

Étude expérimentale du dépôt de particules colloïdales en milieu poreux : Influence de l'hydrodynamique et de la salinité

Abdelkader Djehiche^{a,b}, Vladimir Canseco^a, Aziz Omari^a, Henri Bertin^{a,*}

^a Laboratoire TREFLE (UMR CNRS 8508), Université de Bordeaux, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence cedex, France

^b Université Amar Telidji de Laghouat, BP 37G, Laghouat 03000, Algérie

Reçu le 22 novembre 2007 ; accepté après révision le 31 août 2009

Disponible sur Internet le 1^{er} octobre 2009

Présenté par Michel Combarnous

Résumé

Cette Note se situe dans le cadre des études concernant le transport de colloïdes en milieux poreux, sujet qui concerne de nombreux domaines d'application tels que la contamination des eaux souterraines, le génie pétrolier ou le génie civil. Une étude expérimentale du dépôt de particules de Latex de polystyrène dans un milieu poreux artificiel consolidé est présentée. L'influence de la force ionique de la suspension colloïdale et du débit d'injection sur le dépôt de particules est étudiée. On observe que, au-delà d'une valeur critique, l'efficacité du collecteur (surface solide sur laquelle se déposent les particules) croît avec la force ionique alors que l'efficacité du collecteur décroît quand le débit d'injection augmente. Des mesures locales, par atténuation d'un rayonnement γ mettent en évidence la réduction de porosité due au dépôt de particules. Les épaisseurs de couches déposées, mesurées en fin d'expérience, correspondent à des structures de monocouches de particules déposées. **Pour citer cet article : A. Djehiche et al., C. R. Mecanique 337 (2009).**

© 2009 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Experimental study of colloidal particles deposit in porous media: Hydrodynamics and salinity effects. This study deals with colloid transport in porous media which applications are found in subsurface water, petroleum engineering or civil engineering. An experimental study of colloidal polystyrene Latex particles deposition in a consolidated porous medium is presented. The influence of ionic strength of the colloid suspension and the flow rate on particle deposition is investigated. We see first that beyond a critical salt concentration, the total collector efficiency increases with the ionic strength. Moreover, such collector efficiency decreases as the flow rate increases according to theory. In other respects, using a γ ray attenuation technique allows us to measure local porosity fluctuation due to particles deposition. By this way deposition kinetics may be followed locally and precisely. Nevertheless when considering the thickness of the adsorbed layer over large scales, obtained results using the γ rays attenuation technique are found in good agreement with those obtained by means of an usual technique especially at latest stages of adsorption process. **To cite this article: A. Djehiche et al., C. R. Mecanique 337 (2009).**

© 2009 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Milieux poreux ; Colloïdes ; Dépôt ; Force ionique

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : henri.bertin@bordeaux.ensam.fr (H. Bertin).

Keywords: Porous media; Colloid; Deposit; Ionic strength

Abridged English version

Colloids transport in porous media is a topic of central importance because it deals with subsurface water contamination as well as formation damage in petroleum engineering. Colloids behavior in porous media depends on physico-chemical properties of the fluids and solids and on hydrodynamics. Physico-chemical interactions between particles or between particles and pore surface are described by the DLVO theory which includes attractive and repulsive forces and is able to predict the adhesion conditions. Hydrodynamics plays also a role on particle deposition because it controls the particle advection in the pores. The collector efficiency is known to depend on Péclet number (ratio of convective forces to diffusion), Pe , following the power law $Pe^{-2/3}$. Moreover, hydrodynamic shadowing plays an important role in the sense that, when a particle is deposited on a surface, another flowing particle cannot be deposited in its close vicinity and is transported away at a distance that depends obviously on the velocity. Hydrodynamic may also play a role on detachment process when hydrodynamic forces become more important than adhesion forces.

