

Transport et cinétique de dépôt des particules en suspension dans un milieu poreux granulaire: étude des mécanismes de rétention des particules

Nasre-Dine Ahfir, Ahmed Benamar, Alem Abdellah & Hua Qing Wang

Université du Havre
Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences
BP 540, 25 rue Philippe Lebon 76058 Le Havre
nasre-dine.ahfir@univ-lehavre.fr

Résumé :

Une étude expérimentale a été menée sur le transport et la rétention de particules en suspension (limon de diamètre modal 6 μm) dans trois colonnes de longueurs 33, 66 et 100 cm remplies de gravier. Les essais de traçage sont réalisés à différentes vitesses d'écoulement par des injections impulsions du mélange particules en suspension / traceur dissous. Un modèle analytique de convection–dispersion avec une cinétique de dépôt de premier ordre a permis d'ajuster les courbes de restitution et de déduire les paramètres hydrodispersifs. Le transport rapide des particules en suspension a été mis en évidence sur toutes les colonnes. La dispersion augmente avec la vitesse porale de façon non linéaire. La cinétique de dépôt augmente jusqu'à une vitesse critique puis diminue. La vitesse critique est fonction de la longueur de la colonne. Ce comportement résulte de la compétition entre les forces hydrodynamiques et gravitationnelles.

Abstract :

A laboratory study was undertaken on the transport and the retention of suspended particles (silt of modal diameter 6 μm) in three columns of 33, 66 and 100 cm length filled with gravel. Tracer tests were carried out at various flow rates by short pulses of a mixture of suspended particles / dissolved tracer. The breakthrough curves were competently described with the analytical solution of a convection–dispersion equation with a first-order deposition rate and the hydro-dispersive parameters were deduced. The results showed that the suspended particles travel faster than the dissolved tracer in all columns tested. Longitudinal dispersion increases with mean pore velocity and described with nonlinear relationship. The deposition kinetics increases until a critical flow rate then decreases. The critical flow rate is a function of the column length. This behaviour results from the competition between the hydrodynamic and gravitational forces.

Mots-clefs :

Particules en suspension; effet d'échelle; cinétique de dépôt

1 Introduction

Le transport et la rétention des particules solides en milieux poreux intéressent beaucoup de domaines traitant de l'érosion interne des sols, leur colmatage et leur contamination (Kanti Sen & Khilar, 2006). Dans ce domaine de transport de masse en milieu poreux, beaucoup d'études sont consacrées aux éléments dissous et aux colloïdes, mais peu de travaux concernent le transport de particules en suspension (Wang et al., 2000 ; Massei et al., 2002). En plus de la convection et de la dispersion, deux phénomènes sont importants dans l'étude du transport des particules en suspension : le dépôt et le détachement (Ryan & Elimelech, 1996). La mobilisation des particules dans les sous sols est due aux perturbations physico-chimiques telles que

l'augmentation du pH de l'eau et de sa salinité ou l'augmentation de la vitesse d'écoulement par un pompage par exemple. Le dépôt des particules en suspension dans un milieu poreux dépend de mécanismes liés à la taille et la nature des particules ainsi que la structure du milieu poreux (Silliman, 1995).

Nous présentons une étude du comportement de transport et de la cinétique de dépôt de particules de limon, par des essais de traçages réalisés dans des colonnes de laboratoire. Ces travaux, centrés sur l'expérimentation, visent à déterminer les mécanismes de rétention des particules en suspension dans un milieu granulaire saturé. Les effets de la vitesse d'écoulement ainsi que la longueur des colonnes (milieu poreux) sur les paramètres hydrodispersifs sont les facteurs considérés.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (Benamar et al. 2005 ; Ahfir et al. 2006) est composé d'un réservoir d'eau qui sert à l'alimentation de la colonne. Une pompe péristaltique est utilisée pour assurer un débit constant pendant chaque essai. Un débitmètre numérique est installé à l'entrée de la colonne pour mesurer le débit d'alimentation. Les injections sont réalisées à l'aide d'une seringue. Le système de détection à la sortie de la colonne est composé d'un turbidimètre qui mesure la turbidité des particules en suspensions et d'un fluorimètre qui mesure la concentration du traceur dissous (fluorescéine). Un étalonnage préalable des deux appareils de mesure est nécessaire.

