

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Érosion des sols: deux essais complémentaires

Erosion of soils: two complementary testing approaches

T.L. Pham, M. Duc, C. Chevalier, P. Reiffsteck and S. Guédon
Université Paris Est/LCPC, Paris, France

RÉSUMÉ

Les catastrophes récentes survenues en France (Aude, Novembre 1999 ; Gard, Septembre 2002) montrent la grande vulnérabilité des remblais et digues face à l'érosion interne et à la surverse. La susceptibilité de ces ouvrages en terre à l'érosion hydrique est extrêmement dépendante de la texture du sol (en particulier, la présence de particules fines argileuses) et de la sensibilité à la dispersion et est donc très difficile à prévoir.

Pour calculer la sensibilité des sols à l'érosion, l'essai d'érosion de trou (HET : « Hole Erosion Test ») s'est révélée être un moyen efficace et pratique à utiliser en laboratoire. Mesurer *in situ* la sensibilité à l'érosion à l'aide d'essais dédiés est également d'un grand intérêt car cela permet de tester le sol dans un état naturel non remanié. Tel est l'objectif d'appareils de mesure comme l'érodimètre à jets mobiles (MoJET : « Mobile Jets Erosion Test »). Cependant, les résultats des différents types d'essais ne peuvent en général pas facilement être reliés, affaiblissant la portée de ces méthodes. La présente étude, qui est basée sur des essais comparatifs avec les dispositifs HET et MoJET, tente de répondre à ce besoin.

ABSTRACT

Recent catastrophes occurred in France (Aude in November 1999 or Gard in September 2002) clearly show the great vulnerability of embankments and dikes to internal erosion and overtopping. Sensitivity to erosion of these earthworks is strongly dependent on soil texture (especially, the presence of fine clay particles) and on sensitivity to dispersion and is therefore very difficult to predict.

For estimating sensitivity of soils to erosion, the Hole Erosion Test (HET) has proved to be an efficient and convenient laboratory apparatus. Measuring this sensitivity *in situ* with dedicated tests is also of great interest since it allows testing the soil in its real state. This is the purpose of apparatus like the Mobile Jets Erosion Test (MoJET). However, results from laboratory and *in situ* tests are generally not easily linked and this is a great lack of these methods. The study presented here which is based on comparative tests with Hole Erosion Test and Mobile Jets Erosion Test apparatus tries to address this need.

Keywords : Soil erosion, Piping, Surface erosion, Laboratory tests, Parametric study

1 INTRODUCTION

Dans le but d'obtenir une meilleure caractérisation *in situ* de la sensibilité à l'érosion, ce document présente l'étude d'essais reproductibles d'érosion à l'aide de deux appareils différents : l'essai d'érosion de trou, noté HET pour « Hole Erosion Test » (ASTM 2005a, Perry 1979, Pham 2008, Pham et al. 2009, Wan & Fell 2002, 2004) et l'érodimètre à jets mobiles LCPC noté MoJET pour « Mobile Jets Erosion Test » (Hénensal & Duchatel 1990, Pham 2008) et utilisable soit en laboratoire, soit sur le terrain. Les essais ont été effectués sur des sols préparés avec différentes textures et les résultats ont été comparés.

Ce papier est organisé de la manière suivante. Dans une première partie nous présentons quelques éléments caractéristiques des deux essais ainsi que la description des textures de sol utilisées. Dans une deuxième partie, les résultats sont présentés pour les deux essais et des comparaisons effectuées. Des conclusions et perspectives sont tirées dans une dernière partie.

2 METHODES ET MATERIAUX

Les essais d'érosion de laboratoire constituent un moyen efficace et pertinent pour comprendre le processus complexe de l'érosion des sols. De nombreux appareils capables de produire artificiellement une érosion de surface ont ainsi été développés dans les dernières décennies. La sensibilité à l'érosion peut ainsi être mesurée à l'aide d'un canal (Arulanandan et al. 1980) d'un

cylindre en rotation (Arulanandan et al. 1980) d'un appareil similaire au triaxial (Bendahmane et al. 2006, Sanchez et al. 1983) ou à l'aide d'essais d'érosion de trou (Wan & Fell 2002, 2004, Pham 2008).

