
Influence de la taille des particules en suspension sur leur transfert dans un milieu poreux

Ahmed Benamar — Nasre-Dine Ahfir — Mohamed Tahar Ammami — Huaqing Wang — Abdellah Alem*

* Laboratoire d'Ondes et Milieux Complexes FRE 3102 CNRS –Université du Havre, 53 rue de Prony BP 540, 76058 Le Havre cedex, benamar@univ-lehavre.fr, nasre-dine.ahfir@univ-lehavre.fr, etude1428@yahoo.fr, huaqing.wang@univ-lehavre.fr, abdellah.alem@univ-lehavre.fr

RESUMÉ. Les mécanismes de transport des particules colloïdales dans les milieux poreux ont été largement étudiés, mais celui des particules en suspension dans les couches souterraines n'a pris de l'importance que récemment. Ce papier présente une étude expérimentale sur le transport et dépôt des particules en suspension dans un milieu poreux saturé. Ces essais ont pour objectif de mettre en évidence les effets des forces hydrodynamiques, gravitaires et la forme et la taille des particules sur leur transport et leur cinétique de dépôt. Les courbes de restitution sont ajustées par la solution analytique de l'équation de convection-dispersion avec une cinétique de dépôt de premier ordre afin de déterminer les paramètres hydrodispersifs. Les résultats montrent que ces paramètres dépendent de la vitesse d'écoulement et des caractéristiques des particules en suspension. L'effet de la forme des particules a été mis en évidence. Cette étude montre que la taille et la forme des et la vitesse d'écoulement sont parmi les principaux mécanismes qui influent sur le transport et la rétention de particule en suspension dans les milieux poreux.

ABSTRACT. The transport mechanisms of colloids in saturated porous media have been studied in great detail. Suspended Particles transport in the subsurface has only recently attracted significant attention. This paper presents experimental study on the suspended particles transport and deposition in a saturated porous medium. The tests aimed at delineating the effects of hydrodynamic, gravity forces and flow velocity on particle transport and deposition rate. Particle breakthrough curves (BTCs) were measured and fitted with the analytical solution of the advective-dispersive equation with a first-order deposition kinetic in order to derive the transport parameters. The results showed that these parameters depend on the flow rate and the suspended particles characteristics. This study shows that the shape and the size of the particles, and the flow rate are among the main mechanisms influencing the transport and deposition rate of suspended particles in porous media.

MOTS-CLÉS : Milieu poreux, Particules en suspension, taille des particules, Cinétique de dépôt,
KEYWORDS : Porous medium, suspended particle, particle size, Deposition rate.

1. Introduction

Le transport des colloïdes dans les milieux poreux saturés a été largement étudié, mais les particules solides en suspension n'ont fait l'objet d'études que depuis la dernière décennie. En raison de leurs grandes dimensions et densité, le transport des particules en suspension commence à revêtir une importance dans les domaines liés aux sciences de la terre et de l'environnement. Des études (Frey *et al.*, 1999; Grolimund *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2000; Massei *et al.*, 2002; Benamar *et al.*, 2005; Ahfir *et al.*, 2009) ont été menées sur les différents aspects liés au transport des particules et à différentes échelles. Durant les épisodes pluvieux, l'érosion des sols alluvionnaires conduit à une forte turbidité des eaux de ruissellement qui, en s'infiltrant dans les alluvions, peut atteindre les nappes phréatiques. Les particules mobiles dans le sol ou la nappe peuvent servir de supports pour les contaminants et ainsi faciliter leur transport. Le transport de particules fines par l'écoulement dans les remblais d'ouvrages hydrauliques contribue au développement de l'érosion interne. La présence d'un gradient hydraulique important combiné à la présence de sol argileux et un filtre inefficace crée les conditions de l'érosion interne et d'un risque de rupture des digues en terre.

Prédire le transfert des particules est difficile car les processus qui gouvernent le transport, la rétention et le relargage dans l'environnement des sols naturels ne sont pas encore bien connus.