An experimental setup has been designed to study particle deposition in porous media (Fig. 3). The colloidal suspension is made of pure deionized water, calibrated polystyrene Latex particles (diameter = 780 nm and concentration = 200 ppm), Iodide Potassium salt which concentration is tuned to control ionic strength and a bactericide. pH is set at 7.0. The porous medium is an artificial consolidated core of high porosity ($\approx 43\%$) and high permeability ($\approx 8 \times 10^{-12} \text{ m}^2$). During a typical experiment we measure the colloid concentration in the effluents, the pressure drop along the core and the local porosity fields using the γ -rays attenuation technique. All these data are interpreted in term of collector efficiency, number of deposited particles, porosity reduction and deposited particle layer thickness.

Particle deposition depends strongly on ionic strength at a given value of Péclet number. The collector efficiency (Fig. 5) shows a linear dependence on ionic strength beyond a critical value which is, in our case close to 0.0015 M. The collector efficiency (Fig. 8), at a given value of ionic strength, shows a dependence on Péclet number ($\sim Pe^{-2/3}$) as expected.

Local measurements of porosity, using the γ -ray attenuation technique, gives us important information on the way particle adsorption proceeds. We see clearly that particles are firstly deposited in the zone close to the core inlet, then all the core is invaded and a particle monolayer is deposited all along the core. The validity of local measurement data, in term of mean values, is confirmed by comparison with permeability reduction measurement.

1. Introduction

Depuis de nombreuses années, un intérêt grandissant est porté aux écoulements de suspensions de particules colloïdales en milieu poreux. On notera tout particulièrement à titre d'exemple la propagation de contaminants dans les aquifères souterrains [1–5], l'endommagement par les fines (le plus souvent des particules d'argile) et la chute de perméabilité des formations pétrolifères lors de l'exploitation assistée du pétrole [6]. Les aspects physico-chimiques et/ou hydrodynamiques sont les principaux mécanismes responsables du devenir des particules colloïdales.

Les interactions physico-chimiques particules–particules et particules–paroi sont généralement appréhendées en utilisant la théorie de la DLVO. Les potentiels d'interaction sont obtenus en sommant les interactions de Van der Waals, les interactions électrostatiques [7–9] et moins fréquemment les interactions de Born [10]. Le potentiel total est alors fonction de la taille des particules, de la force ionique et des potentiels des surfaces (ou charge) et son évolution en fonction de h , la distance de séparation surface–surface, présente généralement un premier minimum Π_1 , une barrière répulsive Π_{\max} puis un deuxième minimum Π_2 aux distances de séparation plus grandes comme l'illustre la Fig. 1. La portée des interactions électrostatiques est représentée par la longueur caractéristique de Debye :

$$\kappa^{-1} = (\varepsilon_0 \varepsilon_r k_B T / 2e^2 I)^{1/2} \quad (1)$$

où k_B est la constante de Boltzmann ($\text{m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$), T la température absolue (K), ε_0 est la permittivité du vide ($\text{m}^{-3} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^4 \text{ A}^2$), ε_r la permittivité relative du milieu, e la charge élémentaire (C) et I la force ionique (M). Selon

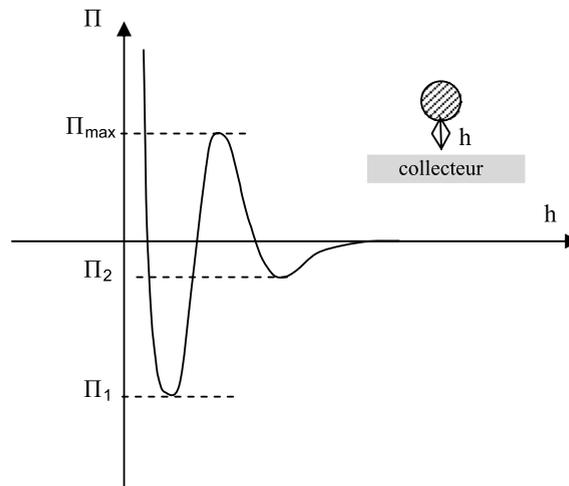


Fig. 1. Exemple de potentiel d'interaction en fonction de la distance (théorie DLVO).