Toutefois, les essais qui peuvent être pratiqués sur le terrain restent indispensables car ils permettent de tester le sol en place et non remanié. C'est le cas du « Jet Erosion Test » développé par Hanson (1993, 2004) et du MoJET développé au LCPC par Hénensal et Duchatel (1990).

Nous avons utilisé, dans cette étude, une version modifiée du HET (Pham et al. 2009) et le MoJET du LCPC (Hénensal et Duchatel 1990, Pham 2008) afin de comparer les résultats obtenus sur des sols préparés avec différentes textures.

2.1 Essai d'érosion de trou (HET : « Hole Erosion Test »)

Le dispositif HET récemment mis au point par Wan et Fell (2002, 2004) a été un grand pas en avant pour caractériser quantitativement l'érosion de trou ou « piping erosion ».

Nous avons récemment conçu et développé notre propre dispositif HET (Pham 2008, Pham et al. 2009, Reiffsteck et al. 2006). Similaire à celui développé par Wan et Fell, il présente un certain nombre d'améliorations dans le but de mieux quantifier les paramètres de l'érosion.

2.1.1 Appareil

Le dispositif HET comporte trois parties : un réservoir d'eau en amont, une cellule d'érosion où l'échantillon est situé et une sortie d'eau en aval.

Le réservoir d'eau (80 litres) en amont peut être pressurisé par de l'air et rechargé avec de l'eau au cours de l'essai. La pression d'air dans le réservoir est contrôlée avec un manomètre. Un débitmètre à turbine est placé à proximité de la cellule d'érosion. La hauteur d'eau à l'aval est de 20 cm.

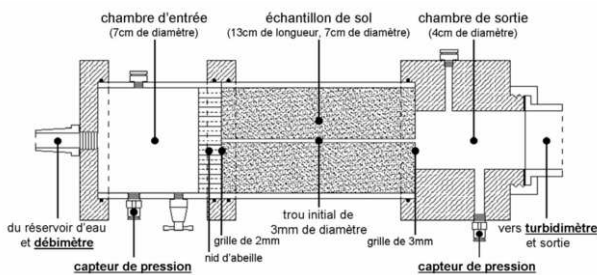


Figure 1. Schéma de la cellule d'érosion du HET. Les capteurs sont indiqués en caractères gras et soulignés

La cellule d'érosion est représentée sur la figure 1. Elle comprend trois parties. La première partie est la chambre d'entrée de l'eau. Outre un premier capteur miniature de pression, cette partie comprend une structure en nid d'abeilles afin de réduire la turbulence dans le trou d'entrée ainsi que d'une grille de 2 mm. La deuxième partie est constituée de l'échantillon de sol lui-même avec un trou initial de 3mm de diamètre. Le moule en plexiglas transparent permet de vérifier que l'érosion ne se produit pas entre l'échantillon et le moule. La troisième partie est la chambre de sortie. Elle comprend un deuxième capteur miniature de pression. Un turbidimètre est placé juste après cette partie, afin de mesurer la turbidité de l'effluent en sortie.

2.1.2 Procédure d'essai

Le sol est préparé à l'avance à une teneur en eau donnée. Les échantillons de sol sont préparés dans un moule cylindrique en plexiglas. Le diamètre est de 7 cm et la longueur de 13 cm (volume : 500 cm³). Pour avoir un compactage uniforme, l'échantillon est compacté en 6 couches de la même épaisseur à l'intérieur du moule. Le trou initial de 3 mm de diamètre au milieu de l'échantillon est obtenu avec une perceuse à colonne.

