Méthodologie pour l'étude de l'érosion interne sur les sols tropicaux

Marisaides Goutte-Lima* — José Camapum de Carvalho** — Roberto Marcio Macedo Santos***

* Laboratoire de Génie-Civil - CUST - Université Blaise Pascal, B.P.206 63174 Aubière cedex. mgoutte@cust.univ-bpclermont.fr

** Laboratoire de Géotechnique - Université de Brasilia 70910-900, Brasilia, District Fédéral, Brésil. camapum@unb.br

*** CAESB – Compagnie d'assainissement 70300-904, Brasilia, District Fédéral, Brésil. robertosantos@caesb.df.gouv.br

RÉSUMÉ. L'essai décrit dans cet article a été réalisé dans le cadre d'un projet national sur la prévention et le contrôle de l'érosion des sols tropicaux au Brésil. Il vise à détecter l'érosion interne affectant les ravinements. Ce phénomène dû à la dissolubilité des argiles, repérée à l'aide du Pinhole Test, est courant dans les sols riches en sodium. Cependant, les sols tropicaux sont quasiment dépourvus de cet élément chimique et, pour cela, on a procédé à une adaptation de l'essai. Ainsi, toutes les procédures définies par le Pinhole Test ont été respectées à cette exception près qu'à la fin de l'essai on a poursuivi la mesure du débit en réduisant la charge hydraulique. A l'appui de ces analyses complémentaires, portant sur le chargement mais aussi le déchargement hydraulique, cet essai a permis l'observation de deux phénomènes : la squelettisation du sol et l'éventualité de renard.

ABSTRACT. The test describes in this article was carried out within the framework of a national project on the prevention and the control of the erosion of the tropical soils in Brazil. It aims at detecting internal erosion affecting gullies. This phenomenon due to the dispersive clays, located using Pinhole Erosion Test, is common in the soils rich in sodium. However, the tropical soils are almost deprived of this chemical element and, for that, one carried out an adaptation of the test. Thus, all the procedures defined by Pinhole Test were observed with this exception close at the end of the test one continued the measurement of the flow thorough specimen by reducing the hydraulic gradient. In support of these complementary analyses, bearing on the loading but also hydraulic unloading, this test allowed the observation of two phenomena: the skeletization of the soil and the possibility of piping erosion.

MOTS-CLÉS : érosion interne, sols tropicaux, Pinhole Test, charge hydraulique. KEYWORDS: internal erosion, tropical soils, Pinhole Test, hydraulic gradient.

AUGC. 2006, pages 1 à 8

2 AUGC. 2006

1. Introduction

Dans les régions tropicales comme le Brésil, le processus d'érosion hydrique est la première cause de dégradation des sols. Le résultat de ce processus est la formation de grands ravinements (Figure 1), qui peuvent atteindre jusqu'à 20 m de profondeur. L'explication concernant la formation de ces ravins reste encore inconnue avec précision parce qu'il existe plusieurs phénomènes qui contribuent à son déclenchement, tels que : le déplacement des particules provoqué par l'impact des gouttes de pluie, le transport des particules du sol provoqué par écoulements diffus ou concentrés, le glissement des talus, la liquéfaction des matériaux de sol, l'affouillement de la base des talus et l'érosion interne, dont le phénomène de renard par exemple. Le phénomène de renard, connu aussi par le mot anglais "piping" est un processus d'érosion interne qui provoque l'arrachage de particules, ce qui conduit à la formation de tubes dans les massifs de sols et sur le fonds des ravins des sols tropicaux. Au Brésil, un tel phénomène est associé à la présence de la nappe phréatique. L'accumulation d'eau sur les bassins de dissipation provoque un régime d'écoulement intermittent qui peut déclencher le processus d'érosion interne dans les ravins. Guerra (1998) cite la formation de brèches (pipes) dans les parois de talus provoqués par le processus de lixiviation, sous certaines conditions géochimiques et hydrauliques. L'écoulement d'eau souterraine trouve des chemins préférentiels et courts dans ces brèches provoquant la désagrégation et le transport de sédiments et, par conséquent, l'effondrement du sol situé au-dessus de ces brèches, agrandissant les ravins. Cet article présente les résultats des essais qui ont été réalisés dans le cadre de la prévision de l'érosion interne sur les ravinements en sols tropicaux. Pour cela, on a utilisé le principe du Pinhole Test, conçu par Sherard et al. (1976).