Fig. 1. Example of interaction potential as a function of distance (DLVO theory).

le type d'interactions (attractives ou répulsives) et leurs magnitudes, les particules peuvent s'adsorber en mono ou en multicouches sur la surface des pores, altérant les propriétés physiques du milieu poreux.

Les effets hydrodynamiques influent sur le processus d'adsorption puisque les particules sont transportées par convection–diffusion à proximité de la surface collectrice (le collecteur) rendant possible leur adsorption sous l'effet des interactions physico-chimiques [11,12]. Le rapport entre le nombre de collisions des particules avec le collecteur et le flux de particules transportées vers ce collecteur définit l'efficacité du collecteur η [13,14]. Pour un collecteur et des particules sphériques, il est prédit que η suive la loi puissance $Pe^{-2/3}$ [14], où $Pe = aU/D$ est le nombre de Péclet (rapport des effets convectifs et diffusifs). a est le rayon des particules, U la vitesse interstitielle et $D = k_B T / 6\pi \mu a$ est la diffusivité des particules loin du collecteur et où μ est la viscosité dynamique du fluide suspendant. Dans la relation liant η au nombre de Péclet, des pré-facteurs sont ensuite introduits pour tenir compte de la proximité des collecteurs dans un milieu poreux et η s'écrit alors [13,15] :

$$\eta = 4B^{1/3} Pe^{-2/3} \quad (2)$$

où

$$B = 2[(1 - q^5)/(2 - 3q + 3q^5 - 2q^6)] \quad (3)$$

où $q = (1 - \phi)^{1/3}$ et ϕ est la porosité du milieu poreux.

La fraction des collisions conduisant à l'adsorption des particules sur le collecteur est l'efficacité de collision α qui n'est fonction que des interactions physico-chimiques [13,15,16]. Ainsi il existe une concentration en sel critique (CSC) au delà de laquelle $\alpha = 1$ (adsorption favorable) [16–18] et qui à partir de la théorie de la floculation est estimée correspondre au cas où le premier minimum est nul et $d\Pi/dh = 0$ [6,19]. Le produit $\alpha\eta$ représente l'efficacité totale du collecteur η_T . Cette quantité est généralement déduite des courbes des effluents en utilisant la relation [7,13,15] :

$$\eta_T = [-2a_c/3L(1 - \phi)] \text{Ln}(C/C_i) \quad (4)$$

où a_c est le rayon de la sphère collectrice élémentaire, L la longueur du milieu poreux, C la concentration de colloïdes en sortie et C_i la concentration injectée.

L'écoulement joue aussi un rôle important sur la structure de la couche adsorbée et le taux de couverture de la surface du pore par la manifestation de l'ombrage hydrodynamique [20,21]. De ce fait, sous l'effet de la convection, toute nouvelle particule ne peut s'adsorber immédiatement derrière une autre déjà adsorbée et se trouve transportée plus loin diminuant le taux de couverture qui décroît lorsque Pe augmente.

Enfin, les effets hydrodynamiques ont une influence sur la désorption des particules préalablement adsorbées lorsque les efforts hydrodynamiques deviennent de l'ordre de la force d'adhésion des particules sur la paroi des pores [9,22–24].

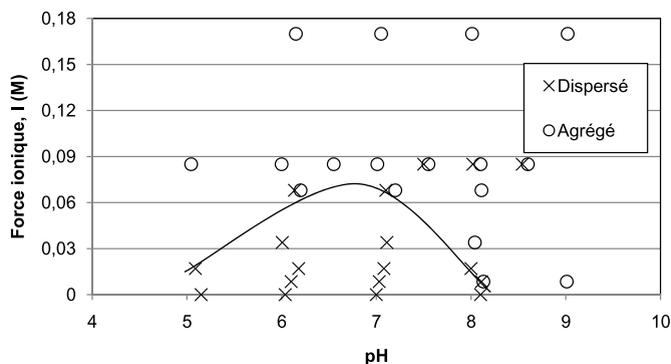


Fig. 2. Diagramme de phase des particules de Latex (la courbe indique la limite supérieure de la zone où les particules sont dispersées).

