



ETUDE EXPERIMENTALE DU TRANSPORT DE PARTICULES EN SUSPENSIONS ET DU TRACEUR DISSOUT (FLUORESCINE) DANS UN MILIEU POREUX SATURE

EXPERIMENTAL STUDY OF THE TRANSPORT OF SUSPENDED PARTICLES AND DISSOLVED TRACER (FLUORESCEIN) IN SATURATED POROUS MEDIA

*IKNI T.¹, BERREKSI A.¹, BENKADJA R.², NEBBAR M. L.², KADRI M.³,
BENAMAR A.⁴*

¹ Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et environnement (LRHAE),
Département d'Hydraulique, Université de Bejaia, Algérie

² Département d'Hydraulique, Université de M'Sila, Algérie

³ Département de génie civil, Université de Boumerdes, Algérie

⁴ Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, Université du Havre, France

Ikni_tahar@yahoo.fr, berrekxi.ali@gmail.com

RESUME

Dans cette étude, nous avons présenté les résultats d'une analyse expérimentale de transport et dépôt de particules en suspension de limon (diamètre modal 7 μm) dans une colonne de laboratoire remplie de gravier. Les essais de traçage sont réalisés à différentes vitesses d'écoulement par des injections continues de particules en suspension et du traceur dissout. Les paramètres hydro dispersifs sont déterminés à partir du calage des courbes expérimentales par la solution analytique pour une injection continue de l'équation de convection-dispersion avec la cinétique de dépôt du premier ordre. Les résultats montrent que la restitution des particules et la cinétique de dépôt augmentent avec la vitesse d'écoulement. La cinétique de dépôt augmente avec la vitesse et suit une loi de puissance. La rétention diminue avec la vitesse d'écoulement. La dispersion des particules est légèrement supérieure à celle du traceur dissout, elle augmente avec la vitesse porale de façon non linéaire. L'analyse de la distribution de taille des particules restituées par le granulomètre laser a montré que les grosses particules arrivent en premier, puis les fines pour toutes les vitesses testées. La

taille des particules restituées augmente avec la vitesse. Les particules en suspension sont transportées avec un retard par rapport au traceur dissout.

Mots clés : Filtration, transport de particules, milieu poreux, cinétique de dépôt, traçage.

ABSTRACT

In this article, we presented the results of an experimental study of transport and deposition of silt suspended particles (modal diameter 7 μm) in a laboratory column filled with gravel. The tracer tests are performed at different velocities by continuous injections of suspended particles and of dissolved tracer. The hydro-dispersive parameters are determined from the experimental calibration curves by the analytical solution for a continuous injection of the convection-dispersion equation with the deposition kinetics of first order. The results show that the restitution of particles and deposition kinetics, increase with the flow velocity. The kinetics of deposit increases with speed and follows a power law. The retention decreases with flow velocity. The dispersion of the particles is slightly higher than that of the dissolved tracer; it increases with the pore velocity in a non-linear way. The analysis of the size distribution of restituted particles by the laser granulometer showed that the larger particles arrive first and then the fine for all tested speeds. The restituted particles size increases with speed. The suspended particles are carried with a delay relative to the dissolved tracer.

Keywords: Filtration, particle's transport, porous medium, deposition kinetics, tracing.

INTRODUCTION

L'agriculture a connu de grandes mutations, en bénéficiant de progrès agronomiques et techniques sans précédent. Les faits majeurs sont la spécialisation des systèmes de production, l'intensification de la production végétale, la concentration des élevages et la spécialisation régionale des productions (Sébillote et Meynard, 1990). Malgré tout cela, le transport des matières en suspension a un impact environnemental dans le domaine de la science de la terre, notamment en hydrogéologie et en génie environnemental. Il peut contribuer à la détérioration de la ressource en eau souterraine, soit directement, car certaines particules sont des polluants intrinsèques, soit

indirectement en transportant des polluants fixés à leur surface tels que bactéries et virus, pesticides, métaux et éléments radioactifs (Sen et Khilar, 2006; Malkovsky et Pek, 2009). La migration de contaminants dans les aquifères est un problème récurrent, notamment pour les nappes alluviales. La nappe alluviale d'Ain Zada (Algérie), alimentée par plusieurs cours d'eaux (Oued Kharoua, Oued Boussellam, Oued Guellal, Oued Malah, Oued Taghrout, Oued Ftaissa), est vulnérable vis-à-vis de la pollution de surface. L'étude du transport des particules dans les sols s'inscrit dans le cadre de la protection des sols et des eaux souterraines. Depuis de nombreuses années, un intérêt grandissant est porté aux écoulements de suspensions de particules colloïdales en milieu poreux. Les applications sont nombreuses dans le domaine du génie civil (endommagement des ouvrages), de l'environnement (migration de contaminants dans les aquifères) (Tufenkji et al., 2003; Sen et Khilar, 2006; Johnson et al., 2007) ou du génie pétrolier (récupération d'hydrocarbures par injection d'eau) (Roque et al., 1995). 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 et Elimelech, 1996). L'étude de ces systèmes nécessite une analyse des interactions qui ont lieu au sein du milieu poreux. Ces interactions du type particule-particule et particule-paroi des pores, sont à l'origine des phénomènes de transport et de dépôt des particules en suspension. Sous certaines conditions mécaniques et physicochimiques, des phénomènes d'arrachement et de dépôt de particules solides peuvent avoir lieu dans les sols naturels (Kanti et Khilar, 2006). Une conséquence directe de ces deux mécanismes est la modification des propriétés physiques des sols, comme la porosité, la perméabilité ...etc. Cela est souvent observé dans les puits d'exploitation d'eau potable ou de pétrole (Moghadasli et al., 2004). Les évolutions de ces paramètres sont observées expérimentalement et modélisées numériquement dans plusieurs études dans la littérature (Abboud, 1998; Reddi et al., 2005; Santos et Barros, 2010). 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). Le transport de particules en suspension peut être étudié à l'aide d'expériences de traçage dans des colonnes de laboratoire qui permettent le contrôle des paramètres d'essai, tel que le débit d'écoulement (Compère et al., 2001). Le principe de ces essais est de reproduire dans une colonne remplie d'un matériau granulaire un écoulement de particules en suspension. Les courbes de restitution sont obtenues en mesurant la concentration en particules à la sortie de la

colonne (Ahfir et al., 2007). L'ajustement de la solution analytique avec les courbes expérimentales permet d'obtenir les paramètres de transport (Sauty, 1978). Le but de ce travail est de déterminer l'effet de la vitesse sur le comportement de transport et la cinétique de dépôt lors de l'injection en continue d'une suspension de particules et d'étudier l'évolution de la taille des particules au cours de la restitution en fonction de la vitesse et en fonction du temps (quelles sont les particules qui arrivent les premières pour chaque vitesse d'écoulement). Les échantillons de l'effluent sont recueillis au début de la restitution, au milieu de partie ascendante de la courbe de restitution et sur le plateau pour chaque vitesse. Cette étude au laboratoire est censée simuler et caractériser les échanges de matières entre la surface (rivière) et l'aquifère alluvial de Ain Zada (Algérie) en fonction de la vitesse.

