MIGRATION DE PARTICULES DANS UN MILIEU POREUX : EROSION INTERNE

A. Alem, S. Alhaddad, A. Benamar, H. Wang

Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences Quai Frissard, BP 540, 76058 Le Havre cedex, France.

abdellah.alem@univ-lehavre.fr, saharm20032002@yahoo.fr

RÉSUMÉ. L'érosion interne est un mécanisme majeur responsable des instabilités des ouvrages en terre de retenue d'eau. Les mécanismes responsables de l'érosion interne sont complexes, évolutifs et dépendent de plusieurs paramètres qui peuvent être couplés.

Le processus de migration des grains, lors d'un écoulement, dans la matrice granulaire est l'un des mécanismes d'érosion interne puisqu'il intervient à la fois avec le transport des particules arrachées lors de l'érosion mais aussi en amont par les modifications des conditions hydrodynamiques dues au colmatage des éléments drainant. Ce processus est très complexe et est encore loin d'être complètement compris.

Le présent article présente les premiers résultats d'essais pour l'évaluation d'une procédure expérimentale permettant de suivre l'érosion interne. Des éprouvettes de sols reconstitués sont sollicitées hydrauliquement et mécaniquement. L'érosion interne est suivie par la mesure de l'évolution des caractéristiques hydrauliques et la quantification ainsi que la caractérisation des matières en suspension évacuées. Les essais mécaniques permettent d'évaluer les conséquences sur les caractéristiques mécaniques du milieu.

ABSTRACT. Internal erosion is a major mechanism responsible for instabilities of earthworks. The mechanisms responsible for internal erosion are complex, evolutionary and depend on several parameters which can be coupled.

The process of migration of the grains, during a flow, in the granular matrix is one of the mechanisms of internal erosion since it intervenes not only with the transport of the particles torn off during erosion but also with the modifications of the hydrodynamic conditions due to the drainage clogging of the elements. This process is very complex and is still far from being completely understood.

This article shows the first test results for an experimental procedure making it possible to follow internal erosion. Test-tubes of reconstituted soils are hydraulically and mechanically tested. Internal erosion is followed by the measurement of hydraulic characteristics and quantification as well as the characterization of evacuated suspended particles. Mechanical tests make it possible to assess the consequences on mechanical characteristics of the medium.

MOTS-CLÉS : migration de particules, érosion interne, étude expérimentale.

KEYWORDS: migration of particles, internal erosion, experimental study.

XXIV^{émes} Rencontres Universitaires de Génie Civil

1. Introduction

L'érosion interne est un mécanisme majeur des instabilités constatées sur les ouvrages en terre de retenue d'eau. Ce mécanisme comporte deux processus principaux : l'arrachement des particules et leur déplacement. Son développement progressif dans le temps et dans l'espace, sa non-homogéneité due à l'hétérogénéité des sols naturels rend ce phénomène complexe et difficile à mettre en évidence et à interpréter (Monnet, 1998 et Skempton et Brogan, 1994). Le processus d'arrachement des particules se manifeste au niveau de la structure sous la forme d'érosion régressive, de débourrage ou de boulance. Le phénomène de transport agit lui par développement du phénomène de renard ou de suffusion.

Le renard représente la formation d'un cheminement préférentiel d'écoulement, le long duquel sont groupés un certain nombre de points faibles, où des courants de filtration commencent à se concentrer. Des particules sont expulsées du milieu, et le volume solide total du milieu décroît. Ce phénomène évolue très rapidement jusqu'à la formation d'un conduit continu.

L'action de suffusion commence par le déplacement de particules fines à l'intérieur de la matrice granulaire. Dans cette situation, certaines particules en mouvement peuvent être piégées après une certaine distance dans les vides formés par un squelette de particules plus grossières ; ce qui se conduit à une diminution de la porosité et implicitement de la perméabilité du milieu dans la zone de blocage et à une augmentation de ces mêmes paramètres dans la zone d'entraînement (Barakat, 1991). Des études ont montré que la suffusion peut être un mécanisme d'effondrement des sols à condition qu'ils possèdent une structure apte à cet effet (Ayadat et al. 1998).