Après introduction de l'eau dans l'ensemble du système, l'érosion est obtenue et suivie en maintenant une chute de pression constante aux bords de l'échantillon.

À la fin de l'essai, l'échantillon de sol est sorti de l'appareil et de la cire fondue est versée dans le trou érodé. Une fois extraite, le volume de la bougie obtenue permet de calculer le diamètre moyen final du trou.

Au cours de l'essai, les données mesurées par le débitmètre, les capteurs de pression et le turbidimètre sont stockées sur ordinateur à une fréquence de 1Hz. Ces mesures et la donnée des diamètres initial et final du trou permettent de calculer les courbes d'érosion (Pham 2008, Pham et al. 2009), c'est-à-dire la relation entre les deux grandeurs physiques suivantes :

- τ la contrainte de cisaillement que le liquide en écoulement applique sur l'interface (unité SI : Pa),
- \dot{E} le taux d'érosion, qui représente la masse de sol érodé par unité de surface et unité de temps (unité SI : kg.m⁻².s⁻¹).

2.2 Erodimètre à jets mobiles (MoJET : « Mobile Jets Erosion Test »)

Le développement du MoJET, appareil d'essai d'érosion de type rotatif (figure 2), a été l'aboutissement de recherches menées par le LCPC dans les années 1990 pour mettre en relation la sensibilité des sols à l'érosion et divers paramètres caractéristiques des sols (Hénensal et Duchatel 1990, Hénensal 1993). Cet appareil peut être mis en œuvre sur site ou en laboratoire et est donc bien adapté pour la comparaison avec les essais de laboratoire tels que le HET précédemment décrit.

2.2.1 Appareil

Le dispositif MoJET se compose d'une partie mécanique, appelée « érodeur », d'un réservoir d'eau sous pression d'air, et de diverses unités additionnelles. L'érodeur est constitué d'un bras rotatif sur lequel sont fixées 6 buses projetant perpendiculairement à la surface du sol des jets d'eau de 0,5 mm de diamètre (figure 2a).

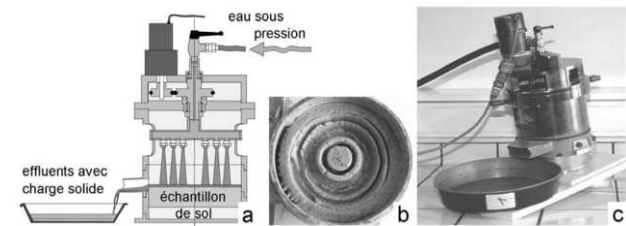


Figure 2. Dispositif du MoJET : (a) schéma de l'érodeur, (b) échantillon après essai et (c) image de l'érodeur.

La géométrie de cet appareil est relativement semblable à celle du dispositif de jet submergé mis au point par Hanson (1993, 2004). Toutefois, pour le MoJET, le sol n'est pas complètement submergé et le bras de l'érodeur sur lequel sont greffées les 6 buses tourne au cours de l'essai.

2.2.2 Procédure d'essai

La première étape de la procédure d'essai est d'amener l'échantillon à une densité donnée par compactage statique. Le moule contenant le sol est ensuite inséré dans l'appareil et sur une pente de 10% (figure 2c). Un exutoire en aval du dispositif permet de recueillir l'effluent. Le sol est ensuite soumis à l'action des jets d'eau avec les paramètres suivants :

- pression de l'air comprimé dans le réservoir d'eau : 20±2 kPa, imposant le débit,
- durée de l'expérience : 12 minutes avec recueil des effluents à 1, 2, 4, 8 et 12 minutes.

À la fin de l'essai, l'échantillon de sol présente des rainures situées au niveau de l'impact des jets d'eau (figure 2b).

Les effluents recueillis à différents temps de l'essai sont placés à l'étuve et la masse sèche érodée, suivie au cours du temps, permet de caractériser l'érosion (Pham 2008).