Une grande partie des études sur le transport des colloïdes dans les milieux poreux sont menées avec des expériences en injection continue de suspension. Récemment, des expériences de traçage avec une injection brève sont effectuées avec des colloïdes ou des particules solides (Kretzschmar *et al.*, 1997; Compère *et al.*, 2001; Massei *et al.*, 2002). Ce type d'essais, lors duquel on injecte un faible volume de suspension, permet de s'affranchir d'éventuels dépôts de particules qui modifieraient la porosité du milieu. Le transport et la rétention des matières en suspension dans un milieu poreux dépendent de mécanismes liés à l'environnement physico-chimique mais aussi à la taille des particules, à la distribution porale et à la vitesse d'écoulement. Pour les particules de grande dimension (supérieure à 10 μ m), les effets hydrodynamiques, gravitaires et inertiels sont dominants, tandis que toutes les mécanismes peuvent contribuer pour les particules fines dont la dimension varie entre 0.1 et 10 μ m (Gohr Pinheiro *et al.*, 1999). Des essais sur une colonne de sol non remanié utilisant des sphères de latex comme traceur ont montré que le diamètre des particules joue un rôle majeur dans le contrôle du transport (Cumbie *et al.*, 1999). L'importance de la chimie de la solution dans le milieu poreux a été largement étudiée pour les particules colloïdales qui présentent des propriétés de surface adéquates (Grolimund *et al.*, 2006, Tosco *et al.*, 2009) mais peu d'études (Khilar *et al.*, 1984 ; Blume *et al.*, 2005) sont consacrées au rôle de la physico-chimie dans le processus de rétention des particules de sol dans un milieu poreux.

La présente étude explore les effets de la de la forme et de la taille des particules et de la vitesse d'écoulement sur le transport et dépôt des particules en suspension naturelles dans un milieu poreux saturé.

2. Aspects théoriques et modélisation mathématique du transport

Le transport particulaire à travers les milieux poreux granulaires et sous les conditions d'écoulement saturé et uniforme peut être décrit par l'équation de convection dispersion en monodimensionnel incluant un terme qui prend en compte le dépôt et le relargage (de Marsily, 1986) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\rho}{\omega_0} \frac{\partial S}{\partial t} \quad [1]$$

et le terme source s'écrit :

$$\frac{\rho}{\omega_0} \frac{\partial S}{\partial t} = K_{dep} C - \frac{\rho}{\omega_0} K_r S \quad [2]$$

Ces équations décrivent l'évolution de la concentration (masse ou nombre) des particules dans la suspension $C(x, t)$ [$M.L^{-3}$] et la quantité (masse ou nombre) des particules déposées par unité de masse du milieu poreux $S(x, t)$ [$M.M^{-3}$] en fonction de la distance de transport x [L] et du temps t [T].

Ici, D_L est le coefficient de dispersion hydrodynamique longitudinal des particules [$L^2.T^{-1}$], u la vitesse moyenne de pore des particules [$L.T^{-1}$], ρ la densité apparente de la matrice solide [$M.L^{-3}$], ω_0 la porosité [$L^3.L^{-3}$], et K_{dep} et K_r la cinétique de dépôt et de relargage des particules [T^{-1}], respectivement. Les cinétiques de dépôt ou de relargage initiales des particules sont supposées suivre une loi de cinétique de premier ordre. Ce type d'équation a été utilisé par plusieurs chercheurs pour décrire à l'échelle de laboratoire (en colonne) le transport de colloïdes et bactéries (McCaulou et al., 1994 ; Saiers et al., 1994).