ETUDE EXPERIMENTALE ET CONSIDERATIONS THEORIQUES

Dispositif de traçage en colonne

La figure 1 montre le montage expérimental qui est composé des éléments suivants: d'une colonne en plexiglas alimentée par un réservoir d'eau ($\text{pH} = 6.8 \pm 0.01$) ou par un réservoir de particules en suspension (sous agitation permanente) et d'une pompe péristaltique (Masterflex). Le système de détection à la sortie de la colonne est composé d'un turbidimètre (Kobold) 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. La colonne, de diamètre intérieur 6.4 cm et de longueur 33 cm, est installée en position horizontale et elle est équipée de piézomètres qui permettent de suivre l'évolution de la charge hydraulique le long de l'échantillon au cours des essais. Après saturation et établissement du régime d'écoulement permanent, une vanne permet de basculer l'alimentation vers le réservoir de particules en suspension, et des injections en continue sont effectuées à débit constant.

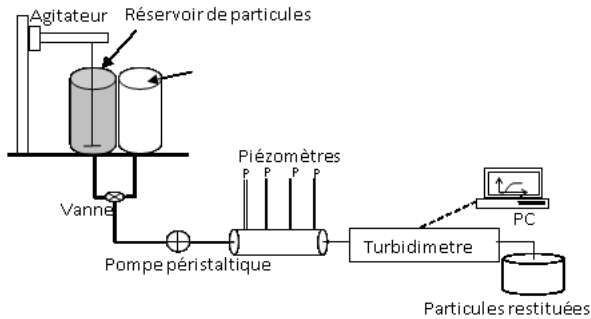


Figure 1 : Schéma général du dispositif expérimental

Matériaux

Dans le but de caractériser le transfert de particules en fonction de la vitesse d'écoulement, les essais sont réalisés sur des alluvions d'Ain Zada dont la courbe granulométrique de l'échantillon est présentée sur la figure 2. Le milieu a une granulométrie serrée (le coefficient d'uniformité $C_u = d_{60}/d_{10} = 1.53 < 2$), la taille des grains varie entre 1.5 et 4 mm, la porosité totale du milieu est voisine de 0.39 et sa perméabilité mesurée dans la colonne de laboratoire est égale à $2.35 \cdot 10^{-2}$ m/s (application de la loi de Darcy). La figure 3 montre la mesure au porosimètre à mercure de la distribution porale du milieu. Le diamètre modal de la distribution des pores du milieu est autour de 550 μm et le diamètre moyen des pores est de 336.6 μm .

Les particules en suspension sont des particules limoneuses sélectionnées dans les alluvions d'Ain Zada et dont la courbe granulométrique (granulomètre laser Malvern 2000) est présentée sur la figure 4. La taille des particules en suspension est comprise entre 0.4 μm et 40 μm avec un diamètre moyen $d_{p50} = 7$ μm . La concentration des particules injectées lors des essais est de 0.5g/l et celle du traceur dissout est de 100 $\mu\text{g/l}$.

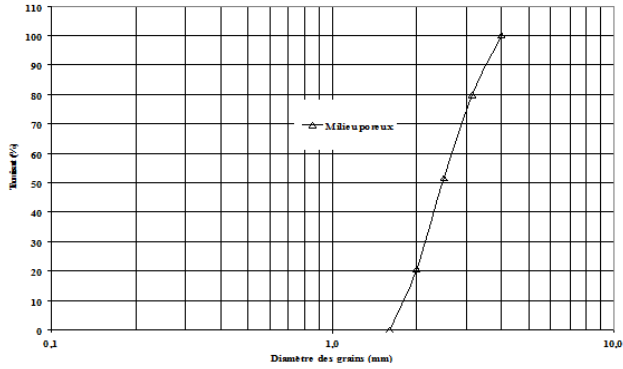


Figure 2 : Courbe granulométrique du milieu poreux

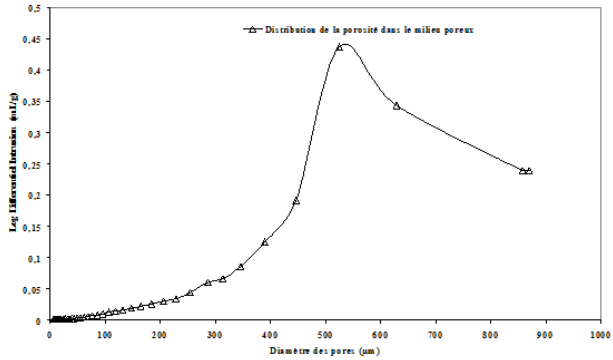


Figure 3 : Distribution de la porosité dans le milieu poreux (prosimètre à mercure)

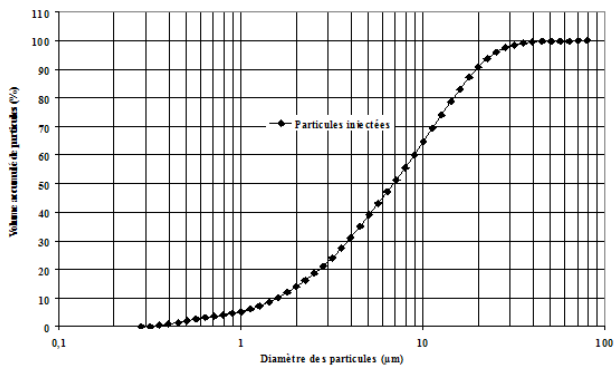


Figure 4 : Courbe granulométrique des particules en suspension injectées

Pour chaque milieu, huit essais de traçage avec le traceur dissout et les particules en suspension sont réalisés en injection continue. Les débits utilisés varient de 55 ml/min à 750 ml/min, correspondant à des vitesses de Darcy qui varient entre 0.029 cm/s et 0.39 cm/s. Ces vitesses d'écoulement correspondent à un nombre de Reynolds compris entre 0.7 et 9. On peut alors considérer que l'écoulement se fait dans le régime de la loi de Darcy.