2.3 Matériaux testés

Différentes textures reconstituées de sol ont été testées afin de couvrir une grande variété de situations. Les textures sont faites à partir d'un mélange de sable, de limon et d'argile kaolinite, auquel est ajoutée une teneur en eau correspondant à 95% de l'optimum Proctor normal (ASTM 2005b). L'argile kaolinite a été utilisée car c'est une argile courante en France. Ces textures du sol sont positionnées sur le diagramme ternaire de USCS/LCPC (figure 3a). Les propriétés physiques sont présentées dans le tableau 1 et la granulométrie est indiquée sur la figure 3b.

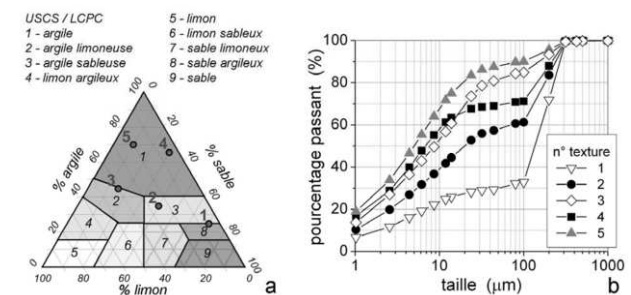


Figure 3. Textures testées : (a) diagramme ternaire et (b) granulométrie.

Tableau 1. Textures testées : composition et propriétés physiques.

texture	fraction massique (%)			teneur en eau (%)	densité sèche	limites d'Atterberg		
	argile	limon	sable			w _L (%)	w _P (%)	IP (%)
1	25	5	70	11	2.1	13.5	-	-
2	35	25	40	11	1.95	19.6	13.9	5.7
3	45	40	15	14	1.9	26.9	20.4	6.5
4	65	5	30	19	1.8	26.1	21.7	4.4
5	70	20	10	26	1.85	35.2	30.0	5.2

Il convient de noter que les échantillons sont compactés et non saturés puisque préparés à 95% de l'optimum Proctor normal. Ce choix a été fait dans cette étude car c'est l'état typique des matériaux pour les remblais routiers ou ferroviaires. Quoiqu'il en soit, l'objet du présent travail est de mettre l'accent sur la comparaison des deux essais, HET et MoJET, en utilisant différentes textures et non de proposer une étude détaillée de la sensibilité relative des sols à l'érosion.

3 RESULTATS ET COMPARAISONS

3.1 Essai d'érosion de trou (HET)

Les résultats des essais HET sont représentés sur la figure 4. Le taux d'érosion \dot{E} y est tracé en fonction de la contrainte de cisaillement à l'interface τ . Pour chaque texture de sol, les données expérimentales ont été obtenues à partir d'essais reproductibles et également pour différentes chutes de pression (Pham 2008, Pham et al. 2009).

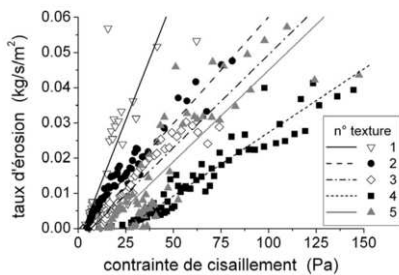


Figure 4. Données expérimentales et ajustements des essais HET.

Comme proposé dans un certain nombre d'études (Bonelli et al. 2006, Wan et Fell 2002, 2004), les données peuvent être approchées par une loi empirique linéaire de la forme :

$$\dot{E} = k_{er} (\tau - \tau_c) \quad (1)$$

où τ_c est la contrainte de cisaillement critique et k_{er} le coefficient d'érosion. Par la suite, ces coefficients permettent de caractériser le processus d'érosion se produisant dans le HET.