Trois colonnes en plexiglas de diamètre intérieur égal à 6,4 cm et de longueurs différentes sont utilisées. Col_33, Col_66 et Col_100 correspond à la longueur de la colonne 33, 66 et 100 cm, respectivement. Les colonnes (installées en position horizontale) sont équipées de piézomètres qui nous permettent de suivre l'évolution de la charge hydraulique au cours des essais de traçage avec les particules en suspension.

Les grains de gravier sont issus de concassage de graves de la seine ayant une taille entre 1 et 3,15 mm. 80% des grains du milieu ont une taille comprise entre 2,15 et 3,15 mm et le reste entre 1,00 et 2,15 mm. La porosité totale du milieu est alors voisine de 0,45 et sa perméabilité mesurée dans la colonne de laboratoire est égale à $2,26 \cdot 10^{-2}$ m/s (application de la loi de Darcy).

Le choix des particules en suspension s'est porté sur des particules de limons éoliens exclusivement quartzeux des formations Holocènes de couverture sur les plateaux de Haute Normandie (France), dont la densité égale 2,65. La distribution de tailles des ces particules de limons est entre 2 et 16 μm avec un mode de 6 μm et une déviation standard égale à 3 μm .

3 Résultats et discussions

Dans cette étude des injections impulsion sont réalisées à l'entrée de la colonne avec une seringue. Le volume injecté V_{inj} est très faible devant le volume de pores V_p du milieu poreux ($0,02 V_p$). Le fait de choisir $V_{inj} \ll V_p$ évite de perturber l'écoulement dans le milieu poreux (Benamar et al., 2005 ; Ahfir et al., 2006).

Pour déterminer les différents paramètres hydrodispersifs à partir des courbes de restitution expérimentales, La méthode de régression parabolique (Wang, 2001) basée sur la solution analytique de l'équation de convection-dispersion avec une cinétique de dépôt de premier ordre est utilisée. Cette méthode permet de déterminer à la fois le coefficient de dispersion longitudinal D_L , la vitesse effective moyenne u et le coefficient cinétique de dépôt K_{dep} . Sur la figure 1 est présenté un exemple de calage des courbes expérimentales de restitution des particules en suspension (limon) et du traceur dissous par la méthode de régression parabolique (MRP).

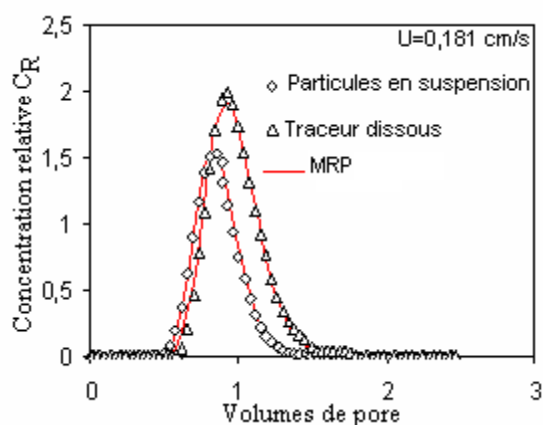


FIG. 1 – Calage des courbes expérimentales par la méthode de régression parabolique (MRP). Vitesse de Darcy $U=0,181$ cm/s.

3.1 Effet d'exclusion de taille

Les séries de traçage réalisées sont des injections impulsions du mélange particules en suspension / traceur dissous. Comme le montre la figure 1 une différence de la percée entre les particules en suspension et le traceur dissous est observée. La restitution des particules en suspension se produit avant celle du traceur dissous. Ce comportement est associé à l'*effet d'exclusion de taille* où les particules en suspension sont exclues des petits pores du milieu poreux et transportées par des chemins préférentiels (Kretzschmar et al. 1997). Pour mieux quantifier l'importance de ce phénomène, on définit un facteur de vitesse relative des particules en suspension par rapport à la vitesse du traceur dissous. Ce facteur noté V_r est donné comme suit :

$$V_r = \frac{u_{SP} - u_{CT}}{u_{CT}}$$

où u_{SP} et u_{CT} sont respectivement, les vitesses effectives moyennes des particules en suspension et du traceur dissous. Les dépassements de la vitesse des particules en suspension par rapport au traceur dissous sont entre 3 et 18 % dans la plus courte colonne (Col_33) et entre 0,8 à 6,8 % dans la plus longue colonne (Col_100). La figure 2 présente la vitesse relative V_r en fonction de la vitesse de Darcy U obtenue dans le milieu gravier et les trois colonnes expérimentées.