Considérations théoriques et interprétation des données expérimentales

Avec l'hypothèse que le dépôt des matières en suspension (MES) ne modifie pas substantiellement les propriétés du milieu poreux pour des faibles concentrations et une courte durée d'injection (3.5 Vp), le dépôt et transport de particules en suspension dans un milieu poreux saturé soumis à un écoulement permanent (flux constant) est décrit par l'équation de convection-dispersion avec une cinétique de dépôt du premier ordre (Van Genuchten, 1981; Wang, 2001).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - U_p \frac{\partial C}{\partial z} - K_{dep} C \quad (1)$$

Où C est la concentration des MES [$M.L^{-3}$], D_L le coefficient de dispersion [$L^2.T^{-1}$], K_{dep} le coefficient cinétique de dépôt [T^{-1}], U_p la vitesse de pore [$L.T^{-1}$] et t le temps [T].

Dans le cas d'une injection continue dans un milieu semi infini, les conditions initiales et aux limites sont décrites comme suit:

$$\left. \begin{array}{l} C(t=0, z) = 0 \\ C(t, z=0) = C_0 \\ C(t, z \rightarrow \infty) = 0 \end{array} \right\} \quad (2)$$

La solution analytique pour une injection continue est donnée par l'équation (3) (Van Genuchten, 1981; Wang et al., 2000).

$$C(z,t) = \frac{C_0}{2} \left[\exp\left(\frac{U_p z}{2D_L} [1 - \varphi]\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{z - U_p \varphi t}{(4D_L t)^{1/2}}\right) + \exp\left(\frac{U_p z(1 + \varphi)}{2D_L}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{z + U_p \varphi t}{(4D_L t)^{1/2}}\right) \right] \quad (3)$$

Avec :

$$\varphi = \sqrt{1 + \frac{4K_{dep} D_L}{U_p^2}} \quad (4)$$

Où *erfc* est une fonction d'erreur complémentaire. Pour $z = L$ (longueur de la colonne) et en introduisant le nombre de Peclet de la colonne P_e et le temps de transfert par convection pure t_c dans l'équation (3).

$$\left. \begin{aligned} P_e &= \left(\frac{U_p L}{D_L} \right) \\ t_c &= \frac{L}{U_p} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

L'équation (3) peut s'écrire:

$$C(t) = \frac{C_0}{2} \left[\exp\left(\frac{P_e}{2}(1-\varphi)\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{P_e}{4t_c}} \frac{(t_c - \varphi t)}{\sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{P_e}{2}(1+\varphi)\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{P_e}{4t_c}} \frac{(t_c + \varphi t)}{\sqrt{t}}\right) \right] \quad (6)$$

Quand le nombre de Peclet devient important ($Pe > 20$), le second terme de l'équation (6) est négligeable devant le premier terme, et l'équation (6) se réduit à:

$$C(t) = \frac{C_0}{2} \left[\exp\left(\frac{P_e}{2}(1-\varphi)\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{P_e}{4t_c}} \frac{(t_c - \varphi t)}{\sqrt{t}}\right) \right] \quad (7)$$

Les valeurs de Pe obtenues lors des essais varient entre 22 et 55. Quand le temps t tend vers ∞ , la concentration atteint le palier désigné par C_p qui s'écrit:

$$C_p = C_0 \left[\exp\left(\frac{P_e}{2}(1-\varphi)\right) \right] \quad (8)$$

En divisant l'équation (7) par l'équation (8) on obtient :

$$\frac{C(t)}{C_p} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{P_e}{4t_c}} \frac{(t_c - \varphi t)}{\sqrt{t}}\right) \quad (9)$$

La solution analytique (éq. 9) de l'équation de convection-dispersion peut être interprétée en introduisant la fonction inverse d'erreur complémentaire *inverfc*. L'équation (9) se réécrit alors:

$$\operatorname{Inverfc}\left(\frac{2C}{C_p}\right) = \sqrt{\frac{P_e}{4t_c}} \frac{(t_c - \varphi t)}{\sqrt{t}} \quad (10)$$

En utilisant le principe de la méthode graphique linéaire (Wang et al, 1987; Wang, 2001; Elkawafi 2010; Tran, 2012) basée sur la transformation de la

solution analytique (10) de l'équation de transport en équation linéaire après multiplication par \sqrt{t} , l'équation (10) est réécrite:

$$\text{Inverfc}\left(\frac{2C}{C_P}\right)\sqrt{t} = -\varphi\sqrt{\frac{P_e}{4t_c}}t + \sqrt{\frac{P_e t_c}{4}} \quad (11)$$

Avec :

$$\begin{cases} yt = \text{Inverfc}\left(\frac{2C}{C_0}\right) \times \sqrt{t} \\ a = -\varphi\sqrt{\frac{P_e t_c}{4}} \\ b = \sqrt{\frac{P_e t_c}{4}} \end{cases} \quad (12)$$

Nous obtenons finalement une relation linéaire entre yt et t dont la pente est a et l'ordonnée à l'origine b (Figure 5):

$$yt = at + b \quad (13)$$

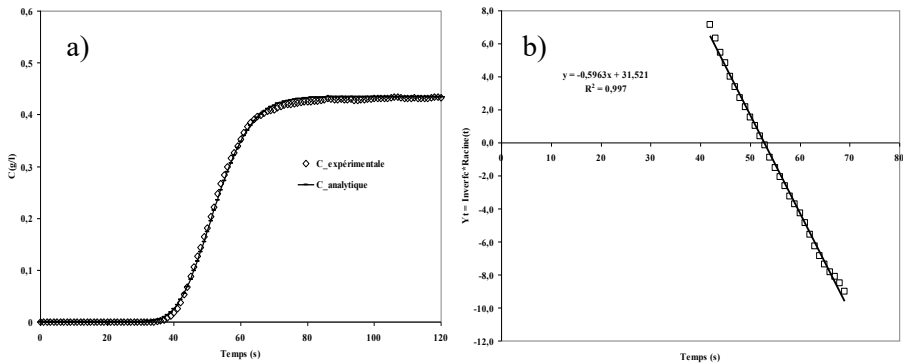


Figure 5 : Principe de la méthode graphique linéaire (MGL). (a) Calage de la courbe expérimentale par la solution analytique. (b) Transformation de la courbe expérimentale par la méthode graphique linéaire (MGL)