La cinétique de relargage des particules est très faible sous certaines conditions chimiques. Le terme de relargage peut alors être supprimé de l'équation [3] qui sera réduite comme suit (Corapcioglu et Jiang, 1993 ; Kretzschmar et al., 1997 ; Grolimund et al., 1998):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} - K_{dep} C \quad [3]$$

La solution analytique, sous certaines conditions aux limites, est donnée par :

$$C(t, x) = \frac{mx}{Q\sqrt{4\pi D_L t^3}} \exp(K_{dep} t) \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4D_L t}\right) \quad [4]$$

Où Q est le débit d'écoulement et m la masse du traceur injectée.

Il faut noter que l'équation ci-dessus ne peut pas être appliquée quand les particules déposées auparavant influencent la cinétique de dépôt des particules nouvellement injectées, comme souvent observé pour les injections continues de suspensions de particules où une grande quantité de particules est introduite dans le milieu poreux (Kretschmar et al., 1999). On parle alors de cinétique de dépôt de premier ordre. Le modèle de premier ordre implique que le dépôt des particules se produit dans un milieu poreux propre (clean bed), autrement dit, la fraction du milieu poreux occupée par les particules est très petite. Ce modèle reste valable pendant les premiers temps des expériences, mais dès que le dépôt des particules s'accumule, la cinétique d'attachement peut dépendre de la concentration des particules déposées sur la phase solide du milieu poreux. Alors la cinétique de dépôt sera régie par une loi de second ordre. La formulation d'un modèle de second ordre de convection dispersion implique une hypothèse additionnelle, c.-à-d., que la cinétique de dépôt de particules dépend non seulement de la concentration de particules dans la phase aqueuse, mais également de la fraction du milieu poreux disponible pour le dépôt. La fraction du milieu poreux disponible pour le dépôt ψ est reliée à la capacité de rétention des particules par le milieu poreux, X_{max} (milligrammes par milligrammes) par l'équation :

$$\psi = \frac{X_{max} - S}{X_{max}} \quad [5]$$

La forme de l'équation différentielle avec la cinétique de dépôt de second ordre s'écrit alors :

$$\frac{\rho}{\omega_0} \frac{\partial S}{\partial t} = K_{dep} \psi C - \frac{\rho}{\omega_0} K_r S \quad [6]$$

Dans le présent papier, la méthode utilisée pour la détermination des paramètres de transport est la « méthode de régression parabolique (MRP) basée sur la solution analytique de l'équation de convection dispersion avec une cinétique de premier ordre (Eq. 4) en écoulement monodimensionnel (Wang *et al.*, 2001, Ahfir *et al.*, 2007). Cette méthode est basée sur les expressions adimensionnelles des solutions explicites par traitement analytique des données expérimentales.

3. Expériences de traçage au laboratoire

3.1. Appareillage

Dans les différents essais de traçage menés au laboratoire dans les milieux poreux (naturels ou artificiels), des colonnes horizontales de dimensions différentes sont utilisées. Les résultats présentés ici sont obtenus dans une colonne de 33,6 cm de longueur et 6,4 cm de diamètre intérieur.