À fortes vitesses, V_r est d'autant plus grand que la colonne est courte. Ce comportement peut être expliqué par le fait que plus le milieu poreux est long, plus les possibilités de collisions particules-grains sont importantes. Ceci réduit ainsi l'effet d'exclusion de taille dans le milieu poreux. Le temps de séjour des particules est alors proche de celui du traceur dissous (cf. figure 2 : Col_100 où les valeurs de V_r sont proches de zéro).

À faibles vitesses d'écoulement V_r est proche de zéro. L'effet d'exclusion de taille s'atténue donc lorsque la vitesse d'écoulement devient faible.

Ces deux résultats montrent que le facteur déterminant est la vitesse d'écoulement et donc la force hydrodynamique appliquée aux particules en suspension. Plus la vitesse d'écoulement est faible dans les pores du milieu poreux, plus le rapport force hydrodynamique de traînée – force gravitationnelle est faible. Alors, sous l'effet de la gravité, les particules suivent des chemins de transport plus long (plus de détours) dans le milieu poreux avant d'atteindre sa sortie. Ce qui fait que les temps de séjour entre les particules en suspension et le traceur dissous sont proches.

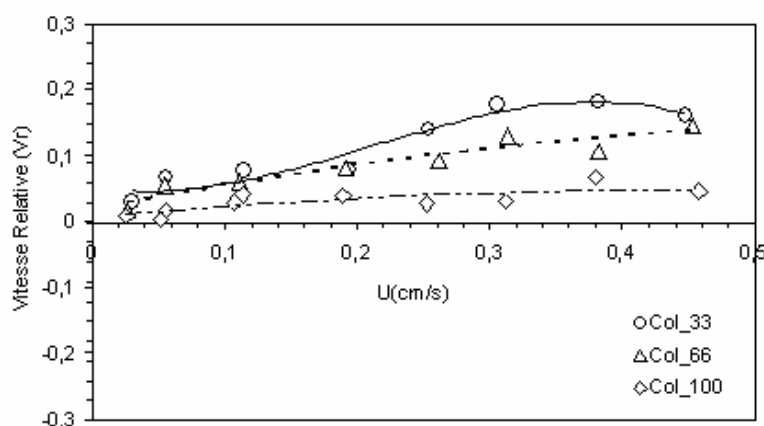


FIG. 2 – Vitesse relative en fonction de la vitesse de Darcy dans le milieu gravier.

3.2 Coefficient de dispersion

Le coefficient de dispersion longitudinal D_L est déterminé par le calage des courbes de restitution expérimentales avec la méthode de régression parabolique (cf. figure 1). L'expression qui suit est souvent utilisée pour représenter la dépendance du coefficient de dispersion total de la vitesse effective moyenne d'écoulement (Hu & Brusseau, 1994):

$$D_L = \alpha_L u^m$$

avec α_L la dispersivité longitudinale du milieu poreux et m un coefficient empirique qui a une valeur comprise entre 1 et 1,3 (Hu & Brusseau, 1994).

Dans la présente étude, les résultats ont montré que les coefficients de dispersion longitudinal déterminé à fortes vitesses dans la colonne Col_33 (la plus courte) sont inférieurs à ceux de la colonne Col_66 qui eux même inférieurs à ceux de la colonne Col_100. Cependant, à faibles vitesses les coefficients de dispersion calculés ne varient pas beaucoup d'une colonne à l'autre. La figure 3 présente l'évolution de la dispersivité longitudinale α_L en fonction de la longueur du milieu poreux. Ce phénomène est appelé effet d'échelle où la dispersivité augmente avec la distance parcourue depuis le point d'injection du traceur. Cependant, cette caractéristique reste de l'ordre du centimètre dans toutes les colonnes expérimentées dans cette étude. Les valeurs de la puissance m obtenues sont comprises entre 0,75 et 0,90.