Pour appliquer cette méthode, on calcule tout d'abord les couples de valeurs (yt , t) à partir des données expérimentales (courbes de restitution). Ensuite, une fois que a et b sont approximés par la régression linéaire, on détermine le nombre de peplet P_e , le temps de convection t_c et φ de la façon suivante:

$$\begin{aligned}
 Pe &= 2 \ln\left(\frac{C_p}{C_0}\right) - 4a.b & (14) \\
 t_c &= \frac{2.b^2}{\ln\left(\frac{C_p}{C_0}\right) - 2a.b} \\
 \varphi &= \frac{1}{1 - \frac{\ln\left(\frac{C_p}{C_0}\right)}{2a.b}}
 \end{aligned}$$

Finalement, on détermine les paramètres K_{dep} , α_L et U_p selon les équations :

$$K_{dep} = -\frac{\ln\left(\frac{C_p}{C_0}\right)}{t_c} \left(1 - \frac{\ln\left(\frac{C_p}{C_0}\right)}{Pe} \right) \quad (15)$$

$$\alpha_L = \frac{L}{Pe}$$

$$U_p = \frac{L}{t_c}$$

RESULTATS ET DISCUSSION

Ajustement des courbes expérimentales

En utilisant les paramètres définis par la linéarisation des courbes de restitution expérimentales, on reproduit celles-ci en utilisant la solution analytique de l'équation de transport (éq. 7). Sur la figure 6 est présenté un exemple d'ajustement des courbes expérimentales de restitution des particules en suspension et de la fluorescéine. Une bonne approximation en général des courbes expérimentales par les solutions analytiques est obtenue. Ces courbes de restitution expérimentales obtenues présentent l'évolution de la concentration réduite (concentration c en sortie de colonne rapportée à la concentration d'injection c_0) en fonction du volume de pore. La concentration réduite atteinte au plateau des courbes de restitution de la fluorescéine est systématiquement égale à 1, les molécules de soluté sont donc entièrement restituées. Les résultats sont différents pour les traçages avec les particules, la concentration réduite

atteinte au plateau n'est pas égale à 1, ce qui témoigne du fait qu'une partie des particules est retenue dans le milieu poreux. La valeur de la concentration réduite (c/c_0) est d'autant plus faible que les vitesses sont faibles.

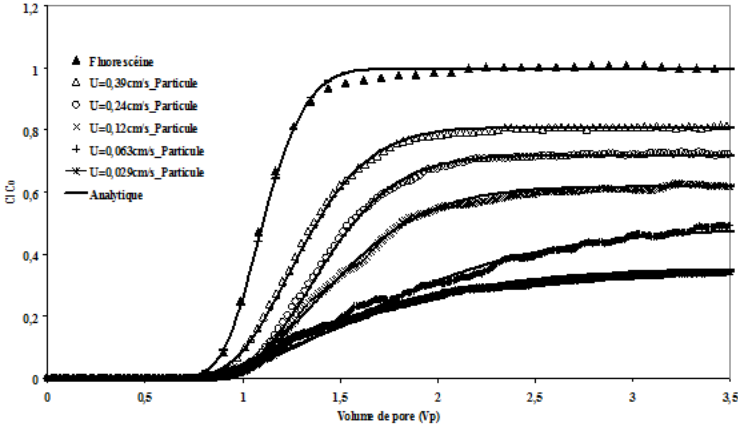


Figure 6 : Calage des courbes expérimentales par la méthode de régression linéaire (MRL)

Influence de la vitesse

Rétention et restitution

Après chaque essai d'injection d'une masse connue de particules en suspension à l'entrée de la colonne, il est important de connaître les fractions de particules restituées à la sortie et celles déposées dans le milieu poreux. La masse des particules restituées à la sortie du milieu poreux est représentée par l'aire de la courbe de restitution. Cette masse restituée est déterminée par le taux de restitution $r(\%)$ qui est calculé à partir de l'équation (16).

$$r(\%) = \frac{M}{M_0} \times 100 \quad (16)$$

Avec:

$$M = Q \int_0^d C(t).dt \quad (17)$$

$$M_0 = Q.d.C_0 \quad (18)$$

- M: masse du traceur restituée

- $C(t)$: concentration au temps t ($M.L^{-3}$)
- Q : débit ($L^3.T^{-1}$)
- d : durée de l'injection (T)
- C_0 : concentration initiale d'injection ($M.L^{-3}$)

Le taux de rétention $R(\%)$ est égal à $(100- r(\%))$. Sur la figure 7 est présentée la variation du taux de rétention $R(\%)$ et de restitution $r(\%)$ des particules de limon en fonction de la vitesse de pore U_p pour le milieu poreux. On constate que le taux de restitution augmente avec la vitesse d'écoulement. En conséquence, le taux de rétention des particules en suspension diminue avec la vitesse d'écoulement. En effet, à forte vitesse, les forces hydrodynamiques exercées par l'écoulement sont suffisantes pour entraîner les particules les plus grosses ; alors qu'à faible vitesse elles restent piégées dans le milieu. Ce résultat est conforme à certains travaux dans la littérature (Lahav et Tropp, 1980; Elimelech et O'Melia, 1990; Kretzschmar et al., 1999).