Fig. 2. Phase diagram of latex particles (the curve indicates the upper limit of the zone where the particles remain dispersed).

De très nombreuses techniques, qu'elles soient directes ou indirectes, intrusives ou non destructrices ou non, sont utilisées pour étudier ces phénomènes. Adamczyk [8] a récemment publié une revue exhaustive de ces techniques.

Les principaux travaux expérimentaux portant sur l'adsorption de colloïdes en milieu poreux concernent la cinétique d'adsorption après l'injection d'un volume donné de suspension dans des milieux poreux modèles ou naturels saturés. Les principaux paramètres considérés sont la force ionique, le type de sel présent (valence des ions), le pH et dans une moindre mesure l'intensité de l'écoulement et sa structure.

L'objectif du présent travail est d'appréhender de façon quantitative la morphologie du dépôt tout au long du milieu poreux par le suivi des fluctuations locales de la porosité de ce milieu et ce dans diverses conditions physico-chimiques et hydrodynamiques. Cela est rendu possible par l'utilisation d'une technique de gammamétrie récemment validée [25] couplée à des techniques plus usuelles. Les conditions expérimentales choisies sont telles que la formation d'un dépôt en multicouches est prohibée (interaction particule-particule répulsive) et tout bouchage des pores par effet d'exclusion [26,27] ou par formation de voûtes [28] est absent (taille des pores très largement supérieure à la taille des particules)

2. Montage et procédure expérimentale

Toutes nos expériences ont été réalisées avec des particules de Latex de polystyrène, de diamètre $2a = 780$ nm, comportant en surface des fonctions acide carboxylique. La faible dimension des particules et sa densité de 1,041, proche de la densité de l'eau, écartent tout risque de sédimentation. La concentration de colloïdes dans la suspension est de 200 ppm, soit approximativement $8,4 \times 10^{11}$ particules/mL. Le sel que nous avons utilisé pour fixer la force ionique est de l'iodure de potassium (KI). Un agent bactéricide (NaN_3) est utilisé en faible concentration (400 ppm) pour préserver la suspension de toute dégradation microbienne. Le pH de la suspension est fixé à la valeur 7,0. Une saumure de même force ionique et de même pH que la suspension est préparée dans les mêmes conditions. Des expériences d'observation directe (au microscope optique) des suspensions colloïdales ont permis d'établir un « diagramme de phase » décrivant l'état d'agrégation des particules entre elles en fonction de la force ionique et du pH. Ces résultats, présentés dans la Fig. 2, montrent que pour un pH de 7, les particules de Latex forment des agrégats au delà d'une force ionique de 0,06 M environ.

Les milieux poreux, consolidés par frittage, sont constitués d'échantillons cylindriques (diamètre = 0,05 m) d'un milieu artificiel (Aerolith-10) de fortes porosité ($\approx 43\%$) et perméabilité ($\approx 8 \times 10^{-12}$ m²). Ces échantillons, de longueur 0,05 m ou 0,15 m selon les expériences réalisées, sont enrobés de résine époxy armée de fibres de verre sur leur face latérale et équipés de deux embouts à leurs extrémités. Les surfaces métalliques des embouts en contact avec le milieu poreux sont protégées par une fine couche de Teflon[®] pour éviter tout échange ionique qui pourrait modifier les conditions expérimentales.