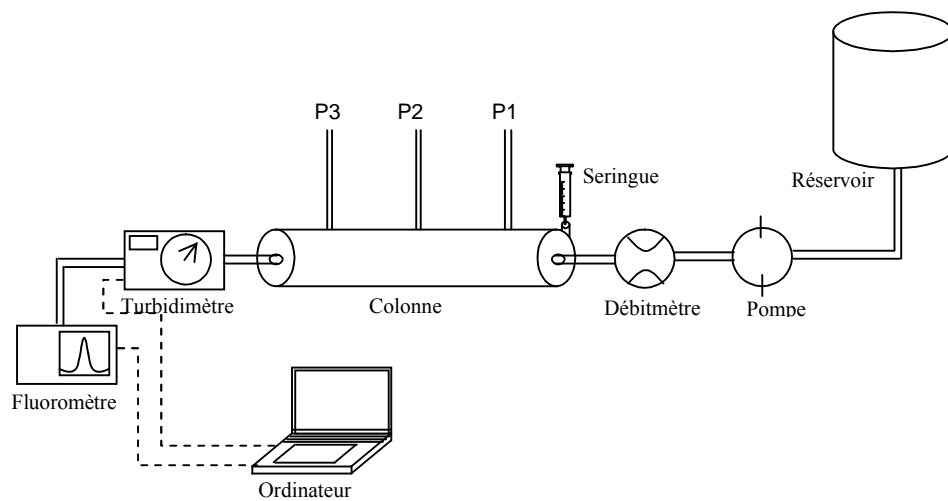


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental de traçage

Le dispositif expérimental (Figure 1) est constitué d'un réservoir alimentant la colonne, d'une pompe péristaltique pour assurer un débit constant pendant chaque essai et d'un débitmètre numérique. Les injections instantanées sont réalisées à l'aide d'une seringue (Benamar *et al*, 2005). Le système de détection à la sortie de la colonne est composé d'un turbidimètre et d'un fluorimètre. Les colonnes sont équipées de piézomètres qui permettent de suivre l'évolution de la charge hydraulique au cours des essais de traçage avec les particules en suspension.

3.2. Matériaux

La colonne est remplie de billes de verre (bonne sphéricité) de diamètre 3 mm. La porosité apparente du milieu ainsi constitué est voisine de 38% et la conductivité hydraulique mesurée est proche de $2,2 \cdot 10^{-2}$ m/s. Trois types de particules en suspension sont utilisés : des limons éoliens exclusivement quartzeux avec une dimension modale de 16 μm et une densité de 2,65, deux variétés de particules d'argile (kaolinite Proclays et le kaolinite P300 dont les dimensions modales sont de 7 et 13 μm , respectivement) de densité 2,65. La distribution de taille des suspensions injectées, mesurées au Coulter Multisizer, est présentée par les spectres micro granulométriques de la figure 2. Les images MEB de ces particules montrent que les limons quartzeux ont une forme plus ou moins arrondie, tandis que la kaolinite a une forme plutôt allongée. Ces différentes particules permettront de mettre en évidence les effets relatifs de la gravité, de la dimension et de la forme.

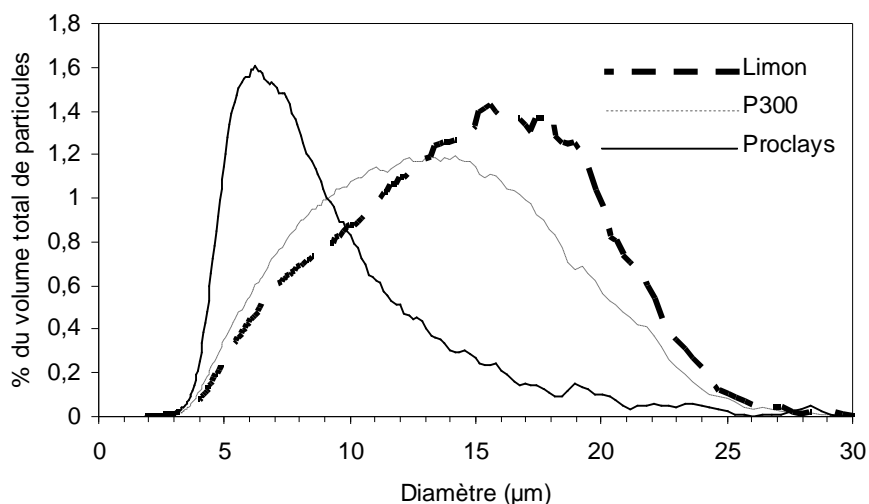


Figure 2. Spectres micro granulométriques des particules injectées dans le milieu

3.3. Procédure d'essai

Après saturation de la colonne avec de l'eau déminéralisée (force ionique $I = 0\text{mM}$ et $\text{pH} = 6,8$), elle est posée horizontalement, un régime d'écoulement permanent est établi puis, à l'aide d'une seringue (diamètre interne de l'aiguille égal à 2 mm), on réalise des injections brèves. Le volume injecté (5ml) est choisi très faible par rapport au volume de pores du milieu poreux dans le but de ne pas perturber l'écoulement et ne pas introduire une grande quantité de particules dans le milieu. La concentration des particules en suspension injectée est $C_0 = 1,5 \text{ g/l}$. Les vitesses utilisées sont comprises entre 0,026 et 0,417 cm/s. Elles sont supérieures à celles rencontrées dans les écoulements en milieux naturels, mais proches de celles utilisées dans l'industrie (forages).