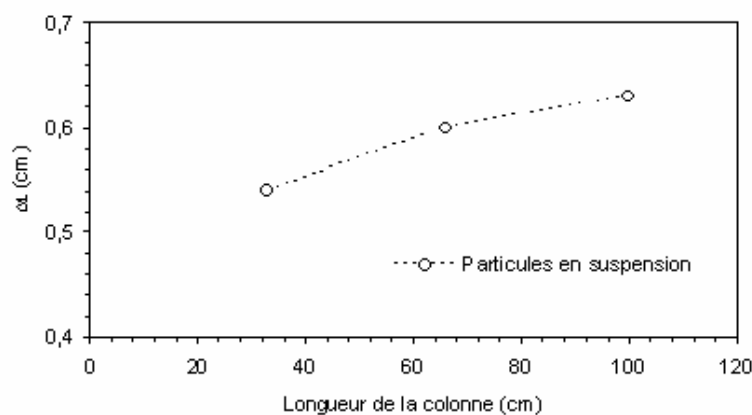


FIG. 3 – Evolution de la dispersivité longitudinale en fonction de la longueur du milieu poreux.

3.3 Evolution du coefficient cinétique de dépôt K_{dep}

Le coefficient cinétique de dépôt K_{dep} des particules en suspension est déterminé par le calage de la solution analytique de l'équation de convection-dispersion avec une cinétique de dépôt de premier ordre sur les courbes expérimentales de restitution. Les résultats montrent que le coefficient cinétique de dépôt (K_{dep}) dans les différentes colonnes expérimentés augmente avec la vitesse d'écoulement jusqu'à une certaine vitesse critique U_{cr} (Benamar et al. 2005 ; Ahfir et al., 2006) puis diminue (cf. figure 4). Dans la littérature, K_{dep} augmente avec la vitesse d'écoulement et représentée par une relation de type puissance ($K_{dep} \propto U^n$) (Kretzschmar et al. 1997; Massei et al. 2002). Dans notre cas, en raison notamment de la faible force ionique utilisée pour l'eau saturant le milieu, identique par ailleurs à l'eau transportant les particules (2.6 mM NaCl), la taille supra-micrométrique des particules et les fortes vitesses d'écoulement utilisées, les interactions chimiques entre les grains du milieu et les particules peuvent être considérées comme négligeables par rapport aux 2 principaux mécanismes intervenant dans le dépôt des particules et qui sont i) le blocage mécanique des particules dans les pores et ii) la sédimentation due à la densité et la taille des particules transportées. La cinétique du premier ordre que nous utilisons dans le modèle prend en compte à la fois la sédimentation, susceptible d'apparaître pour les vitesses les plus faibles, le piégeage dans les pores, et les éventuels phénomènes d'adsorption (négligeables a priori).

La figure 4 présente l'évolution du coefficient cinétique de dépôt des particules de limon en fonction de la vitesse de Darcy dans les trois colonnes étudiées. Quelque soit la colonne testée, le coefficient cinétique de dépôt K_{dep} augmente avec la vitesse d'écoulement jusqu'à une vitesse critique qui dépend de la longueur du milieu, puis diminue. On peut relever que (i) la vitesse critique augmente avec la longueur du milieu poreux (U_{cr} est de 0,24 cm/s pour la colonne Col_33. Elle est autour de 0,29 et 0,39 cm/s dans la colonne Col_66 et Col_100, respectivement). (ii) Pour une vitesse donnée, la cinétique de dépôt est d'autant plus importante que la colonne de traçage est courte ($K_{dep_Col_33} > K_{dep_Col_66} > K_{dep_Col_100}$). Ce paramètre dépend donc fortement de la distance parcourue (longueur de la colonne). La diminution de K_{dep} est associée à la force hydrodynamique appliquée aux particules transportées, c'est-à-dire, quand la force hydrodynamique domine la force gravitationnelle. Le deuxième facteur influent est la probabilité pour qu'une particule transportée arrive à l'exutoire de la colonne sans être piégée. Plus le milieu est long, plus la rétention (capture des particules) est importante.

