
Modélisation du transport-dépôt de particules en suspension en milieu poreux saturé sous conditions défavorables

E. Ma¹, T. Ouahbi^{1*}, H. Wang¹, N-D Ahfir¹, A. Alem¹

UMR CNRS 6294, Laboratoire d'Ondes et Milieux Complexes, Normandie Université

53 rue de prony BP540, 76058 le Havre, France

E-mail : tariq.ouahbi@univ-lehavre.fr

RÉSUMÉ. La compréhension du transfert des particules en suspension dans un milieu poreux a une grande implication sur la réduction du risque de contamination des ressources hydriques. Le transport de particules en suspension joue un rôle crucial dans des domaines aussi divers que l'industrie (filtration, chromatographie, traitement de l'eau) ou les sciences de la terre et le génie civil (hydrogéologie, environnement, ..).

La migration des particules dans le sol peut d'une part favoriser la propagation des polluants vers les nappes souterraines. D'autre part, elle peut mener à l'instabilité voire même la rupture d'ouvrages hydrauliques (érosion interne).

Dans ce travail, deux modèles numériques du couplage transport-dépôt de particules en suspension en milieu poreux sont proposés. Une modélisation basée sur les deux modèles combinée à une étude expérimentale de transport et dépôt de particules de Kaolinite dans une colonne de laboratoire avec un écoulement à débit imposé, a permis l'étude (par méthode inverse) de l'effet de plusieurs facteurs sur les mécanismes de transport et de dépôt dans un milieu poreux.

ABSTRACT. Understanding the transport of suspended particles in a porous medium has great implications for reducing the risk of contamination of water resources. The transport of suspended particles (SP) plays a crucial role in diverse industries (filtration, chromatography, and water treatment), earth sciences and civil engineering (hydrogeology, environment...).

The migration of particles in the soil can facilitate the spread of pollutants to groundwater, while it can also lead to instability or even rupture of hydraulic structures (internal erosion). The "clean bed" theory, however, was found not to be sufficient to describe transport of suspended particles, especially to predict the profile of retention in many previous studies.

In this work, two time-distance dependent deposition models were proposed on the transport of suspended particles in the porous media. The two models described well the change of the structure of porous media and apparent decrease in deposition rate coefficient with increasing distance. Numerical simulations were applied in a series of sand column experiments to determine the effects of flow rate and grain size distribution (GSD) on particle transport and deposition in saturated porous media.

MOTS-CLÉS: Modélisation numérique, Milieu poreux, Transport-dépôt, Particule en suspension.

KEY WORDS: Modelling, Porous medium, Transport-deposition, Suspended particle

1. Introduction

Plusieurs modèles numériques avec différents facteurs physico-chimiques ont été envisagées pour modéliser le dépôt de MES. On peut citer parmi eux : les modèles de dépôt dans le minimum d'énergie secondaire [LI 10], avec hétérogénéités dans la population de colloïde [LI 04] et avec charge de surface [TUF 05], d'autres chercheurs ont suggéré certains facteurs physiques, notamment le « straining » [BRA 03].

Dans ce travail, deux modèles numériques du couplage transport-dépôt de particules en suspension en milieu poreux sont proposés. Une modélisation basée sur ces deux modèles est confrontée à une étude expérimentale de transport et dépôt de particules de Kaolinite dans une colonne de laboratoire, permettant l'étude (par méthode inverse) de l'effet de plusieurs facteurs sur les mécanismes de transport et de dépôt dans un milieu poreux.

2. Modélisation numérique

En régime d'écoulement permanent unidimensionnel et en conditions saturées, la conservation de la masse des particules fines de kaolinite et leur transport à travers le milieu poreux peuvent être représentés par un problème macroscopique de transport (convection-dispersion des particules en suspension) :

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

Où C [M L³] est la concentration des particules suspendues dans l'eau, t [T] le temps, ϕ [L³/L³] est la porosité, ρ_b [M/L³] est la densité des particules, S est la rétention [M/M], D_L [L²/T] est le coefficient de dispersion hydrodynamique, u [L/T] est la vitesse moyenne de pores, x [L] est la distance à partir de l'entrée de la colonne.

Nous pouvons réécrire l'équation 1 sous forme adimensionnelle comme suit :

$$\frac{\partial C_r}{\partial t_r} + \frac{\rho_b}{\phi} \frac{\partial S_r}{\partial t_r} = D_r \frac{\partial^2 C_r}{\partial x_r^2} - u_r \frac{\partial C_r}{\partial x_r} \quad [2]$$

Avec : $C_r = C/C_0$, ou C_0 est la concentration initiale ; $S_r = S/C_0$; $t_r = t/t_c$, ou $t_c = L/u$ et L est la longueur de la colonne ; $x_r = x/L$; $D_r = D_L/L/u$; $u_r = u/u = 1$.

Le terme de dépôt est exprimé par :

$$\frac{\rho_b}{\phi} \frac{\partial S_r}{\partial t_r} = k_{d,r} C_r \quad [3]$$

Ici le terme $k_{d,r}$ est un coefficient relative cinétique du dépôt.

