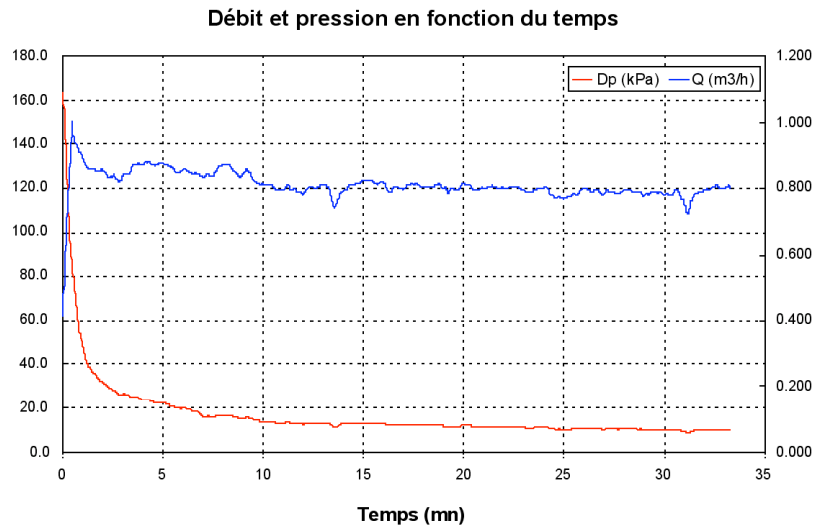


Figure 5. Exemple d'évolution du débit et de la chute de pression au Hole Erosion Test (HET)

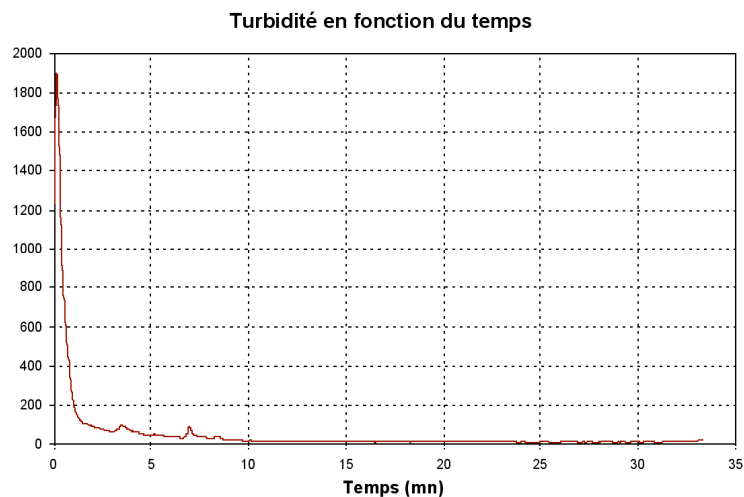


Figure 6. Exemple d'évolution de la turbidité au Hole Erosion Test (HET)

Les résultats sont interprétés à l'aide d'un modèle qui fournit pour un essai la contrainte critique et le coefficient d'érosion. Ce modèle⁴ est basé sur les équations de l'écoulement turbulent de l'eau dans le trou, et de l'agrandissement du trou par érosion du sol [2], [3], [4], [5].

La loi d'érosion est celle utilisée par Robin Fell [15], [16] :

$$\dot{\epsilon}_t = \begin{cases} 0 & \text{si } |\tau| \leq \tau_c \\ C_e(|\tau| - \tau_c) & \text{si } |\tau| > \tau_c \end{cases}$$

où $\dot{\epsilon}_t$ ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) est le débit massique de matière solide érodée par unité de surface, τ (Pa) est la contrainte tangentielle exercée par l'écoulement sur le sol, τ_c (Pa) est la contrainte critique d'érosion, et C_e (s.m^{-1}) est le coefficient d'érosion de Fell. C'est un modèle qui suppose que le taux d'érosion est proportionnel à la contrainte d'érosion exercée par l'écoulement sur le sol⁵.

