

Caractérisation d'un milieu poreux colmaté par la méthode du potentiel spontané

S. TAOUDIAT^a, N-D. AHFIR^a, A. JARDANI^b, H-Q. WANG^a, J-P. DUPONT^b

a. Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC)-UMR 6294 CNRS - Université du Havre, 53 rue de Prony BP 540 76058 Le Havre cedex – France

b. Morphodynamique Continentale et Côtières (M2C) -UMR 6143 CNRS - Université de Rouen, Bât. IRESE A, Place Emile Blondel, 76821 Mont-Saint-Aignan Cedex – France

Résumé :

Une étude expérimentale a été réalisée au laboratoire pour caractériser le colmatage d'un milieu poreux. Les expériences consistaient à injecter des particules argileuses en suspension dans une colonne remplie de sable saturé. Les suspensions de concentrations différentes ont été injectées à une vitesse d'écoulement constante. Les effets hydrodynamiques qui résultent de l'endommagement du milieu poreux ont été étudiés. Dans ce travail, la sensibilité de la méthode du potentiel spontané (PS) a été testée pour caractériser la filtration des particules en suspension dans le milieu poreux. Les résultats montrent que le signal PS est sensible au dépôt des particules dans le milieu poreux ainsi qu'à leur distribution dans l'espace poral. Les mesures avec la méthode PS confirme le comportement du milieu poreux obtenu par les mesures hydrauliques.

Abstract:

Laboratory experiments are performed on the physical clogging of a porous medium by injecting polydispersive suspended particles in a column filled with sand. The suspended particles were injected at constant flow velocity. Hydrodynamic effects on particles deposition and porous medium damage were investigated. In this study, the sensitivity of the self-potential (SP) method was tested to characterize the suspended particles filtration in the porous medium. Results showed that SP signal is sensitive to clay particle deposition and to their distribution in the porous space. SP method confirmed the behavior of the porous medium clogging obtained by the hydraulic measurements.

Mots-Clefs : milieux poreux, colmatage, rétention, perméabilité, potentiel spontané.

1 Introduction

L'étude des processus de mobilisation, transport et dépôt de particules solides dans un milieu poreux représente un sujet de recherche important dans différents domaines d'ingénierie et applications industrielles. Les particules transportées par un écoulement peuvent se déposer à différents horizons du milieu poreux traversé et provoquer son colmatage. La conséquence directe est une chute de la perméabilité du milieu ([1], [7]).

Les études antérieures montrent que la circulation de l'eau dans un milieu poreux génère un courant électrique [3]. Ce courant-source est responsable d'un champ électrique dont la signature est mesurable à la surface. La mesure de ce potentiel spontané est attractive car le champ électrique présent naturellement dans les sols a une origine dynamique qui résulte d'un déséquilibre hydraulique (écoulement) ou chimique (diffusion, réactions chimiques). Ces observations font que ce potentiel présente un grand intérêt hydrogéophysique ([6], [10]).

L'objectif de ce travail est d'étudier le phénomène de colmatage d'un milieu poreux saturé. Des expériences de traçage dans une colonne de laboratoire remplie de sable ont été réalisées par l'injection en continue de particules argileuses en suspension à vitesse constante. Les effets hydrodynamiques qui résultent de l'endommagement du milieu poreux ont été étudiés. La sensibilité de la méthode du potentiel spontané (PS) a été testée pour caractériser la filtration des particules en suspension dans le milieu poreux.

2 Matériel et méthodes

L'étude du phénomène de colmatage d'un milieu poreux au laboratoire se fait, généralement, par la méthode d'injection en continue de particules en suspension (PES) dans des colonnes de petites dimensions ([2], [5], [8], [9]). Dans la présente étude, le dispositif expérimental est composé d'une colonne en plexiglas d'une longueur de 30,7 cm et un diamètre de 4 cm. La colonne est fendue en deux coques : la première est équipée de piézomètres pour mesurer la variation de perméabilité (pression) et la seconde est munie d'électrodes (Cu / CuSO₄) pour les mesures du potentiel spontané (PS) dans le milieu poreux. Deux réservoirs sont placés en amont de la colonne et reliés par une vanne à deux voies permettant le passage de d'eau déminéralisée (pH = 6.9 ± 0.2) et de la suspension de particules (réservoir de PES). Une pompe péristaltique est utilisée pour assurer un débit constant pour chaque essai. L'enregistrement des signaux PS se fait à l'aide d'une centrale d'acquisition (DATAQ® INSTRUMENT, DI-710) dotée de plusieurs canaux permettant de mesurer les différences du potentiel.