Dans les conditions de dépôt défavorables, comme le nombre de sites de dépôt est restreint, alors $k_{d,r}$ est en fonction du temps et de la distance quand le volume injecté de suspension est important.

$$k_{d,r} = k_{0,r} \psi \quad [4]$$

ψ est une fonction sans dimension de dépôt de particules.

Deux modèles sont proposés pour décrire l'évolution spatio-temporelle de $k_{d,r}$.

1.1. Modèle 1

La fonction ψ est modélisée comme une fonction de S et d'une distance caractéristique L_c [MA 18]:

$$\psi = e^{-S/S_c} \cdot \left(\frac{L_c}{L_c + x} \right) \quad [5]$$

Où S_c est un coefficient de même unité que S qui quantifie la diminution exponentielle de la cinétique de dépôt.

Le terme $\left(\frac{L_c}{L_c + x} \right)$ décrit la diminution de la capacité de filtration avec la distance causée par les effets du straining et de l'hétérogénéité de populations des particules.

1.2. Modèle 2

Dans ce modèle, la capacité de filtration du milieu poreux est déterminée par les effets des tailles des particules en suspension. En outre, comme les particules de grandes tailles sont retenues prioritairement, leurs effets peuvent être représentés par la concentration des particules dans l'écoulement. Dans ces conditions, le terme $\left(\frac{L_c}{L_c+x}\right)$ peut être remplacé par une fonction dépendant de la concentration :

$$\psi = e^{-S/S_c} \cdot e^{(C_r-1)^\beta} \quad [6]$$

Où β est un paramètre qui contrôle la diminution de k_{dr} avec la distance.

A partir des résultats expérimentaux dont nous disposons [AHF 17], une optimisation numérique est effectuée pour déterminer les paramètres des modèle ($k_{0,r}$, L_c , S_c) ou ($k_{0,r}$, β , S_c) qui approche le mieux les données expérimentales. Pour cela, un outil numérique d'optimisation par méthode inverse a été développé [MA 17].

3. Résultats et conclusions

Ces courbes (Figures 1-2) bien ajustées indiquent que les deux modèles ont fourni un ajustement raisonnable à la fois des courbes de concentration des effluents et des courbes de la distribution spatiale de la rétention. Particulièrement, les simulations numériques ont réussi à reproduire la rétention importante à l'entrée de la colonne.

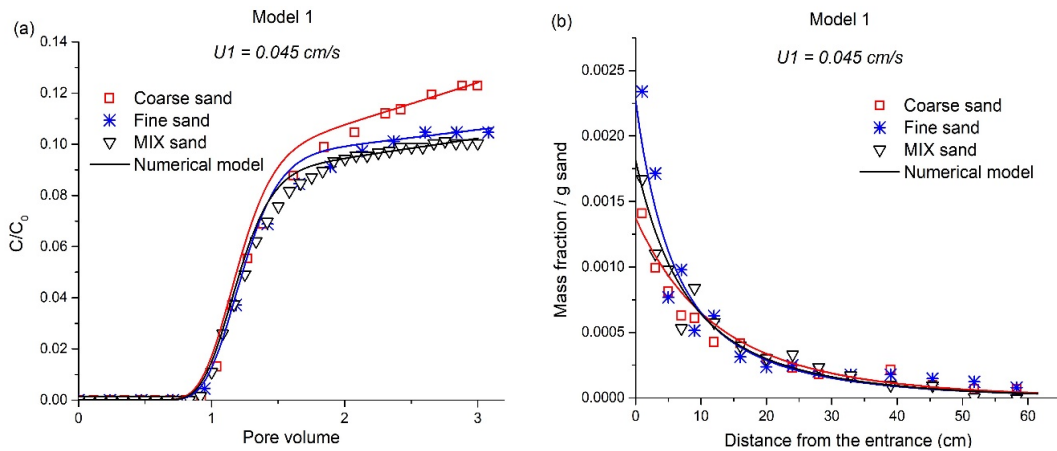


Figure 1. Courbes de restitutions (a) et Profils de rétention (b) (Modèle 1/Expérimentales) à la vitesse de Darcy $U1=0,045$ cm/s pour différent type de milieu poreux.