Des mesures de potentiel zéta du milieu poreux ont été effectuées à l'aide d'un zétamètre (Zetasizer Nano 317, Malvern Instruments Ltd.) en utilisant des poudres obtenues par concassage, tamisage et après sédimentation de plusieurs heures en prélevant les particules solides restées en suspension. Les mesures de potentiel zéta des particules de latex et du milieu poreux ont été réalisées à pH = 7 pour différentes valeurs de la force ionique. Les résultats

Tableau 1

Valeurs des potentiels zéta pour le milieu poreux et les particules de latex à pH = 7.

Table 1

Zeta potential values of the porous medium and latex particles at pH = 7.

I (M)	Zéta milieu poreux (mV)	Zéta particules (mV)
0,003	–54,9	–85,2
0,0048	–53,43	–77,3
0,0072	–47	–71,61
0,012	–41,43	–58,87
0,018	–33,5	–51,2
0,024	–27,7	–42,12

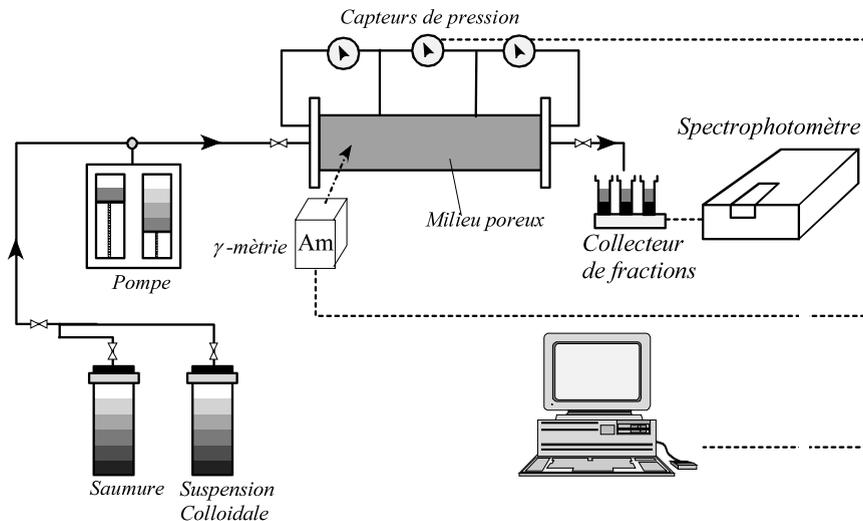


Fig. 3. Montage expérimental.

Fig. 3. Experimental setup.

sont présentés dans le Tableau 1. Ces valeurs montrent bien le caractère répulsif des interactions particule/particule et particule/paroi.

Le dispositif expérimental que nous avons utilisé est présenté dans la Fig. 3. Il est constitué d'une pompe volumétrique qui assure un débit constant des fluides circulant dans le milieu poreux, de l'échantillon poreux placé dans un dispositif de mesure de porosité par atténuation d'un rayonnement γ [25] et d'un spectrophotomètre UV-VIS. Le milieu poreux est également équipé de prises de pression qui permettent de mesurer la perte de charge en cours d'écoulement. Les grandeurs physiques qui sont mesurées lors d'une expérience type sont la concentration en particules dans les effluents, par spectrophotométrie, la porosité locale le long de l'échantillon poreux, par atténuation γ , et la perméabilité de trois sections successives du milieu poreux par la mesure des pertes de charge.

La procédure expérimentale retenue comporte plusieurs étapes que l'on peut décrire sommairement ainsi :

- Le milieu poreux est saturé en saumure et les mesures de porosité et perméabilité initiales sont effectuées. Le volume de pore initial (V_0) est déterminé à cette étape.
- La suspension colloïdale est injectée à débit constant et la mesure de concentration en colloïdes dans les effluents est effectuée.
- De la saumure, de même force ionique et de même pH que la suspension colloïdale, est injectée ($2,5V_0$) au même débit qu'à l'étape précédente, pour déplacer les colloïdes non déposés.
- La porosité et la perméabilité de l'échantillon sont alors mesurées et comparées aux valeurs initiales.
- Les étapes de b à d peuvent être répétées de manière séquentielle.