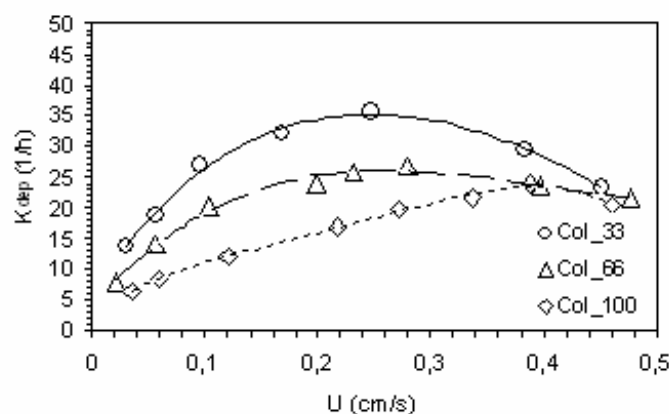


Figure 4. Evolution du coefficient cinétique de dépôt des particules de limon (mode 6 μm) en fonction de la vitesse de Darcy. Effet de la longueur du milieu poreux.

4 Conclusions

Cette étude a montré que le transport des particules en suspension se fait plus rapidement que celui du traceur dissous. Ce phénomène, appelé «effet d'exclusion de taille», est d'autant plus important que la vitesse d'écoulement est forte et la colonne courte. Le coefficient de dispersion longitudinal D_L augmente avec la vitesse effective moyenne d'écoulement. La relation entre le coefficient de dispersion hydrodynamique et la vitesse moyenne de pore est décrite par une loi de puissance ($D_L = \alpha_L u^m$) avec m inférieur à 1. La dispersivité du milieu gravier est de l'ordre de centimètre et augmente avec la longueur de la colonne (effet d'échelle). Le coefficient cinétique de dépôt augmente jusqu'à une vitesse critique puis décroît. Cette vitesse critique augmente avec la longueur du milieu poreux. La diminution de la cinétique de dépôt est associée à la prédominance de la force hydrodynamique sur la force de gravité lorsque la vitesse d'écoulement devient importante.

Références

- Ahfir, N-D., Wang, H.Q., Benamar, A., Alem, A., Massei, N. & Dupont, J-P 2006 Transport and deposition of suspended particles in saturated porous media: hydrodynamic effect. *Hydrogeol. J.* DOI 10. 1007/s10040-006-0131-3.
- Benamar, A., Wang, H.Q., Ahfir, N-D., Alem, A., Massei, N. & Dupont, J-P 2005 Effets de la vitesse d'écoulement sur le transport et la cinétique de dépôt de particules en suspension en milieu poreux saturé. *C. R. Geoscience.* **337**, 497–504
- Hu, Q. & Brusseau, M.L. 1994 The effect of solute size on diffusive-dispersion transport in porous media. *J. Hydro.* **158**, 305-317
- Kanti Sen, T. & Khilar, K.C. 2006 Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media. *Adv. Col. Interf. Science* **119**, 71-96
- Kretzschmar, 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
- Massei, N., Lacroix, M., Wang, H.Q. & Dupont, J-P. 2002 Transport of particulate material and dissolved tracer in a highly permeable porous medium: comparison of the transfer parameters. *J. Cont. Hydrol.* **57**, 21- 39
- Ryan, J.N. & Elimelech, M. 1996 Colloid Mobilization and Transport in Groundwater. *Col. Surfaces A.* **107**, 1-56
- Silliman, S.E. 1995 Particles transport through two-dimensional saturated porous media: influence of physical structure of the medium. *J. Hydrol.* **167**, 79-98
- Wang, H.Q., 2001 Transferts de matières en milieu saturé : Outils mathématiques et modélisation numérique. *H.D.R* pp. 88, Université de Rouen.
- Wang H.Q., Lacroix M., Masséi, N. & Dupont, J-P. 2000 Transport des particules en milieu poreux : détermination des paramètres hydrodispersifs et du coefficient de dépôt. *CRAS-Series IIA - Earth and Planetary Science.* **331**, 97-104