Les données expérimentales pour les échantillons de sol peuvent facilement être séparées et les essais HET permettent ainsi de bien discerner le comportement des différentes textures. En particulier, les textures 1 et 4 sont bien distinctes des textures 2, 3 ou 5 : la texture 1 présente clairement la plus grande sensibilité à l'érosion tandis que la texture 4 est la plus résistante. Soulignons que, bien que les textures 4 et 5 aient des propriétés comparables (notamment pour le contenu en argile), elles présentent une sensibilité à l'érosion fort différente.

3.2 Erodimètre à jets mobiles (MoJET)

Les résultats des essais MoJET sont représentés sur la figure 5 : masse érodée cumulée (figure 5a) et taux d'érosion, i.e. masse érodée par unité de temps (figure 5b) en fonction du temps. Les données expérimentales montrent une assez bonne répétabilité, même si l'essai reste relativement simple.

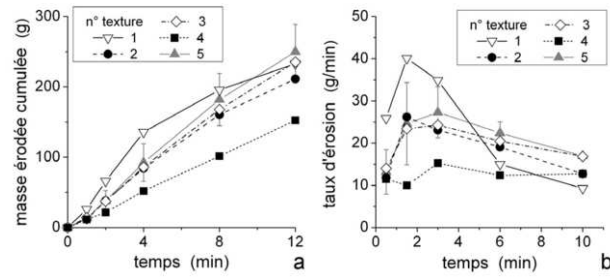


Figure 5. Données expérimentales des essais MoJET : (a) masse érodée cumulée et (b) taux d'érosion.

Les courbes de la figure 5b présentent deux phases. Dans un premier temps, il y a une augmentation du taux d'érosion qui correspond à l'initiation de l'érosion. Par la suite, ce taux diminue à mesure que les rainures (figure 2b) se creusent et donc que la contrainte appliquée sur la surface diminue. Comme observé avec le HET, les textures 1 et 4 sont bien distinctes des textures 2, 3 ou 5 : la texture 1 présente clairement la plus grande sensibilité à l'érosion et la texture 4 est la plus résistante.

3.3 Comparaison entre HET et MoJET

Les données obtenues avec le HET sont bien caractérisées. En particulier, la sensibilité à l'érosion peut être évaluée grâce à la contrainte critique de cisaillement et au coefficient d'érosion. S'agissant du MoJET, même si l'essai est simple d'emploi et le comportement des courbes d'érosion relativement facile à expliquer, la déduction de paramètres d'érosion explicites n'est pas aisée pour autant. Dans cette partie, nous avons donc cherché à relier les deux essais par une approche simple des mécanismes se produisant dans l'essai MoJET.

3.3.1 Coefficient d'érosion (HET) et taux initial d'érosion (MoJET)

L'un des deux paramètres caractérisant le HET est le coefficient d'érosion k_{er} . Lorsque l'érosion est pleinement avérée (i.e. pour des contraintes de cisaillement bien plus grandes que τ_c), ce coefficient reflète la capacité d'une élévation de contrainte à éroder encore plus le sol. C'est également le seul paramètre qui caractérise l'érosion loin de τ_c . La figure 6a représente le coefficient d'érosion obtenu pour les différentes textures.

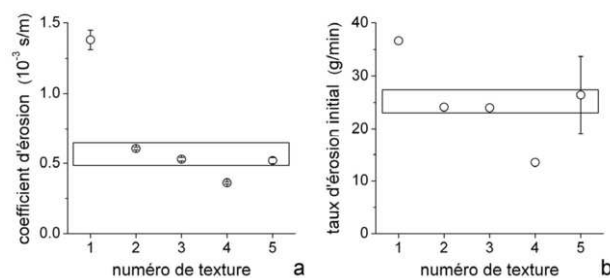


Figure 6. Comparaison des essais : (a) coefficient d'érosion (HET) et (b) taux d'érosion initial (MoJET).