L'érosion interne englobe ces différents types d'actions qui peuvent avoir lieu au même endroit et en même temps, ce qui rend leur distinction difficile.

Le travail de recherche entrepris dans le cadre de cette problématique vise à améliorer les connaissances et à mieux cerner la dynamique de l'érosion interne. L'étude de l'initiation et le développement de l'érosion interne sont menés sur des matériaux constitués soit d'un mélange de sable-fines ou de billes de verre-fines. A partir d'une étude paramétrique, on cherche à évaluer l'influence de différents paramètres (granulométrie du matériau constituant la matrice, granulométrie des fines, densité des fines, pourcentage de fines, état de compacité, gradient hydraulique...) sur le processus de migration de particules dans la matrice granulaire. L'érosion interne est suivie par des mesures en continu des caractéristiques hydrauliques des sols reconstitués et la quantification ainsi que la caractérisation granulométriques des particules expulsées. A la fin des essais hydrauliques, des essais mécaniques complétés d'une analyse granulométrique d'échantillons prélevés soigneusement à différents horizons dans l'éprouvette sont effectués. Cet article présente les premiers résultats d'essais réalisés pour la validation de cette démarche expérimentale.

2. Matériaux, montage expérimental et essais

2.1 Matériaux de l'étude

Les essais ont été menés sur des matériaux reconstitués : des matériaux modèles artificiels constitués de mélange de billes de verre de 1 mm de diamètre avec des particules fines (inférieures à 80μ m) et des matériaux constitués de mélange de sable avec des particules fines. Le sable utilisé est un sable lavé de Seine, sa courbe granulométrique est donnée sur la figure (1). La courbe granulométrique obtenue par Sédimentométrie des particules fines (< 80μ m) est représentée sur la figure (1). La partie limoneuse des fines représente 30% et le pourcentage des particules fines inférieures à 2 microns représente 14%.



Figure 1. Courbe granulométrique des particules fines et sables étudiés

2.2 Matériels et procédure d'essais

Les essais ont été réalisés avec un perméamètre à charge constante (figure (2)). Les éprouvettes sont réalisées à partir d'un mélange de matériaux de base (sable S + particules fines PF ou billes de verre BV + PF). Après la préparation de la gâchée bien homogénéisée, on place celle-ci dans un moule cylindrique (Fig.2), par compactage ou non, de plusieurs couches au moyen d'un dispositif de compactage décrit dans Ayadat et al. (1996). La hauteur de chute de ce dispositif est de 10cm et la masse du mouton est de 152g.

Le moule cylindrique équipé de piézomètres répartis sur sa longueur, d'un diamètre de 9 cm et d'une longueur de 24 cm, est fermé à ses deux extrémités par des couvercles. L'une des deux extrémités comporte un ajutage qui sert à l'évacuation des eaux et l'autre est raccordée à un réservoir d'eau. Des filtres coiffent l'échantillon sur ses deux faces à l'intérieur du moule. L'eau évacuée est collectée dans un réservoir.

L'échantillon est saturé horizontalement sous une charge hydraulique de très faible hauteur (quelques cm) pour ne pas créer de mouvement de particules dans le milieu poreux avant le début de l'essai. L'essai consiste ensuite à maintenir un écoulement

d'eau à travers l'échantillon, sous une charge fixe, pendant une durée bien déterminée. Pour suivre l'érosion interne, on effectue les mesures suivantes : -le débit à la sortie

- -la turbidité instantanée des eaux évacuées,
- -le volume d'eau dans le réservoir de collecte.

-la turbidité des eaux collectées,

- -la granulométrique des particules évacuées,
- -les hauteurs d'eau dans les piézomètres.

Après chaque essai, on laisse le sol se stabiliser pendant un certain temps. Ensuite, l'échantillon est divisé en cinq couches qui sont pesées après un prélèvement représentatif pour la détermination de la teneur en eau de chacune d'entre elles.

Après tamisage humide du sol de chaque couche à travers le tamis 0,08mm et séchage dans une étuve du refus, on calcule le pourcentage PF des particules fines ($<80\mu$ m) se trouvant dans chaque couche.