La colonne est placée en position verticale est équipée de huit piézomètres et cinq électrodes positionnés comme le montre la figure 1.

Pour étudier le phénomène de colmatage, on a utilisé un sable de la Seine (Normandie, France) sélectionné dont la granulométrie est comprise entre 630-800 μm. La porosité totale et la perméabilité moyenne du sable sont, respectivement, 38% et $K_0 = 2 \times 10^{-3}$ m/s.

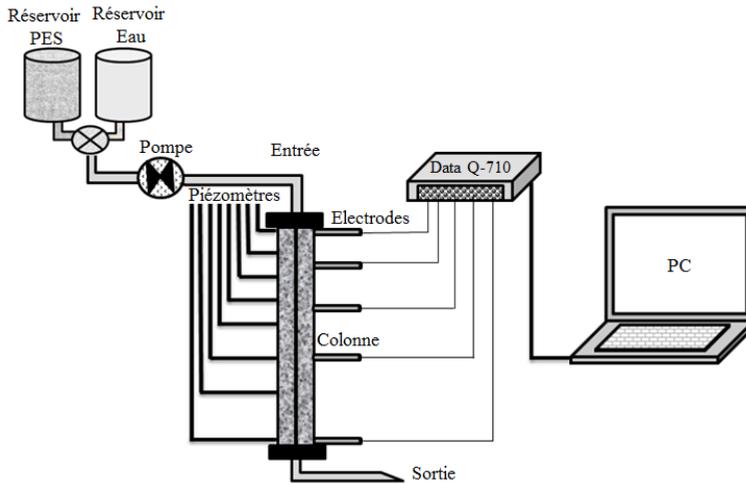


FIG.1-Schéma du dispositif expérimental

Les particules en suspension utilisées sont des particules naturelles d'argile (Kaolinite P300) de taille inférieure à $40\mu\text{m}$. Les expériences ont été réalisées à débit constant (50 ml/min), soit un nombre de Reynolds $Re = 0,73$. Trois concentrations de PES ont été testées dans ce travail : 2g/l , 3g/l et 5g/l . Au cours des essais de traçage, des mesures piézométrique (perméabilité) et électriques (PS) ont été réalisées. A la fin des essais d'injection, le milieu poreux est découpé en sept tranches (sol entre deux piézomètres consécutifs) afin de mesurer la rétention des particules dans le milieu poreux.

3 Caractérisation hydro-électrique du milieu poreux

3.1. Endommagement du milieu poreux

La figure 2 présente les profils de la rétention σ (Fig.2a) et de la perméabilité relative K/K_0 (Fig.2b) pour les différentes concentrations de particules injectées (2g/l , 3g/l , 5g/l) à la fin des essais de traçage. La rétention globale σ est définie comme le rapport entre la masse de particules déposées et la masse du sable qui constitue le milieu poreux. Les résultats montrent que la distribution du dépôt est non uniforme entre l'entrée et le reste de la colonne pour les trois concentrations (Fig.2a). Le dépôt est plus important dans les cinq premiers centimètres du milieu ce qui indique que l'essentiel de la filtration se fait à l'entrée immédiate de la colonne. La rétention augmente avec la concentration de la suspension injectée.

L'évolution de la charge hydraulique dans les piézomètres au cours des essais de traçage, nous a permis de suivre l'évolution de la perméabilité (K) le long de la colonne en fonction de la concentration des particules en suspension injectées. La figure 2b synthétise l'évolution de la perméabilité relative (K/K_0 ; K_0 étant la perméabilité initiale

du milieu poreux) le long de la colonne à la fin de l'injection. En raison de la forte rétention (dépôt) à l'entrée de la colonne, la perméabilité chute de 70% pour l'essai à 5g/l et 35 % pour les deux autres concentrations (2 et 3 g/l). A la sortie de la colonne, la réduction de la perméabilité est peu modifiée pour l'essai à 2 g/l, mais elle reste importante pour les deux autres essais. Le suivi du profil de perméabilité, dans le milieu en cours de l'injection, nous renseigne de manière précise sur l'évolution spatiale et temporelle du dépôt et de la dynamique de colmatage du milieu poreux.