Pour le MoJET, l'érosion est plus importante aux premiers temps de l'essai puisque les rainures sont alors peu profondes. Pour caractériser l'érosion « loin de la contrainte critique de cisaillement », nous avons donc choisi d'examiner le taux d'érosion au début de l'essai (ou « taux d'érosion initial »). Ce dernier est la moyenne du taux d'érosion entre 1 et 4 minutes (voir figure 5b). Comme noté précédemment, nous ne considérons pas les tout premiers stades de l'essai (i.e. la première minute) qui ne sont pas représentatifs de l'érosion. La figure 6b représente ces taux d'érosion initiaux.

La comparaison des figures 6a et 6b montre une bonne corrélation qualitative entre les résultats issus du HET et du MoJET. Un taux d'érosion initial (MoJET) plus élevé était attendu pour les forts coefficients d'érosion (HET) et c'est bien ce qui est observé. Ainsi, la texture 1 présente le coefficient d'érosion le plus élevé et le plus haut taux d'érosion initial alors que la texture 4 en présente les plus bas. De plus, dans les deux cas, les paramètres des textures 2, 3 et 5 ne sont pas clairement distincts.

3.3.2 Contrainte critique de cisaillement (HET) et masse érodée finale (MoJET)

Le deuxième paramètre caractérisant le HET est la contrainte critique de cisaillement τ_c . Elle représente la contrainte qu'il est nécessaire de dépasser pour éroder le sol. La figure 7a représente ce paramètre pour les différentes textures.

Pour le MoJET, l'efficacité de l'érosion diminue avec le temps puisque les rainures remplies d'eau sont plus profondes et que l'action des jets d'eau est donc de moins en moins importante. Si l'essai durait suffisamment, nous pourrions même nous attendre à ce que il n'y ait plus d'érosion, la contrainte sur les parois des rainures n'étant alors plus suffisante. Ainsi, la masse érodée cumulée finale (à 12 min dans le protocole MoJET) peut être liée à la contrainte critique de cisaillement. La figure 7b représente cette masse.

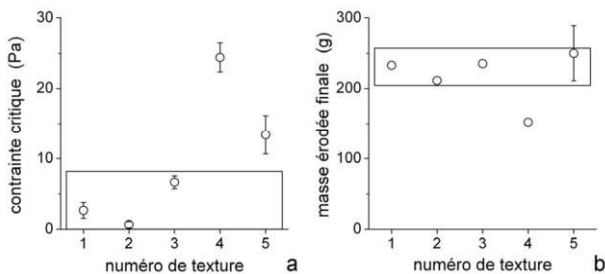


Figure 7. Comparaison des essais: (a) contrainte de cisaillement critique (HET) et (b) masse finale érodée (MoJET).

La comparaison des figures 7a et 7b montre une corrélation qualitative plutôt bonne entre les résultats issus du HET et du MoJET. Une masse érodée finale (MoJET) plus importante pouvait être attendue pour les contraintes critiques (HET) faibles et c'est ce qui est observé pour la plupart des textures. En particulier, il convient de noter que contrairement à la comparaison précédente (figure 6ab), les résultats de la texture 1 issus du MoJET et du HET ne sont pas distincts de ceux des textures 2 et 3. Cette observation valide en partie la distinction faite entre taux d'érosion initial et masse érodée finale pour le MoJET qui trouve sa correspondance dans celle faite entre coefficient d'érosion et contrainte critique pour le HET. Les résultats sur la texture 5 sont plus difficiles à interpréter et soulignent probablement certaines limites de cette comparaison.

4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous avons présenté dans le présent document, deux essais pour caractériser l'érosion des sols : l'essai d'érosion de trou (HET) et l'érodimètre à jets mobile (MoJET), ce dernier pouvant être employé *in situ*.

Après avoir utilisé ces deux essais sur différentes textures de sol et présenté les résultats, nous avons cherché à comparer les paramètres caractérisant l'érosion issus des deux essais.