Les essais ont été effectués sur des matériaux ayant des pourcentages de particules fines différents, ainsi que des énergies de compactage et des charges hydrauliques correspondants à des vitesses initiales (Vin) d'écoulement dans l'échantillon différentes.



3. Résultats et analyse

3.1 Evolution de la perméabilité du milieu

L'évolution de la perméabilité des échantillons sollicités hydrauliquement est représentée sur les figures (3) et (4).

Pour toutes les éprouvettes constituées de billes de verre, la perméabilité diminue légèrement avec le temps et indique peu de blocage de particules fines mises en mouvement dans la matrice granulaire.

Les particules arrachées par l'écoulement sont presque totalement évacuées à l'extérieur de l'éprouvette comme le confirment les masses importantes des matières en suspension dans les eaux collectées (Fig. (5)).

Pour les éprouvettes constituées de sable, la perméabilité diminue fortement avec le temps et indique la formation de zones de blocage dans les échantillons. On note en même temps que les masses des particules drainées à l'extérieur des éprouvettes sont très faibles comparées à celles observées dans les essais sur les éprouvettes de billes de verre (Fig. (6)). Ces comportements très distincts sont liés essentiellement à la structure porale très différente des deux milieux. La granulométrie étalée du sable fait que le milieu contient beaucoup de très petits pores dans lesquels des particules fines mises en mouvement par l'écoulement peuvent être piégées.

Pour un même milieu, la chute de la perméabilité est plus importante lorsque la vitesse d'écoulement est plus faible. En effet, une vitesse d'écoulement élevée favorise l'arrachement et le transport de particules mises en suspension et leur drainage en dehors de l'éprouvette. Le phénomène de colmatage se trouve ainsi réduit.



Figure 3. Perméabilité du milieu en fonction du temps pour différentes Vitesses initiales (BV+PF (5%))



Figure 4. Perméabilité en fonction du temps pour différentes Vitesses initiales, (S, PF 10%, 10 coups)

Vin : Vitesse initiale (cm /s). *Ec* : Energie de compactage.

3. 2 Evolution du débit solide

La masse des fines évacuées par unité de temps, notée débit solide, est obtenue en multipliant la concentration en matières en suspension (MES) dans les effluents par le débit liquide traversant l'échantillon. Les figures (5) et (6) donnent l'évolution des débits solides en fonction du temps dans les billes de verre et le sable, pour différentes vitesses initiales du flux. On peut faire les remarques suivantes :

Dans le cas des éprouvettes avec billes de verre, le débit solide, très important en début d'essai, diminue très rapidement avec le temps pour atteindre un palier dont la valeur dépend de la vitesse de l'écoulement. Des matières en suspension continuent à être expulsées à l'extérieur de l'éprouvette avec un débit correspondant au palier.

Dans les éprouvettes constituées de sable, les débits solides en début d'essai sont nettement moins importants que ceux constatés sur les éprouvettes de billes de verre

et diminuent plus lentement pour tendre vers des paliers qui dépendent de la vitesse du flux. Les débits solides mesurés aux paliers sont très faibles et on peut considérer que l'érosion du milieu est terminée.





Figure 5. Evolution du débit solide en fonction du temps pour différentes Vitesses initiales (BV+PF (5%))

Figure 6. Evolution du débit solide en fonction du temps pour différentes Vitesses initiales, (S, PF 10%, 10 coups)

L'influence de la variation de la vitesse d'écoulement dans les échantillons, pour différents pourcentages de fines et différentes énergies de compactage, sur le débit solide maximal est montrée sur les figures (7) et (8).



Pour tous les essais, le débit solide maximal augmente avec la vitesse d'écoulement. En effet, une vitesse d'écoulement élevée favorise l'arrachement et le transport de particules mises en suspension et leur drainage en dehors de l'éprouvette. Les courbes semblent indiquer l'existence d'une vitesse critique en dessous de laquelle il n'y a pas érosion du milieu. Des essais complémentaires ciblés sur l'initiation de l'érosion sont nécessaires pour confirmer ces observations.