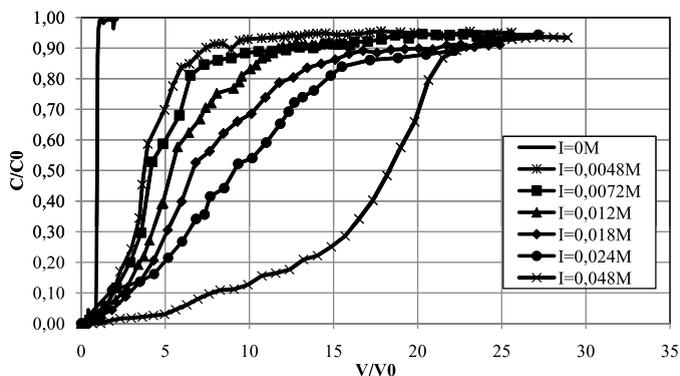


Fig. 4. Courbes d'élution des suspensions colloïdales obtenues pour différentes valeurs de la force ionique.

Fig. 4. Colloidal suspension breakthrough curves obtained with different values of ionic strength.

L'injection de la suspension colloïdale est stoppée lorsque la concentration mesurée dans les effluents est égale à environ 95 % de la valeur de la concentration de la suspension injectée (valeur plateau).

Toutes les expériences présentées dans cette note ont été effectuées sur différents échantillons poreux présentant des propriétés initiales comparables, pour différentes valeurs de la force ionique et du débit d'injection.

3. Résultats et discussion

3.1. Influence de la force ionique

Sept expériences ont été réalisées en faisant varier la force ionique de 0 à 0,048 M pour la même valeur du nombre de Péclet ($Pe = 9,8$). Les courbes d'élution présentées dans la Fig. 4, montrent clairement que le dépôt de particules, nul en l'absence de sel ajouté, dépend de la force ionique et ce dépôt est d'autant plus important que la force ionique est élevée. Ce comportement, déjà observé par différents auteurs [15–17] est en bon accord avec la théorie DLVO qui prévoit une augmentation du nombre de particules déposées par unité de surface avec la force ionique. Cela est dû à un écrantage des forces électrostatiques de natures répulsives par diminution de Π_{\max} et compression de la couche électronique en diminuant la longueur caractéristique κ^{-1} (Eq. (1)).

Ces résultats peuvent être interprétés en calculant l'efficacité du collecteur, η_T , définie par la relation (4) mais où les pré-facteurs ont été ignorés.

Le calcul de η_T est effectué pour un volume injecté de suspension égal à $5V_0$. Cette valeur satisfait la condition de faible taux de couverture quelle que soit la force ionique, condition pour laquelle la relation (4) est valide. Il va de soi qu'un choix du volume injecté différent de $5V_0$ pour le calcul de l'efficacité du collecteur donnerait des valeurs légèrement différentes sans changer la tendance décrite ci-dessous. Les résultats sont présentés dans la Fig. 5 où on voit clairement, dans la gamme de force ionique explorée, une relation linéaire entre le coefficient η_T et la force ionique. La droite coupe l'axe des abscisses en une valeur ($\sim 0,003$ M) qui correspond à ce que l'on définit souvent comme une Concentration Critique en Sel [16–18], valeur de la concentration en sel en deçà de laquelle le dépôt de particules n'est pas possible. Un comportement asymptotique est également attendu pour des salinités plus grandes où η_T deviendrait indépendant de la force ionique ($\alpha = 1$).

Le nombre de particules déposées en fin d'expérience peut être calculé directement à partir des courbes d'élution en mesurant l'aire comprise entre cette courbe et la courbe d'élution d'un traceur parfait sans aucune interaction avec le milieu poreux, symétrique par rapport au point ($C/C_i = 0,5$; Volume injecté = $1V_0$) dans le cas d'un milieu semi infini. Les résultats obtenus sont présentés sur la Fig. 6. Dans des conditions hydrodynamiques constantes, l'augmentation du nombre de particules déposées avec la force ionique est à mettre à l'actif de la diminution de la zone d'exclusion entourant les particules déposées par la diminution des répulsions électrostatiques particule–particule.