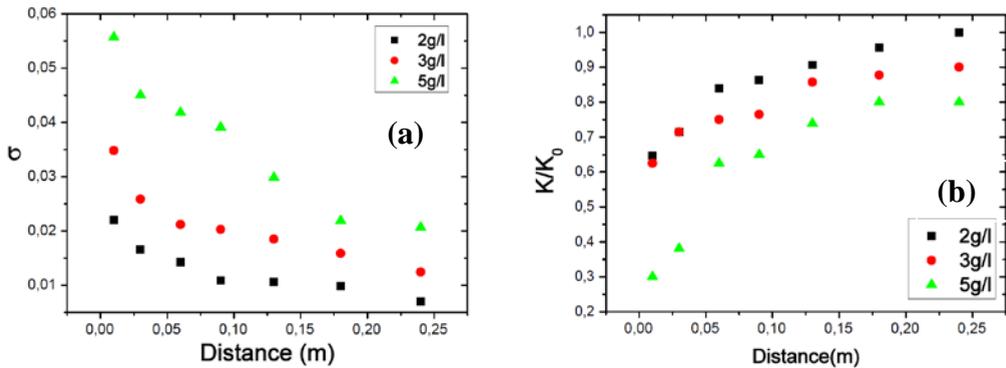


FIG. 2 – Profils de la rétention σ (a) et de la perméabilité relative K/K_0 (b) à la fin de l'essai

3.2. Application de la méthode du potentiel spontané

La circulation de l'eau dans le milieu poreux est responsable d'un courant électrique source appelé courant d'électrofiltration. Le potentiel spontané (PS) est la mesure passive, à la surface du milieu poreux, de la distribution du potentiel électrique naturellement présent dans le sol ([11], [12]).

Dans cette étude, la distribution du potentiel spontané montre qu'il est élevé à l'entrée immédiate de la colonne où le dépôt des particules est important. Il atteint +16 mV pour l'injection à 2g/l et il est à -20 mV pour la suspension à 5g/l.

Comme le montre la figure 3a, la distribution de la PS suit la même évolution que la rétention en fonction de la suspension injectée. Cela montre que le potentiel mesuré dépend essentiellement de la fraction argileuse contenue dans le milieu poreux.

La figure 3b résume l'évolution du signal électrique mesuré par la première électrode (entrée de la colonne) en fonction du temps. La distribution du signal PS évolue suivant trois phases. La première phase correspond à la zone avant l'injection des particules d'argile (eau seule). La deuxième phase correspond au moment de la détection des particules injectées. Enfin, la troisième phase représente la phase durant l'injection de la

suspension de particules. Cette progression par phase n'est pas observée dans la lecture hydrique qui est représentée par une simple chute de la perméabilité.

On peut noter que la mesure électrique est plus sensible que la mesure hydrique pour la caractérisation de la zone colmatée.

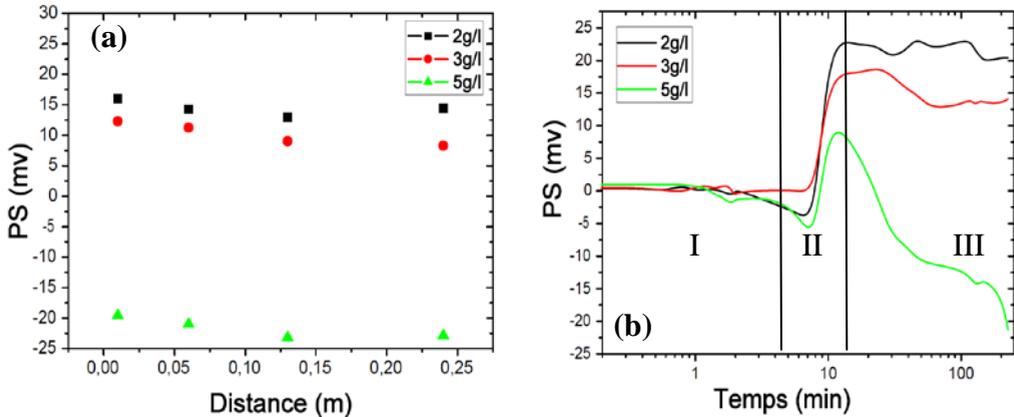


FIG. 3 – Etude électrique : (a) Profils de la PS à la fin des essais d'injection (b) Evolution du signal PS durant l'essai d'injection