4. Résultats et discussions

4.1. Influence de la nature des particules en suspension sur leur transport

Le transport des particules dans le milieu poreux dépend de la forme des particules, leur densité et leur taille. Les courbes de restitution obtenues pour une vitesse d'écoulement moyenne (Figure 3) montrent des temps de convection similaires pour les trois types de particules. Cependant la concentration de l'effluent (corrélée à la mesure de turbidité) est plus importante pour les particules de kaolinite Proclays, indiquant que leur faible dimension leur permet un transfert plus conséquent dans la matrice porale.

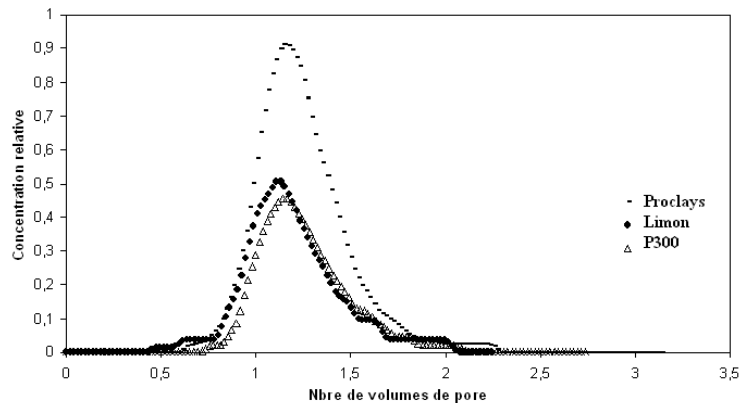


Figure 3. Courbes de restitution des particules à la vitesse $U=0,26 \text{ cm/s}$

Les paramètres hydrodispersifs du modèle mathématique utilisé (Eq. 3) sont déduits de l'ajustement des courbes de restitutions avec la solution analytique de l'Eq. 3. Le coefficient de dispersion longitudinale obtenu varie linéairement avec la vitesse d'écoulement et montre des valeurs de dispersion voisines pour toutes les particules.

Le taux de restitution $R(\%)$ (intégration de la courbe de restitution) en fonction de la vitesse d'écoulement (U (cm/s)) est présenté sur la figure 4. Le taux de restitution augmente avec la vitesse. A faible vitesse, ce sont les forces de gravité qui dominent les mécanismes de transfert des particules. Cependant, pour les grandes vitesses, ce sont les effets hydrodynamiques (amplifiés par l'effet de taille) qui agissent sur les particules. Le comportement au transport des différentes particules est donc globalement similaire pour les faibles vitesses d'écoulement, puis les particules les plus fines (kaolinite Proclays) sont mieux transportées que les autres particules lorsque la vitesse augmente. Ce comportement peut être expliqué par l'effet de la taille des particules. Les grosses particules (Limon et Kaolinite P300) sont les plus exposées au piégeage mécanique que les plus fines (Kaolinite Proclays).