⁴ Ce même modèle est également utilisé pour évaluer le temps de rupture d'un ouvrage hydraulique par érosion de conduit [6], [7].

⁵ Supposer une loi d'érosion reliant de manière non linéaire taux d'érosion et contrainte d'érosion n'est pas pertinent pour l'érosion de conduit [5].

Dans le cas d'une érosion de conduit, le débit massique de matière solide érodée est

$$\dot{\epsilon}_t = \rho_d \frac{dR}{dt}$$

où ρ_d (kg.m^{-3}) est la masse volumique sèche du sol, et R (m) le rayon du trou, dR / dt (m.s^{-1}) étant la vitesse d'agrandissement du trou. Cette loi d'érosion est la même que celle utilisée par Greg Hanson [9], [10] :

$$\epsilon_r = \begin{cases} 0 & \text{si } |\tau| \leq \tau_c \\ k_d(|\tau| - \tau_c) & \text{si } |\tau| > \tau_c \end{cases}$$

où k_d ($\text{s.m}^2.\text{kg}^{-1}$ ou $\text{m}^3.\text{N}^{-1}.\text{s}^{-1}$) est le coefficient d'érosion de Hanson, et où la vitesse d'érosion du sol est ici $\epsilon_r = dR / dt$. La relation entre coefficient d'érosion de Fell C_e (s.m^{-1}) et le coefficient d'érosion de Hanson k_d ($\text{s.m}^2.\text{kg}^{-1}$ ou $\text{m}^3.\text{N}^{-1}.\text{s}^{-1}$) est⁶

$$k_d \left(\frac{\text{s.m}^2}{\text{kg}} \text{ ou } \frac{\text{m}^3}{\text{N.s}} \right) = \frac{C_e \text{ (s/m)}}{\rho_d \text{ (kg/m}^3\text{)}}$$

La contrainte critique τ_c représente le seuil d'érosion de conduit. C'est le premier résultat essentiel de l'essai HET. La contrainte critique τ_c varie de quelques Pa pour un sol peu résistant à plusieurs centaines de Pa pour un sol résistant. L'index d'érosion de Fell est défini par $I_e = -\log_{10}(C_e \text{ (s/m)})$. C'est le second résultat essentiel de l'essai HET. L'index d'érosion I_e varie typiquement entre 0 et 6, ce qui correspond à une variation du coefficient d'érosion de Fell, C_e , de 1 s/m à 10^{-6} s/m. Plus petit est l'index d'érosion I_e , plus grande est la vitesse d'érosion pour une même contrainte d'érosion exercée par l'écoulement d'eau. Robin Fell a proposé la classification suivante en 6 groupes :

Group No.	Erosion Rate Index I_e	Description
1	<2	Extremely rapid
2	2 – 3	Very rapid
3	3 – 4	Moderately rapid
4	4 – 5	Moderately slow
5	5 – 6	Very slow
6	>6	Extremely slow

La contrainte critique τ_c et l'index d'érosion I_e (ou le coefficient d'érosion C_e) sont deux paramètres géotechniques caractérisant la résistance du sol étudié vis à vis de l'érosion de conduit. Ces paramètres sont très variables et très dépendant du type de sol. Pour un sol donné, ces paramètres sont très variables et très dépendant de sa compacité et de sa teneur en eau. Pour comparer des sols entre eux, Robin Fell a proposé d'utiliser comme référence un sol compacté à la teneur en eau de l'optimum Proctor, et à 95% de sa densité optimum.

Les paramètres d'érosion obtenus au HET correspondent à l'érosion de conduit⁷. Ils permettent de classer les sols entre eux vis à vis de la résistance à l'érosion de conduit⁸. Ils peuvent également permettre d'évaluer le temps de rupture d'un ouvrage hydraulique par érosion de conduit [1], [6], [7].

⁶ 1 N=1 kg.m.s⁻² (1 kg=1 N.m⁻¹.s²).