Figure 1. Les ravins en sols tropicaux.

2. Pinhole Test

L'essai du Pinhole Test appelé aussi « Pinhole Erosion Test » consiste à faire s'écouler l'eau, sous une charge hydraulique donnée, par un trou d'un millimètre de

diamètre fait à travers l'échantillon cylindrique de sol, simulant le phénomène de "piping" ou renard (Figure 2). Les dimensions de l'éprouvette de sol sont de 50 mm de diamètre et 35,6 mm de longueur. La résistance à l'érosion est estimée par le diamètre final du trou, par la coloration de l'eau de sortie et par le débit de percolation. On remarque que l'idée originale de cet essai a été de vérifier la dissolubilité des argiles. Selon Sherard et al. (1976), le pinhole test est le meilleur essai pour l'identification des argiles dispersives comparé à d'autres essais de même type.



Figure 2. Schéma du Pinhole Test.

Comme dans les régions tropicales la présence des argiles dispersives est rare, on a procédé à une adaptation du Pinhole Test, pour la prévision du phénomène d'érosion interne dans ces sols, comme proposée par Santos (1997). On a ainsi respecté toutes les procédures décrites par Sherard et al. (1976) cependant, à la fin des essais, on a poursuivit les mesures de débit mais en réduisant le gradient hydraulique jusqu'aux conditions initiales. De cette manière on a une bonne visualisation de l'occurrence, ou non, du processus érosif ou de l'arrachage de particules dans ces échantillons, ce qui peut être obtenu avec les graphiques du débit en fonction de la charge hydraulique, selon l'échelle arithmétique (Figure 3). Tout d'abord, on a saturé l'échantillon de sol à l'intérieur du tube à essais à l'aide d'une pression de saturation minimum, environ 5 kPa, sans percolation d'eau pendant 24 h. Les essais ont débuté avec une percolation d'eau pendant 5 minutes sous une charge hydraulique de 5 cm. L'effluent est collecté, on y observe la présence ou non de particules ou la turbidité. Les valeurs de débit sont mesurées dans des intervalles de 30 secondes, 2 et 4 minutes. Après 5 minutes d'essai, la charge hydraulique est augmentée, passant à 18, 40 puis 102 cm, en suivant la procédure décrite ci-dessus. On a poursuivi les essais, mais à l'inverse : en diminuant progressivement le gradient hydraulique jusqu'aux conditions initiales. Ainsi, un éventuel élargissement du trou sera signalé par une augmentation de débit dans la phase de déchargement, c'est-àdire, pour un même gradient hydraulique, le débit dans le sens inverse sera plus grand et le sol sera classifié comme érodable.

4 AUGC. 2006



Figure 3. Mesures de débit en fonction du gradient hydraulique.

3. Ravins étudiés

Au Brésil, le problème d'érosion des sols est associé, dans la plupart des cas, au régime des pluies. La Figure 4 montre deux types de ravins étudiés situés dans le nord (Manaus, hauteur = 13m) et le centre-ouest du Brésil (District Fédéral, hauteur = 11m). Les origines de ces ravinements sont différentes car les caractéristiques physiques de ces deux régions sont également différentes. Due à caractéristiques régionales, les ravinements dans la ville de Manaus sont en forme d'amphithéâtre (Figure 4) et sa formation est donnée par des chutes de blocs.