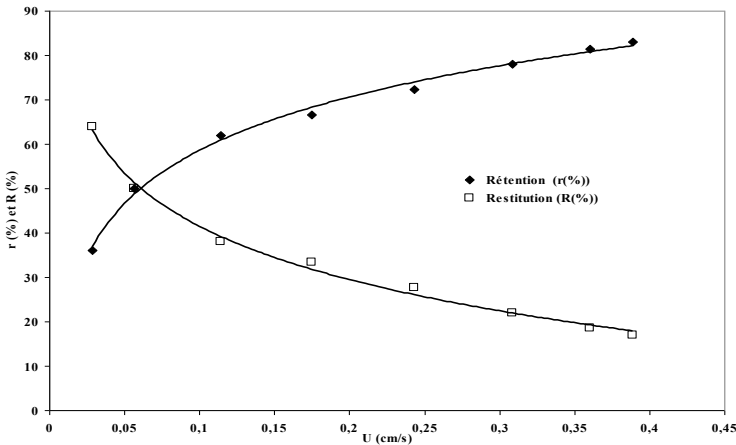


Figure 7 : Evolution du taux de restitution et de rétention des particules en suspension en fonction de la vitesse de Darcy ($U_{cm/s}$)

Cinétique de dépôt (K_{dep})

Les différentes séries de traçage réalisées dans ce travail, montrent que le coefficient cinétique de dépôt (K_{dep}) augmente avec la vitesse d'écoulement (Figure 8). L'évolution de ce coefficient avec la vitesse d'écoulement est représentée par une relation de puissance ($K_{dep}=\alpha X^m$), dont l'exposant m est égal à 0.469 et la pente α est de 22.256. Dans la littérature, le coefficient cinétique de dépôt (K_{dep}) augmente avec la vitesse d'écoulement et est représenté par une relation de type linéaire pour les colloïdes (Herzig et al.,

1970; Porubcan et al., 2011) ou de puissance pour les particules en suspension (Massei et al., 2002; Benamar et al., 2005 et 2007; Ahfir et al., 2007 et 2009; Bennacer et al., 2013).

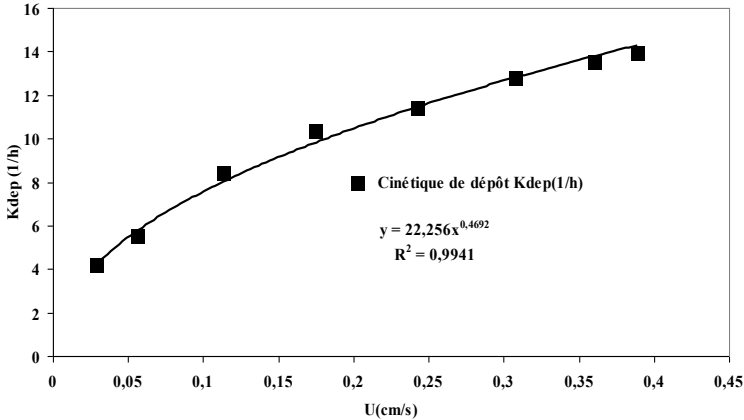


Figure 8 : Le coefficient de cinétique de dépôt en fonction de la vitesse Darcy (Ucm/s)

Dispersion hydrodynamique

Le terme D_L dans l'équation de convection dispersion (éq. 1) représente la dispersion hydrodynamique incluant la dispersion cinématique et la diffusion moléculaire donnée par la formule suivante (Hu et Brusseau, 1994):

$$D_L = \frac{D_0}{\tau^2} + \alpha_L \cdot U^m \quad (19)$$

Où D_0 est le coefficient de diffusion moléculaire en eau libre, α_L la dispersivité longitudinale, τ la tortuosité du milieu poreux et m un coefficient empirique. Les valeurs de m peuvent être supérieures ou inférieures à 1 (Koltz et al., 1980; Hu et Brusseau, 1994; Ahfir et al., 2009). Les relations entre le coefficient de dispersion D_L , les conditions d'écoulement et les caractéristiques des milieux poreux ont fait l'objet de plusieurs études (Koltz et al., 1980; Brusseau, 1993; Hu et Brusseau, 1994; Roychoudhury, 2001). Pour les valeurs du nombre de Péclet de diffusion supérieures à 5, la dispersion cinématique domine la diffusion moléculaire (Pfannkuch, 1963) qu'on néglige alors, et l'équation 19 devient.

$$D_L = \alpha_L \cdot U^m \tag{20}$$

Le coefficient de dispersion longitudinal D_L déterminé par le calage des données expérimentales à l'aide des deux traceurs (fluorescéine et particules en suspension) dans le milieu poreux est représenté sur la figure 9. Ce coefficient de dispersion D_L augmente avec la vitesse et il suit une loi de puissance dont l'exposant m est inférieur à 1 pour les deux traceurs. Le coefficient de dispersion D_L des particules en suspension est supérieur à celui du traceur dissous à partir d'une certaine vitesse. A faible vitesse, le comportement dispersif des deux traceurs est similaire. Cela peut être expliqué par une large distribution de taille des particules en suspension injectées dans le milieu qui produit une grande dispersion de la vitesse des particules transportées. Cette différence est d'autant plus marquée que les vitesses d'écoulement sont importantes (Ahfir et al., 2009), où les particules sont transportées à des vitesses variables en raison notamment des forces d'inertie qui agissent sur les particules. Ce comportement peut être aussi lié à l'effet d'exclusion de taille qui est plus marqué à forte vitesse d'écoulement (Di Marzio et Guttman, 1970; Kretzschmaret al., 1997; Benamar et al., 2005).

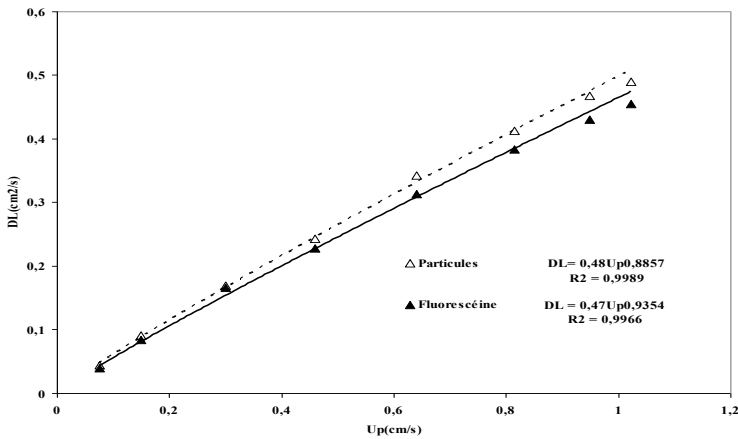


Figure 9 : Coefficient de dispersion en fonction de la vitesse de pore U_p . Dispersion du traceur particulaire (limon $7\mu\text{m}$) par rapport au traceur dissout (fluorescéine)

GRANULOMETRIE DES PARTICULES RESTITUEES PAR LE MILIEU POREUX

Pour chaque injection continue des MES, le suivi granulométrique des particules en suspension à la sortie de la colonne permet d'étudier l'évolution des tailles des particules au cours de la restitution en fonction de la vitesse et en fonction du temps. Le prélèvement des particules restituées pour chaque vitesse est fait au début de la restitution (T1), au milieu de la montée de la courbe (T2) et sur le plateau (T3) (Figure 10).