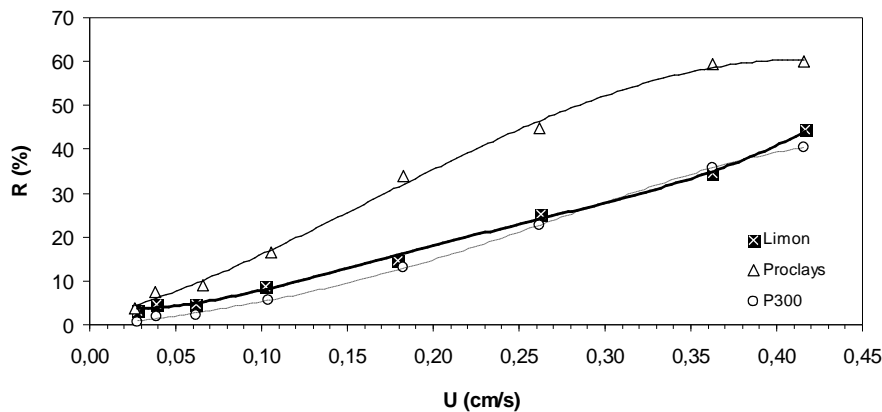


Figure 4. Taux de restitution des particules en fonction de la vitesse du fluide

4.2. Cinétique de dépôt des particules

La rétention des particules contenues dans la phase fluide peut se faire selon plusieurs mécanismes d'origine physique ou chimique. Le coefficient cinétique de dépôt, déduit de l'ajustement du modèle mathématique, est présenté sur la figure 5. Son évolution avec la vitesse de Darcy montre à faible vitesse une cinétique similaire pour les trois types de particules, puis un écart des valeurs apparaît entre les

particules de kaolinite Proclays et les autres particules. Le coefficient cinétique de dépôt augmente avec la vitesse jusqu'à un certain seuil au-delà duquel elle décroît. Ce comportement suggère l'existence d'une vitesse critique pour laquelle le comportement de dépôt change. On peut dissocier deux régimes d'écoulement dans lesquels les effets géométriques et les effets hydrodynamiques n'ont pas la même importance. Pour les vitesses inférieures à la vitesse « critique » le dépôt des particules est essentiellement régi par les constriction du milieu poreux et les effets gravitaires. Pour les vitesses supérieures, les effets hydrodynamiques et inertiels prennent l'avantage et conduisent à une diminution de la cinétique de dépôt. Aux faibles vitesses d'écoulement, les mécanismes de dépôt agissent de façon quasi similaire sur toutes les particules de différentes tailles. Cependant les particules de kaolinite P300 présentent une cinétique de dépôt un peu plus importante en raison de leur forme allongée et leur grande taille qui leur confèrent des propriétés de blocage mécanique dans les constriction du milieu poreux. Pour les vitesses importantes, la cinétique de dépôt des particules de kaolinite les plus fines (Proclays) est nettement plus faible que celle des autres particules. Les effets hydrodynamiques et inertiels semblent donc affecter les grosses particules qui subissent plus de collisions avec les grains du milieu poreux et donc leur piégeage.

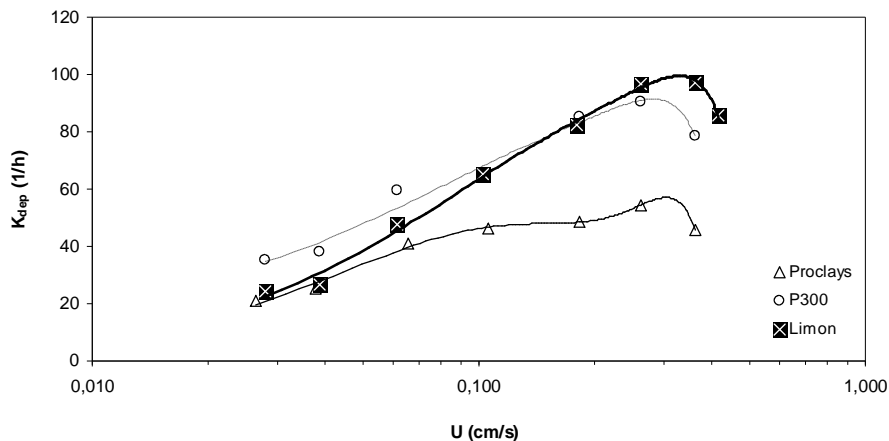


Figure 5. Cinétique de dépôt des particules et son évolution avec la vitesse du fluide