4 Conclusion

L'étude présentée vise à caractériser le processus de colmatage d'un milieu poreux saturé soumis à un écoulement chargé de particules par des méthodes hydroélectriques (pression hydrique et potentiel spontané). Par la méthode d'injection en continue, trois concentrations de suspension en particules d'argile sont utilisées. Ces suspensions de particules sont injectées à débit constant dans le milieu poreux. A fin de suivre l'évolution hydroélectrique du milieu poreux, des piézomètres et des électrodes sont placés le long de la colonne d'injection. Les résultats montrent que la rétention des particules dans le milieu poreux se fait de manière non homogène. Elle est plus importante à l'entrée et diminue avec la profondeur ce qui induit la chute de sa perméabilité. Les variations du signal PS sont corrélées aux taux de rétentions de particules injectées. Le signal PS est sensible au dépôt et à la distribution des particules dans le milieu poreux. Il est élevé à l'entrée de la colonne où le dépôt est important et diminue avec la profondeur. L'augmentation de la concentration d'argile injectée dans le milieu poreux est accompagnée d'une perturbation au niveau de signal. Les mesures avec la méthode PS confirme le comportement du milieu poreux obtenu par les mesures hydrauliques. Les résultats obtenus montrent que le signal PS est sensible aux particules d'argile, leur passage immédiat à l'entrée de la colonne et à la quantité de particules déposée dans chaque section du milieu poreux.

5 Bibliographie

- [1] Ahfir, N.-D. ; Wang, H.Q. ; Benamar, A. ; Alem, A. ; Massei, N. ; Dupont, J.-P. (2007). Transport and deposition of suspended particles in saturated porous media : hydrodynamic effect. *Hydrogeol. J.* 15, 659-668.
- [2] Ahfir, N.-D. ; Benamar, A. ; Alem, A. Wang, H.Q. (2009). Influence of internal structure and medium length on transport and deposition of suspended particles : A Laboratory Study : *Transport in Porous Media*, 76, 289-307
- [3] Bogoslovsky, V. A., A. A., Ogilvy (1973), Deformation of natural electric fields near drainage structures, *Geophys. Prospecting*, 21, 716-723
- [5] Cumbie, D.H. Mckay, L.D. (1999). Influence of diameter on particle transport in a fractured shale saprolite . *Journal of Contaminant Hydrology.* 37, 139-157.
- [6] Gorelik, A. M., I. P. Nesterenko (1956), Metod potentsialov elektrofil'- tratsii pri opredelenii radiusa depressionnoi voronki v khode otkachki iz skvazhini (Method of electro-filtration potential in the determination of radius of the depression cone during a pumping test from borehole), *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geofiz.*, 11, 1361–1363
- [7] Herzig, J. P. (1970) Étude de l'écoulement de suspension à travers les milieux poreux. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de Nancy
- [8] Kretschmar, R. ; Barmettler, K. ; Grolimund, D. ; Yan, Y. D. ; Borkovec, M. ; Sticher, H. (1997). Experimental determination of colloid deposition rates and collision efficiencies in natural porous media. *Water resour. Res.* 33, 1129 –1137.
- [9] Lakshmi N. Reddi. ; Ming Xiao. ; Malay G. Hajra In Mo Lee (2005). Physical clogging of soil filters under constant flow rate versus constant head. *Can. Geotech. J.* 42, 804-811.
- [10] Murashko, A. M., B. K. Khasenevich, P. I. Firsiuk (1981), *Vremennie rekomendatsii po premeneniiu geofizicheskikh metodov pri iziskaniyakh dlia meliorativnogo stroitel'stva vusloviakh BSSR (Recommendations for use of geophysical methods for investigations for amending construction in BSSR)*, report, 51 pp., Belnii MVH, Minsk, Russia
- [11] Revil, A., D. Hermitte, M. Voltz, R. Moussa, J.-G. Lacas, G. Bourrie', F. Trolard (2002), Self-potential signals associated with variations of the hydraulic head during an infiltration experiment, *Geophys. Res. Lett.*, 29(7), 1106, doi:10.1029/ 2001GL014294
- [12] Semenov, A. S. (1980), *Elektrorazvedka metodom estestvennogo elektricheskogo polia*, 2nd ed., 445 pp., Nedra, Leningrad, Russia.