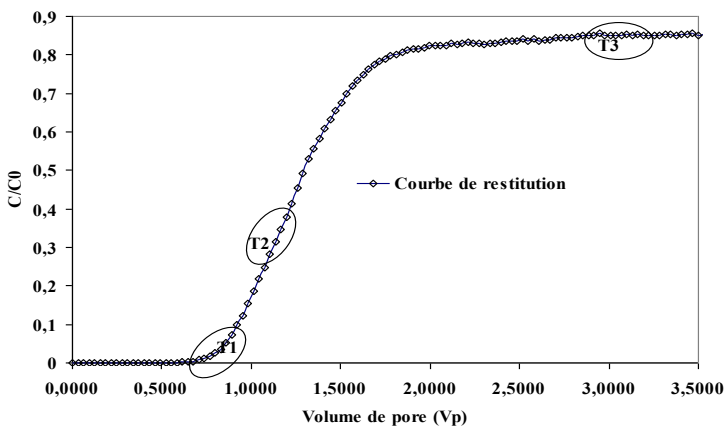


Figure 10 : Représentation des trois temps des échantillons restitués

Effet de la vitesse sur la variation de la taille des particules restituées

Sur la figure 11 sont présentées les courbes granulométriques des particules de limon restituées pour différentes vitesses au niveau du plateau de la courbe de restitution à l'instant T3 pour le milieu poreux. Pour toutes les vitesses testées, lors du passage des particules dans le milieu poreux, il s'opère un tri granulométrique. Les diamètres modaux augmentent avec l'augmentation de la vitesse. Quant la vitesse augmente, les forces hydrodynamiques qui s'exercent sur les particules augmentent aussi. Ces résultats montrent bien que les grosses particules sont mieux restituées à fortes vitesses d'écoulement, tandis qu'à faibles vitesses sont restituées les petites particules en grande majorité (Ahfir et al., 2009).

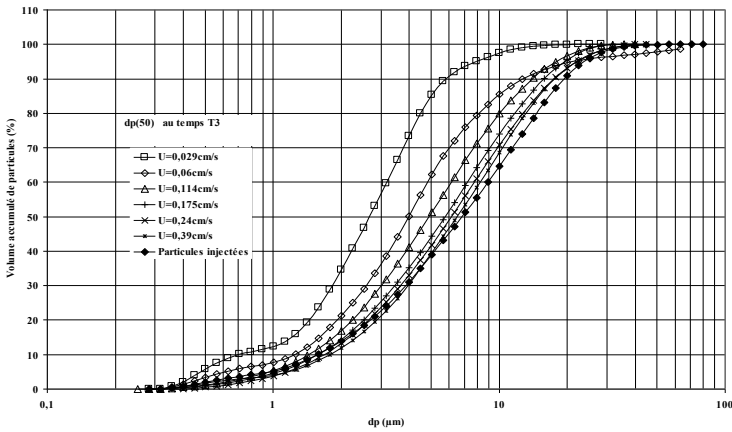


Figure 11 : Evolution du diamètre moyen (d_{p50}) des spectres microgranulométriques des particules restituées en fonction de la vitesse d'écoulement à l'instant T3 pour le milieu poreux

Variation de la taille des particules en fonction du temps

Plusieurs travaux ont montré que le temps de transfert des particules colloïdales est inférieur à celui des molécules d'un soluté (Corapcioglu et Jiang, 1993; Grindrod et al., 1994). Les molécules de soluté peuvent accéder, de par leur petite taille et leur fort coefficient de diffusion, à une part plus importante de la porosité (porosité matricielle), ceci induisant un retard par rapport aux particules. Massei et al. (2002) a montré les mêmes résultats lors d'une injection instantanée des particules en suspension (supérieure à 1 μm). Les particules les plus grosses arrivent en avance par rapport aux particules les plus fines. La figure 12 illustre bien que la taille des particules diminue en fonction du temps.

Les grosses particules arrivent les premières puis les fines. Les fines particules ont accès à une plus grande partie de la structure porale du milieu. La plupart d'entre elles diffusent plus largement dans le milieu et sont donc retardées du fait d'une trajectoire plus complexe que celles plus grosses. Ces dernières empruntent des chemins préférentiels constitués de gros pores (exclusion de taille (Di Marzio et Guttman, 1970)). Pour toutes les vitesses testées, les grosses particules qui arrivent puis les fines (Figure 13).

L'écart entre les diamètres modaux des particules restituées est important entre l'instant T1 et T2, il devient faible entre l'instant T2 et T3. La figure 13 montre bien que les premières particules qui arrivent ont un diamètre modal (d_{p50}) supérieur au diamètre modal des particules injectées à partir de la vitesse de Darcy $U = 0.31$ cm/s.

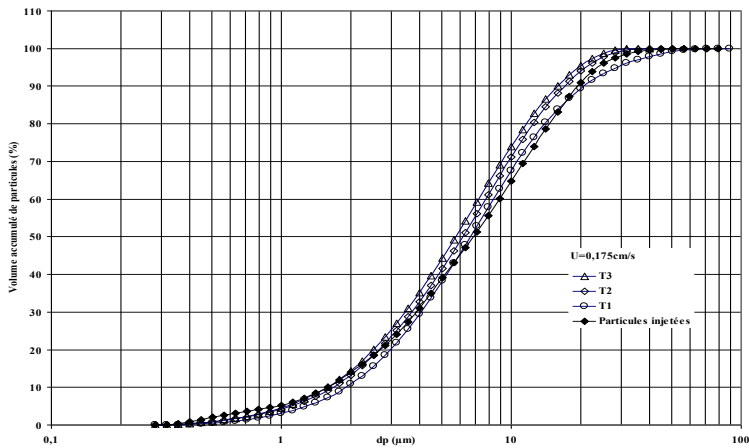


Figure 12 : Evolution du diamètre moyen (d_{p50}) des spectres microgranulométriques des particules restituées du milieu poreux aux temps T1, T2 et T3 pour la vitesse de Darcy $U = 0.175$ cm/s