Figure 4. Localisation des ravins étudiés dans le nord et centre-ouest du Brésil.

Au centre-ouest du Brésil, où se trouve la capitale Brasilia, les sols ont subi un niveau d'altération plus élevé que celui de la ville de Manaus. Les ravinements sont plutôt en forme de « V » due aux caractéristiques géologiques de la région (Mortari 1994). Afin de vérifier l'influence de l'écoulement d'eau près du bord de ces ravins, dans ce ravinement (Figure 4) on a prélevé des échantillons de sol en profils près du bord et en profils plus éloignés du bord.

4. Résultats et analyses

4.1. Nord du Brésil

Le tableau 1 montre les caractéristiques du profil de sol du ravin de Manaus. On observe que ces sols sont moyennement plastiques et que sa plasticité diminue avec la profondeur. Les analyses granulométriques ont été réalisées avec et sans le dispersant car cela nous permet de vérifier la stabilité des agrégats (limon + argile) en présence d'eau. On remarque que ces agrégats sont résistants en présence d'eau et qu'il y a une inversion entre les quantités de limon et d'argile.

Prof.		W_L	WP	I_P	Avec dispersant (%)				Sans dispersant (%)		
(m)	e	(%)	(%)	(%)	gravier	sable	limon	argile	sable	limon	argile
1	0,94	61,5	40	21,5	25	38,5	10,5	26	50	19	6
3	0,79	46,3	30,1	16,2	1	61	10	28	57	29	13
5	0,61	35,4	23,2	12,2	1	49,5	13,5	36	52	35	12
7	0,61	27,0	17,1	9,9	0	60	7	33	63	25	12
9	0,59	24,2	20	4,2	0	55	13	32	55	44	1

Tableau 1. Résultats de la caractérisation physique - Ravin Manaus.

Les essais Pinhole ont été réalisés aux profondeurs de 3 m, 7 m et 9 m sur des échantillons de sols non remaniés. De façon aussi à vérifier une éventuelle anisotropie dans les échantillons, surtout par rapport à la direction préférentielle d'écoulement, les essais ont été réalisés dans les directions horizontales et verticales par rapport à l'axe des échantillons non remaniés. La Figure 5 montre les graphiques comparatifs à chaque profondeur. On observe que dans les profondeurs de 7 et 9 m, les valeurs de débit dans la phase de charge et décharge sont constantes pour la direction horizontale. Cependant, à la direction verticale, on note une augmentation du débit pendant le déchargement, ce qui indique la présence d'érosion interne ou de dégradation interne. Si on compare tous les graphiques, on observe qu'à 3 m de profondeur, le débit dans la direction verticale est inférieur au débit dans la direction horizontale, à 7 m, elles sont quasi identiques et à 9 m, le comportement est inverse à celui observé pour la profondeur de 3 m. Il faut remarquer que pendant la phase de chargement, l'augmentation du débit en fonction du gradient hydraulique augmente avec la profondeur. D'après le tableau 1, à 3 m on constate que e = 0,79, à 7 m (e =(0,61) et à 9 m (e = 0,59), ce qui montre dans un premier temps que ces variations de débit peuvent être liées aux indices de vides et dans un deuxième temps qu'en surface, le sol a été plus lessivé et altéré à cause des nouvelles conditions d'écoulement établies par le ravinement.



Figure 5. Essais de Pinhole pour le ravin de Manaus

4.2. Centre-Ouest du Brésil

La Figure 6 montre la variation de la granulométrie au long du bord du ravinement dans le District Fédéral. D'après Lima et al. (2004), les profils de granulométrie soulignent la nature plus sableuse des couches de sol à plus grandes profondeurs et présentent des caractéristiques non plastiques.