Nous avons ainsi lié qualitativement d'une part le coefficient d'érosion issu du HET et le taux d'érosion initial issu du MoJET et d'autre part la contrainte de cisaillement critique issue du HET et la masse érodée finale issue du MoJET

Pour une meilleure comparaison entre les essais, un pas en avant serait probablement l'obtention d'un modèle physique décrivant les processus d'érosion intervenant dans le MoJET en vue d'obtenir des paramètres d'érosion quantitativement comparables à ceux du HET. Cela serait d'un grand intérêt puisque le MoJET permet de tester le sol dans son état réel et est plus pratique et facile à utiliser que HET.

Ces recherches devront permettre à terme de compléter les préconisations existantes de lutte contre l'érosion (CFG 2004, LCPC & SETRA 1992).

REMERCIEMENTS

Nous remercions J.L. Tacita pour l'aide précieuse apportée dans la mise au point et la mise en place des essais.

T.L. Pham a bénéficié d'une bourse de doctorat financée par le LCPC et le ministère français de l'équipement.

Ce travail a reçu le soutien financier de l'agence nationale de la recherche (ANR) au travers du programme « ERINOH ».

REFERENCES

- Arulanandan, K., Gillogley, E. & Tully, R., 1980. Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of natural undisturbed cohesive soils, Tech Rep. GL-80-5, U.S. Army Engineers, Waterways Exp. station, Vicksburg, MS EU.
- ASTM, 2005a. Standard test method for identification and classification of dispersive clay soils by the pinhole test, Annual book of ASTM standards, Vol. 04.08, D4647-93(Reapp98).
- ASTM, 2005b. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, Annual book of ASTM standards, Vol. 04.08, D698-00.
- Bendahmane, F., Marot, D. and Alexis, A., 2006. Experimental parametric study of suffusion and backward erosion, Journal of Geotech. and Geoenv. Eng., 134(1): 57-67.
- Bonelli, S., Brivois, O., Borghi, R. & Benahmed, N., 2006. On modelling of piping erosion, Comptes Rendus de Mécanique, 334(8-9), 555-559.
- CFG, 2004. Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion, www.cfg.asso.fr.
- Hanson, G.J., 1993. Soil erodibility testing, US Patent N° 5,243,850.
- Hanson, G.J., 2004. Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in situ, Applied Engineering in Agriculture, 20(4): 455-462.
- Hénensal, P. & Duchatel, F., 1990. L'érodimètre à jets mobiles, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 167: 47-53.
- Hénensal, P., 1993. Lutte contre l'érosion avant, pendant et après les travaux: Les protections végétales et structurelles des surfaces et des pentes, Etudes et recherches des LPC, Série Géotechnique GT54.
- LCPC & SETRA, 1992. Guide pour les Terrassements Routiers, Vol. 1 et 2.
- Perry, E. B., 1979. Susceptibility of dispersive clay at Grenada dam, Mississippi, to piping and rainfall erosion, Tech Rep. GL-79-14, U.S. Army Engineers, Waterways Exp. station, Vicksburg, MS EU.
- Pham, T.L., 2008. Erosion et dispersion des sols argileux par un fluide, Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Pham, T.L., Chevalier, C., Reiffsteck, P.; Duc, M. & Guédon, S., 2009. Improvement of hole erosion test and results on reference soils, in preparation.
- Reiffsteck, P., Pham, T.L., Vargas, R. & Paihua, S., 2006. Comparative study of superficial and internal erosion tests, 3rd International Conference on Scour and Erosion, Amsterdam.
- Sanchez, R.L., Strutynsky, A.I. & Silver M.L., 1983. Evaluation of the erosion potential of embankment core materials using the laboratory triaxial erosion test procedure, Tech Rep. GL-83-4, U.S. Army Engineers, Waterways Exp. station, Vicksburg, MS EU.
- Wan, C.F. & Fell, R., 2002. Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test, UNICIV Report, no. R-412.
- Wan, C.F. & Fell, R., 2004. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams, Journal of Geotech. and Geoenv. Eng., 30(4): 373-380.