Les résultats d'essais sur les échantillons de billes de verre montrent clairement qu'il y a une dépendance entre le débit solide maximal et le pourcentage initial des fines. .Pour une même vitesse d'écoulement, le débit solide maximal augmente avec le pourcentage initial de particules fines.

D'après la figure (8), on remarque que l'état initial de compacité du sol a une influence sur le processus d'érosion interne du milieu et ceci quelque soit la vitesse

d'écoulement. Les particules fines se déplacent facilement et en grande quantité lorsque le sol est à l'état lâche (Ec=0 coups). Ce déplacement devient de plus en plus difficile lorsque le sol passe d'un état lâche à un état relativement compact (Ec=30 coups). Donc, on peut dire que le compactage réduit l'érosion interne du sol à cause de sa faible porosité et parce que la migration des particules à travers la structure devient faible.

3.3 Evolution de la masse solide érodée

Les influences de la vitesse initiale de l'écoulement, du pourcentage initial de fines et de l'énergie de compactage sur les masses solides érodées sont montrées sur les figures (9), (10), (11) et (12).



en fonction du temps pour différentes Vitesses initiales (BV, PF (5%))

Figure 10. Evolution de la masse solide en fonction du temps pour différentes Vitesses initiales, (S, PF 10%,10 coups)

Pour l'ensemble des essais, la masse solide érodée croit, après quelques minutes, de manière quasi-linéaire avec la racine du temps ; les courbes peuvent être représentées par des droites surtout pour les faibles vitesses d'écoulement.

Pour un même milieu, la masse solide cumulée augmente avec la vitesse d'écoulement comme le montre les figures (9) et (10). En effet, comme il a été indiqué précédemment, une vitesse d'écoulement élevée favorise l'arrachement et le transport de particules et leur drainage en dehors de l'éprouvette.



Figure 11. Evolution de la masse solide en fonction du temps pour différentes PF % (BV, Vin=0.857 (cm/s))

PF: pourcentage des fins.



Figure 12. Evolution de la masse solide en fonction du temps pour différentes Ec (S, PF 10 %, Vin=0.146 (cm/s))

La figure (11) montre clairement qu'il y a une dépendance entre la masse solide érodée et le pourcentage initial des fines. La masse solide érodée est d'autant plus importante que la quantité de particules fines, contenue dans la granulométrie initiale du sol est élevée.

La figure (12) confirme l'influence de l'état initial de compacité du sol sur l'érosion interne. En effet le compactage rend plus difficile le déplacement des particules à travers la structure du sol réduisant ainsi la masse solide érodé.

4. Conclusion

Nous avons présenté quelques résultats de premiers essais suivant une démarche expérimentale qui permet d étudier le phénomène d'érosion interne. Cette procédure s'appuie sur le suivi des caractéristiques hydrauliques du matériau étudié et l'estimation de la masse solide érodée ainsi que sa caractérisation granulométrique. Les résultats de ces essais, bien que partiels, permettent de valider cette démarche. Le rôle de certains paramètres prépondérants dans le processus d'érosion a été mis en évidence. Une étude paramétrique, suivant cette procédure, est en cours pour la caractérisation de l'initiation et le développement de l'érosion interne.

5. Bibliographie

MONNET A. (1998) «Boulance, érosion interne, renard. Les instabilités sous écoulement» Revue Française de géotechnique, N° 82, p.3-10.

SKEMPTON A. W., (1994) « Experiments on piping in sandy gravels » *Géotechnique*. vol.44, N°3, p.440-460.

BARAKAT B. (1991) « Instabilité aux écoulements des milieux granulaires, aspects morphologiques et probabilistes » *Thèse Ecole centrale de paris*, p 135.

AYADAT. T; BELOUAH. B; AÏT AMMAR. R (1998) « La migration des particules fines comme approche d'explication du mécanisme de l'effondrement des sols » *Revue Française de Géotechnique*, N°83.

ALHADDAD S. (2005) « Etude de la migration de particules dans un milieu poreux et son rôle dans l'érosion interne » *Master recherche Université du Havre*, p.60.

AYADAT T.; BENSALEM A.; BENKERRI A. (1996) « Traitement d'un sol affaissable par la chaux » *Revue Française de Géotechnique*, N°77.