L'analyse micro granulométrique de l'effluent est effectuée avec le Coulter Multisizer sur les particules de kaolinite Proclays restituées à trois vitesses d'écoulement différentes. La figure 6 montre la décroissance du mode de spectre lorsque la vitesse d'écoulement diminue : les grosses particules sont globalement plus restituées à forte vitesse d'écoulement et sont plus sujettes au piégeage à faible vitesse. A cette vitesse, elles présentent une cinétique de dépôt conséquente en raison de leur diffusion. Pour les vitesses importantes, les interactions (collisions) deviennent plus fréquentes sur ces particules fines qui présentent alors une plus grande dispersion conduisant à une plus grande rétention. Ces résultats montrent qu'un milieu poreux soumis à un écoulement de particules (polydisperses) en

suspension opère une sélection granulaire en fonction de la vitesse d'écoulement. La dimension des particules joue donc un rôle majeur dans le contrôle du transport

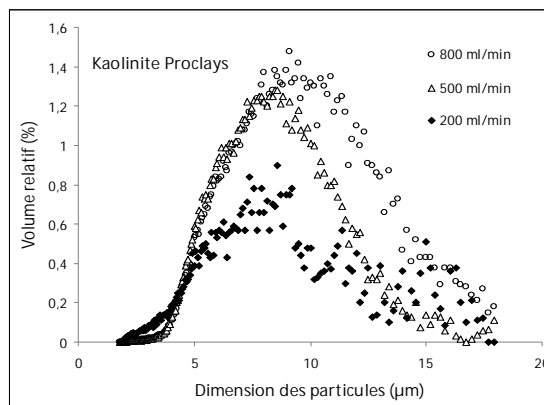


Figure 6. Spectres micro granulométriques des particules de kaolinite Proclays restituées à différentes vitesses d'écoulement

5. Conclusions

Cette étude sur le transport de particules fines de sol dans un milieu poreux montre que les différents processus par lesquels la rétention des particules dans l'espace poral dépend fortement de leur dimension. L'influence de la vitesse d'écoulement sur les divers paramètres hydrodispersifs en présence de matières en suspension a été mise en évidence. Dans la gamme des vitesses d'écoulement dans les sols, les effets de forme ne sont pas avérés en raison de la faible occurrence des collisions. La cinétique de dépôt montre une évolution identique à celle obtenue dans nos travaux antérieurs sur les particules de limon. Ce comportement suggère l'existence d'une vitesse critique pour laquelle le comportement de dépôt change. On peut dissocier deux régimes d'écoulement dans lesquels les effets géométriques et les effets hydrodynamiques n'ont pas la même importance. Pour les vitesses inférieures à la vitesse « critique » le dépôt des particules est essentiellement régi par les constriction du milieu poreux et les effets gravitaires. Pour les vitesses supérieures, les effets hydrodynamiques et inertiels prennent l'avantage et conduisent à une diminution de la cinétique de dépôt. Il est établi par cette étude que la rétention des particules les plus fines est faible. Le caractère polydisperse des suspensions utilisées ne permet cependant pas de déduire directement des relations pertinentes entre les paramètres de transport et les dimensions des particules.