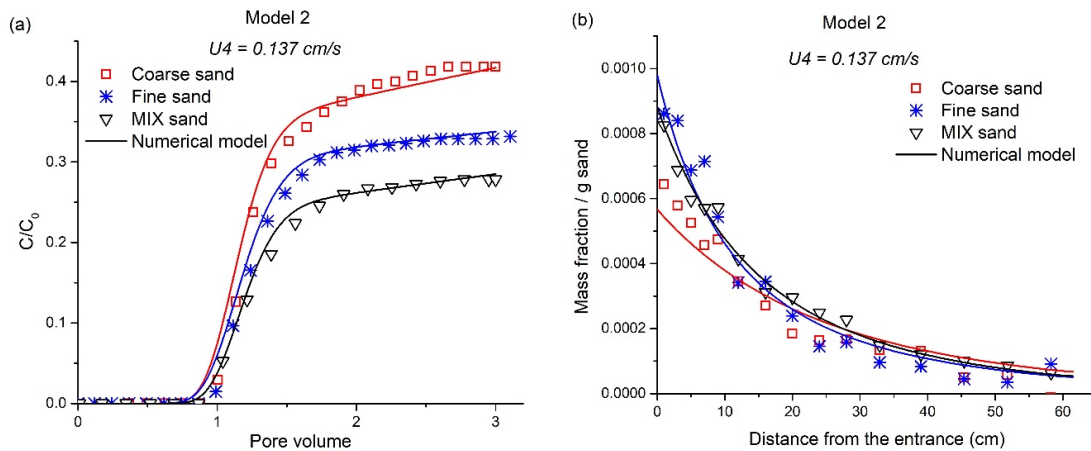


Figure 2. Courbes de restitutions (a) et Profils de rétention (b) (Modèle 2/Expérimentales) à la vitesse de Darcy $U4=0,137$ cm/s pour différent type de milieu poreux.

Dans la Figure 3, les valeurs optimisées de $k_{0,r}$ ont des tendances similaires pour les deux modèles. $k_{0,r}$ diminue avec l'augmentation de la vitesse, ce qui reflète que les grandes vitesses améliorent le transport de particules dans le milieu poreux. Parallèlement, $k_{0,r}$ augmente avec la diminution de la taille moyenne des grains de sables.

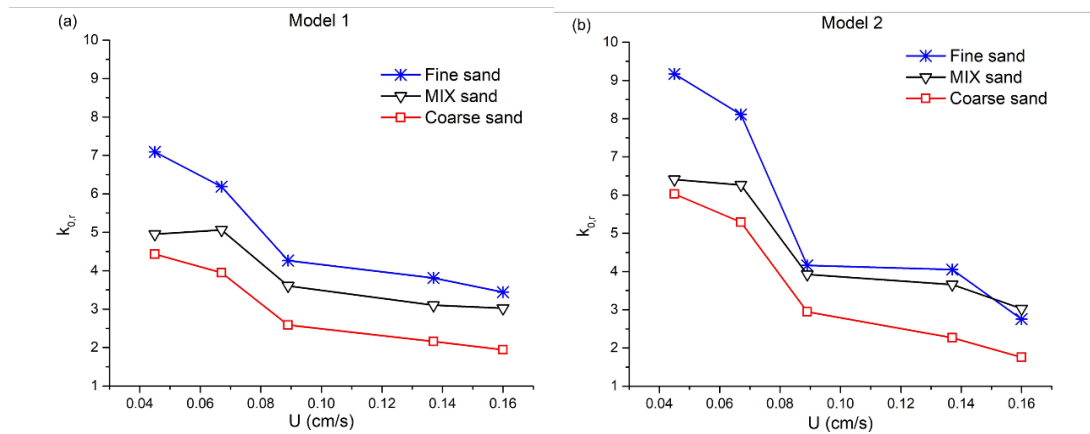


Figure 3. Les évolutions de $k_{0,r}$ des deux modèles (a et b) en fonction de la vitesse de Darcy

En conclusion, les deux modèles proposés permettent de mettre en évidence la forte dépendance à la distance de la rétention des particules polydisperses.

REFERENCE

[AHF 17] Ahfir N., Hammadi A., Alem A., Wang H., Le Bras G., Ouahbi T., « Porous Media Grain Size Distribution and Hydrodynamic Forces Effects on Transport and Deposition of Suspended Particles », Journal of Environmental Sciences, 2017

[BRA 03] Bradford S., Simunek J., Bettahar M., Van Genuchten M., Yates S., « Modeling colloid attachment, straining, and exclusion in saturated porous media », Environmental Science and Technology, vol. 37, 2003, p.2242-2250

[LI 04] Li X., Scheibe T., Johnson W., « Apparent decreases in colloid deposition rate coefficient with distance of transport under unfavorable deposition conditions: A general phenomenon », Environmental Science and Technology, vol. 38, 2004, p.5616-5625

[LI 10] Li X., Li Z., Zhang D., « Role of low flow and backward flow zones on colloid transport in pore structures derived from real porous media » Environmental Science and Technology, vol. 44, 2010, p.4936-4942

[MA 17] E. MA, T. Ouahbi, H. Wang, N. Ahfir, A. Alem, A. Hammadi, « Modeling of retention and re-entrainment of mono- and poly-disperse particles effects of hydrodynamics, particle size and interplay of different-sized particles retention », Sci Total Environ 596-597, 2017, p. 222-229.

[MA 18] E. MA, T. Ouahbi, H. Wang, N. Ahfir, A. Alem, A. Hammadi, « Modeling of transport and retention of polydispersed particles: Effects of hydrodynamics and spatio-temporal evolution of deposition rate », Environmental Pollution, 237, 2018, p.1011-1022.

[TUF 05] Tufenkji N., Elimelech M., « Breakdown of Colloid Filtration Theory: Role of the Secondary Energy Minimum and Surface Charge Heterogeneities » Langmuir, vol. 21, 2005, p. 841-852