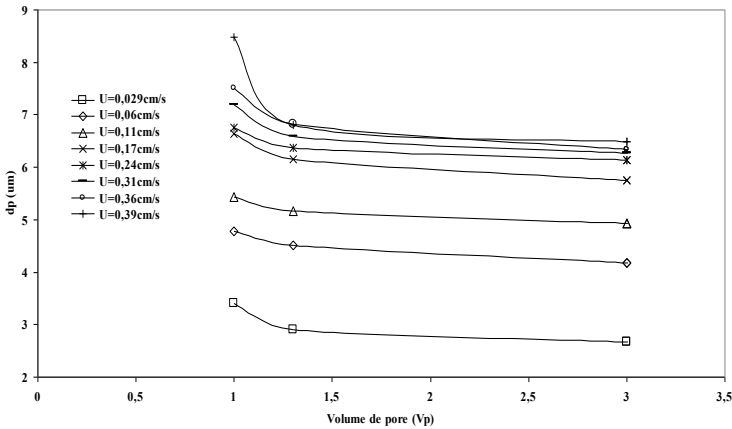


Figure 13 : Evolution du diamètre moyen (d_{p50}) des spectres microgranulométriques des particules restituées du milieu poreux aux temps T1, T2 et T3 pour toutes les vitesses testées

VITESSE RELATIVE DE TRANSPORT ENTRE LES PARTICULES EN SUSPENSION ET LE TRACEUR DISSOUS

Les particules en suspension arrivent en retard par rapport au traceur dissout (Figures 6 et 14). Ce résultat est inhabituel en comparaison avec les résultats présentés dans la littérature pour les particules colloïdales (Corapcioglu et Jiang, 1993; Grindrod et al., 1994). Ce facteur de retard, noté V_r , est exprimé par le rapport entre la vitesse du traceur dissout (fluorescéine) et celle des particules. Sur la figure 14 est représenté le ratio V_r en fonction de la vitesse de pore U_p . On peut déduire de cette courbe que V_r est toujours supérieur à 1 quelque soit la vitesse d'écoulement dans le milieu poreux. Cela nous permet de déduire que le retard des particules restituées est dû probablement à l'effet de leur poids (gravité, inertie et collisions). Lorsque l'inertie d'une particule est forte, celle-ci ne pourra plus suivre exactement les lignes de courant et va donc pouvoir impacter les grains du milieu. Plus l'inertie d'une particule est forte, plus la probabilité et la fréquence de collisions entre les particules en suspension et les grains du milieu est importante. L'effet de gravité est croissant avec la taille des particules et peut entraîner une trajectoire plus complexe que celle du traceur dissous.

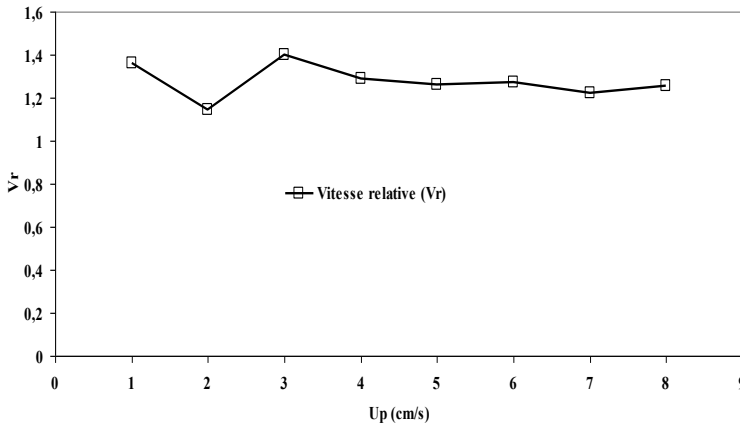


Figure 14 : Vitesse relative V_r en fonction de la vitesse de pore U_p pour le milieu poreux

CONCLUSION

Une méthode de régression linéaire est utilisée pour estimer les paramètres hydrodispersifs du milieu poreux lors d'interprétation des traçages réalisés avec les particules en suspension et la fluorescéine par une injection continue. Les résultats d'interprétation permettent de conclure que tous les paramètres (taux de restitution, coefficient de dépôt, dispersion, et taux de rétention) pour un transport de particules en suspension varient en fonction de vitesse d'écoulement. Ces résultats ont permis de montrer que la restitution augmente et la rétention diminue avec l'augmentation de la vitesse. La cinétique de dépôt et la dispersion augmentent avec la vitesse d'écoulement, elles suivent une loi de puissance. La dispersion des particules en suspension est supérieure à celle du traceur dissout en raison des effets inertiels et de gravité. Pour toutes les vitesses testées, le suivi granulométrique des particules en suspension à la sortie de la colonne permet de montrer que les grosses particules arrivent avant les fines. Ces dernières peuvent accéder, de par leur petite taille et leur fort coefficient de dispersion, à une partie plus importante de la porosité (porosité matricielle), induisant ainsi un retard par rapport aux grosses particules. La taille des particules restituées augmente avec la vitesse, cela est dû à l'augmentation des forces hydrodynamiques exercées sur les particules en suspension. L'interprétation des courbes de restitution a montré que les particules en suspension sont transportées avec un retard par rapport au traceur dissout. Ce retard est dû probablement à l'effet de leur poids (gravité, inertie et collisions).

BIBLIOGRAPHIE

- Abboud, N.M., 1998. Numerical solution and sensitivity analysis of pore liquid pressure and cake porosity to model parameters. *Transport in Porous Media*, 30 (2), 199-216.
- Ahfir, N.D., Wang, H.Q., Benamar, A., Alem, A., 2007. Transport and deposition of suspended particles in saturated porous media: hydraulic effect. *Hydrogeology Journal*, 15, 659-668.
- 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, *Transp Porous Med.* 76, 289-307, DOI 10.1007/s11242-008-9247-3
- Benamar, A., Wang, H.Q., Ahfir, N.D., Alem, A., Masséi, 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