⁷ Le *Hole Erosion Test* n'a rien à voir avec le *Pin Hole Test* : le *Hole Erosion Test* permet de caractériser la résistance mécanique de manière quantitative, à l'aide de la contrainte critique et du coefficient d'érosion. Le *Pin Hole Test* permet de caractériser la dispersivité (de nature chimique) de manière qualitative.

⁸ Les paramètres d'érosion obtenus au **HET** (*Hole Erosion Test*) ne doivent en aucun cas être comparés aux paramètres d'érosion obtenus au **JET** (*Jet Erosion Test*). Le **HET** correspond à l'érosion de conduit, pour un écoulement parallèle à la surface du sol. Le **JET** correspond à l'érosion de jet, pour un écoulement complexe impactant le sol. En l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de comparer la résistance d'un sol à l'érosion pour ces deux types d'écoulement très différents.

Références

- [1] Bonelli S. (2006). A characteristic time for progression of piping in hydraulic works, *22th International Congress on Large Dam*, Barcelone, june 19-23.
- [2] Bonelli S., Benahmed N., Brivois O. (2006). On modelling of the hole erosion test, *3rd International Conference on Scour and Erosion*, Amsterdam, 1-3 nov.
- [3] Bonelli S., Brivois O., Borghi R., Benahmed N. (2006). On the modelling of piping erosion, *Comptes Rendus de Mécanique*, Vol. 8-9, n° 334, pp. 555-559.
- [4] Bonelli S., Brivois O., Benahmed N. (2007). Modélisation du renard hydraulique et identification de l'essai d'érosion de trou, *Revue Française de Géotechnique*, Vol. 118, pp. 13-22.
- [5] Bonelli S., Brivois O. (2008) The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 32, pp. 1573-1595.
- [6] Bonelli S., Benahmed N., Philippe P., Bernard A., Grémeaux Y., Nunes G. (2009). Evaluer le temps de rupture d'une digue en remblai érodée par conduit traversant, *Ingénieries*, n° spécial "La prévention des inondations", pp. 85-94.
- [7] Bonelli S., Benahmed N. (2010), Piping flow erosion in water retaining structures: inferring erosion rates from hole erosion tests and quantifying the failure time, *8th ICOLD European Club Symposium*, 22-23 sept 2010, Innsbruck, Austria.
- [8] Farrar J. A., Torres R. L., Erdogan Z. (2007). Bureau of Reclamation Erosion Testing for Evaluation of Piping and Internal Erosion of Dams, *Geotechnical Special Publication No. 167*, pp 1-10.
- [9] Hanson G. J. (1991) Development of a jet index to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways, *Transactions of the ASAE*, **34**(5):2015-2020.
- [10] Hanson G. J., Cook K.R. (2004) Apparatus, Test Procedures, and Analytical Methods to Measure Soil Erodibility In Situ, *ASAE Applied Engineering in Agriculture*, **20**(4):455-462.
- [11] Lachouette D., Golay F., Bonelli S. (2008) One-dimensionnal modeling of piping flow erosion, *Comptes Rendus de Mécanique*, Vol. 336, pp. 731-736.
- [12] Lefebvre, G., Rohan, K. & Douville, S. (1985). Erosivity of natural intact structured clay: evaluation. *Can. Geotech. J.*, **22**, 508-517.
- [13] Regazzoni P.-L., Marot D., Wahl T., Hanson G., Courivaud J.R. (2009). Soils erodibility: a comparison between the Jet Erosion Test and the Hole Erosion Test, *Inaugural International Mechanics Institute (EM08) Conference (ASCE)*.
- [14] Rohan, K., Lefebvre, G., Douville, S. & Milette, J.-P. (1986). A new technique to evaluate erosivity of cohesive material. *Geotech. Test. J.*, **9**(2):87-92.
- [15] Wan, C. F. & Fell, R. (2004a). Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *J. Geotech. Geoenviron. Engng*, **130**(4), 373-380.
- [16] Wan, C. F. & Fell, R. (2004b). Laboratory Tests on the Rate of Piping Erosion of Soils in Embankment Dams. *Geotech. Test. J.*, **27**(3), 295-303.