Figure 6. Teneurs de sable et argile distanciés du bord – Ravin District Fédéral

En analysant la distribution de teneur de sable en fonction de la distance du bord, on observe qu'elle augmente à proximité du bord, alors qu'on remarque une diminution de la teneur en argile dans ce même secteur. Ces résultats indiquent qu'il y a un arrachement de particules fines en direction des talus du ravin, rendant le sol

7



plus sableux près du bord. De plus, la profondeur de la nappe phréatique est rabaissée près du bord aidant ainsi l'altération du sol.

Figure 7. Essais de Pinhole Test pour le ravin – District Fédéral

Dans la Figure 7 on compare les résultats aux mêmes profondeurs pour les deux puits près du bord, à 5 m de distance (P1) et plus éloignée, à 10 m (P2). On remarque que dans la direction horizontale, le puits 1 présente de plus grandes valeurs de débit par rapport au puits 2. A la profondeur de 5 m (Puits 1), on vérifie bien que le débit dans la direction horizontale est beaucoup plus élevé que dans la direction verticale, ce qui montre le processus de squelettisation près du bord de ce ravinement. Ceci a été remarqué, seulement, lors des essais selon la méthode proposée car on n'a pas observé une augmentation du trou de 1 mm fait sur

8 AUGC. 2006

l'échantillon comme prévu dans l'essai conventionnel. De plus, pour le puits 1, les valeurs de débit sont plus élevées dans la direction horizontale que dans la direction verticale, tandis que pour le puits 2 on note le contraire. Si on analyse la géomorphologie locale, on vérifie qu'originalement (avant la formation du ravin), la percolation d'eau était en prédominance verticale. Ainsi, alors qu'on pouvait s'attendre à ce que les valeurs de débit dans la direction verticale soient plus élevées (processus de lixiviation naturelle), ce n'est pas le cas pour le puits 1, à cause de la formation du ravin et le rabaissement de la nappe phréatique près du même. Cependant pour le puits 2, il y a encore prédominance de percolation dans la direction verticale, ce qui confirme l'hypothèse ci-dessus.

5. Conclusions

Pour le ravin de Manaus, on a remarqué la possibilité de lixiviation dans la direction verticale, ce qui peut contribuer à l'apparition de phénomènes d'affouillement sur les bases des ravins dans la région. Les résultats pour le ravin de District Fédéral reflètent l'importance de l'altération du sol près du bord des ravins sur le comportement hydraulique du sol. On a observé que les valeurs de débit étaient plus élevées près du bord, dans les deux directions, pour toutes les profondeurs analysées. Les plus grandes valeurs de débits registrés indiquent un processus de squelettisation du sol dû à la percolation. Le Pinhole Test basé sur l'augmentation et la diminution du gradient hydraulique a permis de mettre en évidence un autre mécanisme important pour les processus évolutif de ces ravinements, le phénomène de la squelettisation, remarqué dans la différence entre les deux graphiques (chargement et déchargement), pour les sols érodables. Au niveau pratique, ces constatations sont très importantes car elles amènent à des ruptures de talus avec la détérioration du massif.

6. Bibliographie

- Guerra A.J.T., *Processus érosifs sur les pentes. Géomorphologie: actualisation de bases et concepts* (in portugais), A.J.T. Guerra & S.B. Cunha (eds.), Bertrand Brésil, Rio de Janeiro, RJ, 1998.
- Santos R.M.M., Caractérisation Géotechnique et analyse du processus évolutif de ravins dans la ville de Goiânia (in portugais). Mémoire de Master en Géotechnique, Université de Brasilia, District Fédéral, Brésil, 1997.
- Sherard. J.L., Dunnigan L.P., Decker R.S., Steele E.F., "Pinhole test for identifying dispersive soils", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, vol. 102, n° 1, 1976, p. 69-85.
- Lima, M.C., Camapum de Carvalho, J., Marot, D., "Etudes des propriétés géotechniques près des ravins au Centre Ouest du Brésil », *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering Geo-Beirouth*, Beirut, 19-22 mai 2004, Liban, pp. 697-702.