- Bennacer, L., Ahfir, N-D., Bouanani, A., Alem, A., Wang, H.Q., 2013 Suspended Particles Transport and Deposition in Saturated Granular Porous Medium: Particle Size Effects. *Transp Porous Med.* DOI 10.1007/s11242-013-0220-4, ©Springer Science+Business Media Dordrecht 2013.
- Brusseau, M.L., 1993. The influence of solute size, pore water velocity, and intraparticle porosity on solute dispersion and transport in soil. *Water Resour. Res.* 29 (04), 1071-1080.
- Compère, F., Porel, G., Delay, F., 2001. Transport and retention of clay particles in saturated porous media. Influence of ionic strength and pore velocity. *Journal of Contaminant Hydrology*, 49, 1-21.
- Corapcioglu, M.Y., Jiang, S., 1993. Colloid-facilitated groundwater contaminant transport. *Water Resour. Res.* 29, 2215–2226.
- Di Marzio, E.A., Guttman, C.M., 1970. Separation by flow. *Macromolecules*, 3 (2)131-146.
- Elkawafi, A., 2010. Colmatage d'un milieu poreux soumis à un écoulement chargé de particules. Thèse de doctorat, Université de Havre (France), Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, LOMC-FRE 3102, CNRS
- Elimelech, M., O'Melia, C.R., 1990. Kinetics of deposition of colloidal particles in porous media. *Environmental Sciences Technologies*, 24, 1528-1536.
- Grindrod, P., Edwards, M.S., Higgo, J.J.W., Williams, G.M., 1994. Analysis of colloidal and tracer breakthrough curves. Intera Information Technologies Ltd, Henley-on-Thames. British Geological Survey, Keyworth, UK.
- Herzig, J.P., Leclerc, D.M., Le Goff, P., 1970. Flow of suspension through porous media, Application to deep bed filtration. *Industrial and Engineering Chemistry*, 62, 8–35.
- Hu, Q., Brusseau, M.L., 1994. The effect of solute size on diffusive-dispersion transport in porous media. *Journal of Hydrology*, 158, 305-317.
- Johnson, W.P., Li, X., Assemi, S., 2007. Deposition and re-entrainment dynamics of microbes and non-biological colloids during non-perturbed transport in porous media in the presence of an energy barrier to deposition. *Advanced in Water Res.* 30, 1432-1454.
- Kanti sen, T., Khilar, C.K., 2006. Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media. *Advances In Colloid and Interface Science*, 119, 71-96.
- Koltz, D., K.-P. Seiler, H. Moser, F. Neumaier., 1980. Dispersivity and velocity relationship from laboratory and field experiments. *Journal of Hydrology*, 45, 169-184.
- Kretzschmar, R., Barmettler, K., Grolimund, D., Yan, Y., Borkovec, M., Sticher, H., 1997. Experimental determination of colloid deposition rates and collision efficiencies in natural porous media. *Water Resour. Res.* 33 (5), 1129-1137.

Etude expérimentale du transport de particules en suspensions et du traceur dissout (fluorescéine) dans un milieu poreux saturé

- Kretzschmar, R., Borkovec, M., Grolimund, D., Elimelech, M., 1999. Mobile subsurface colloids and their role in contaminant transport. *Adv. Agron.* 66, 121-193.
- Lahav, N., Tropp, D., 1980. Movement of synthetic microspheres in saturated soil columns. *Soil Science*, 130 (3), 151-156.
- Malkovsky, V.I., Pek, A.A., 2009. Effect of elevated velocity of particles in groundwater flow and its role in colloid-facilitated transport of radionuclides in underground Medium. *Transport in Porous Media*, 78, 277-294.
- 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
- Moghadasi, J., Jamialahmadi, M., Sharif, A., 2004. Theoretical and experimental study of particle movement and deposition in porous media during water injection. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 43, 163-181.
- Pfannkuch, H.O., 1963. Contribution à l'étude des déplacements de fluides miscibles dans un milieu poreux. *Rev Inst Fr Pétrol.* 18, 215-270.
- Porubcan, Alexis A., Xu, S.P., 2011. Colloid straining within saturated heterogeneous porous media. *Water Res.* 45, 1796 -1806.
- Ryan, J.N., Elimelech, M., 1996. Colloid Mobilization and Transport in Groundwater. *Col. Surfaces A.* 107, 1-56
- Reddi, L.N., Xiao M., Hajra, M.G., Lee I.M., 2005. Physical Clogging of Soil Filters Under Constant Flow Rate vs. Constant Head. *Canadian Geotechnical Journal*, 42, 804-811.
- Roque, C., Chauveteau, G., Renard, M., Thibault, G., Bouteica, M., 1995. Mechanisms of formation damage by retention of particles suspended in injection water. *Society of Petroleum Engineers SPE*, 30110, 329-343.
- Roychoudhury, A.N., 2001. Dispersion in unconsolidated aquatic sediments. *Stuarine, Coastal and Shelf Science*, 53, 745-757.
- Santos, A., Barros, P.H.L., 2010. Multiple particle retention mechanisms during filtration on porous media. *Environ. Sci. Technol.* 44(7), 2515-2521.
- Sauty, J.P., 1978. Identification des paramètres hydrodispersifs dans les aquifères par interprétation de traçages en écoulement cylindrique convergent ou divergent. *Journal of Hydrology*, 39, 68-103.
- Sébillotte, M., Meynard, J.M., 1990. Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées. In: *Nitrates, Agriculture, Eau*, R Calvet (ed), INRA Editions, Paris, 289-312.
- Sen, T.K., Khilar, K.C., 2006. Review on subsurface colloids and colloids-associated contaminant transport in saturated porous media. *Advances in Colloid and Interface Science*, 119 (2-3), 71-96.

- Silliman, S.E., 1995. Particles transport through two-dimensional saturated porous media: influence of physical structure of the medium. *J. Hydrol.* 167, 79-98
- Tran, D.H., 2012. Caractérisation du milieu poreux : approches mécanique et acoustique Thèse de doctorat, Université de Havre (France), 156 pages. Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, LOMC-FRE 3102, CNRS
- Tufenkji, N., Redman, J.A., Elimelech, M., 2003. Interpreting deposition patterns of microbial particles in laboratory-scale column experiments, *Environ. Sci. Technol.* 37, 616–623.
- Van Genuchten, M.T., 1981. Analytical solution for chemical transport with simultaneous adsorption zero order production and first order decay, *JHydro.*49
- Wang, H.Q., Crampon N., Garnier J.M., Huberson S., 1987. A linear graphical method for determining hydrodispersive characteristics in tracer experiments with instantaneous injection. *J. Hydrol.* 95, 143–154.
- 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.
- Wang, H.Q., 2001. Transferts de matières en milieu saturé : Outils mathématiques et modélisation numérique. Habilitation à diriger des recherches (H.D.R.), Université de Rouen, 88p.