6. Bibliographie

- Ahfir, N-D., Benamar A., Wang H.Q., Alem A., "Influence of internal structure and medium length on transport and deposition of suspended particles: a laboratory study", *Transp. Porous Med.* 76, 2009, p. 659–668.
- Ahfir, N-D., Wang, H.Q., Benamar, A., Alem, A., Massei, N., Dupont, J-P., "Transport and deposition of suspended particles in saturated porous media: hydrodynamic effect", *Hydrogeology Journal* 15, 2007, p. 659–668
- Benamar A., Wang Q., Ahfir N., Alem A., Massei N., Dupont J.P., « Effets de la vitesse sur le transport et la cinétique de dépôt de particules en suspension en milieu poreux saturé », *C.R. Geosciences*, 337, 2005, p. 497-504
- Blume T., Weisbrod N., Selker J.S., "On the critical salt concentrations for particle detachment in homogeneous sand and heterogeneous Hanford sediments", *Geoderma* 124, 2005, p. 121-132.
- Compère F., Porel G., Delay F. , "Transport and retention of clay particles in saturated porous media. Influence of ionic strength and pore velocity", *J. Contam. Hydrol.* 49, 2001, p. 49, 1-21.
- Corapcioglu M.Y., and Jiang S., "Colloid-facilitated groundwater contaminant transport", *Water Resour. Res.* 29, 1993, p.2215-2226
- Cumbie D.H., McKay L.D., "Influence of diameter on particle transport in a fractured shale saprolite", *J. Contaminant Hydrology* 37, 1999, p. 139–157.
- de Marsily G., "Quantitative hydrogeology. Groundwater hydrology for engineers". *Academic Press, INC, New York*, 1986.
- Frey, J.M.; Schmitz, P.; Dufreche, I.; Gohr Pinheiro, I., "Particle deposition in porous media: analysis of hydrodynamic and weak inertial effects", *Transp. Porous Media* 37, 1999, p. 25–54.
- Gohr Pinheiro I., Schmitz P., Houi D., "Particle capture in porous media when physico-chemical effects dominate", *Chem. Eng. Sci.* 54, 1999, p. 3801- 3813.
- Grolimund D., Elimelech M., Borkovec M., Barmettler K., Kretzschmar R., Sticher H., "Transport of in situ mobilized colloidal particles in packed soil columns", *Environ. Sci. technol.* 32, 1998, p. 3562-3569.
- Grolimund D., Borkovec M., "Release of colloidal particles in natural porous media by monovalent and divalent cations", *J. Contaminant Hydrology* 87, 2006, p. 155-175.
- Khilar K.C., Fogler H.S., "The existence of a critical salt concentration for particle release", *J. Colloid Interface Science* 101, 1984, p. 214-224.
- Kretzschmar R., Barmettler K., Grolimund D., Yan Y., "Experimental determination of colloid deposition rates and collision efficiencies in natural porous media", *Water Resour. Res.* 33(5), 1997, p. 1129-1137.
- Kretzschmar, R., Borkovec, M., Grolimund, D., Elimelech M., "Mobile Subsurface Colloids and their Role in Contaminant Transport", *Advances in Agronomy, Vol. 66*, 1999, p. 121-194.

- Massei, N., Lacroix, M., Wang, H.Q., Dupont, J.P., "Transport of particulate material and dissolved tracer in a highly permeable porous medium: comparaison of the transfer parameters", *Journal of Contaminant Hydrology* 57, 2002, p. 21-39.
- McCaulou, D.R., Bales R.C., McCarthy J.F., "Use of short-pulse experiments to study bacterial transport through porous media", *J. Contamin. Hydrol.* 1994, 15, p. 1-14.
- Saiers, J.E., and Hornbeger G.M., "First-and second-order kinetics approaches for modelling the transport of colloidal particles in porous media", *Water Resources Res.* 30, 1994, p. 2499-2506.
- Tosco T., Tiraferri A., Sethi R., "Ionic strength dependent transport of microparticles in saturated porous media : modeling mobilization and immobilization phenomena under transient chemical conditions", *Environ. Sci. Technol.* 43, 2009, p. 4425-4431.
- Wang, H.Q., Lacroix, M., Massei, N., Dupont, J.P., "Particle transport in porous medium: determination of hydrodispersive characteristics and deposition rates", *C. R. Acad. Sci. Paris Sci. Terre Planèt.* 331, 2000, p. 97-104.
- Wang H.Q., "Transferts de matières en milieu saturé : Outils mathématiques et modélisation numérique", Habilitation à diriger des recherches (H.D.R.), Université de Rouen, 2001, 88 pages.