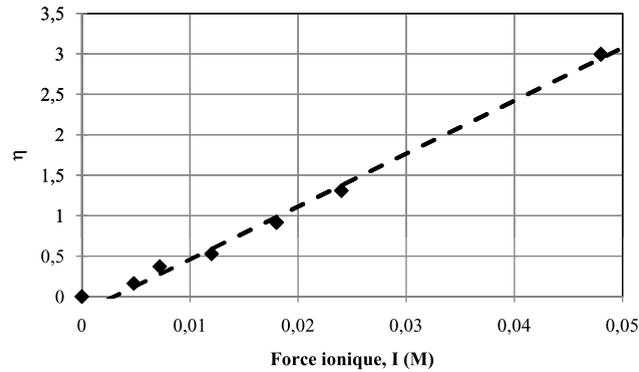


Fig. 5. Efficacité du collecteur, η_T , en fonction de la force ionique de la suspension.

Fig. 5. Collector efficiency, η_T , as a function of suspension ionic strength.

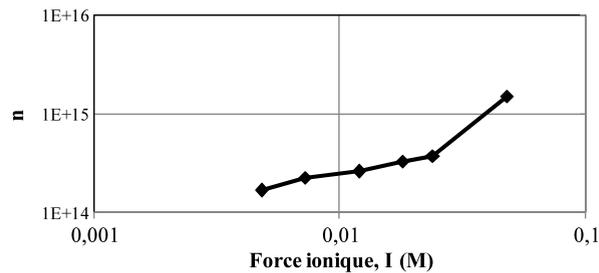


Fig. 6. Nombre de particules déposées après injection de 25 Volumes de Pores de suspension colloïdale en fonction de la force ionique.

Fig. 6. Deposited particle number after injection of 25 pore volumes of colloidal suspension as a function of ionic strength.

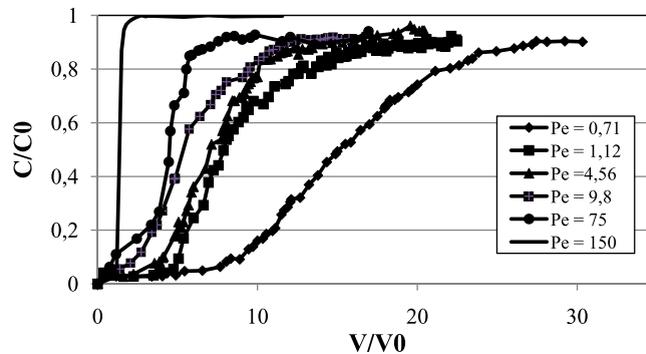


Fig. 7. Courbes d'élution de particules obtenues pour différentes valeurs du nombre de Péclet.

Fig. 7. Particles breakthrough curves obtained for different values of the Péclet number.

3.2. Influence du nombre de Péclet

Les effets hydrodynamiques sont connus pour jouer un rôle essentiel lors du dépôt de particules en milieu poreux. Les causes principales en sont l'ombrage hydrodynamique [9,20] et l'advection des particules. Le nombre adimensionnel qui permet d'appréhender ce phénomène est le nombre de Péclet défini plus haut.

Des expériences couvrant une large gamme de Pe ont été réalisées pour des valeurs de force ionique (0,012 M) et de pH (7) constantes. Les courbes d'élution présentées dans la Fig. 7 montrent clairement que le dépôt de particules est favorisé par de faibles valeurs de Pe et donc du temps de séjour des particules à proximité de la surface collectrice. Le phénomène d'ombrage hydrodynamique est lui aussi moins important quand la vitesse locale est faible. On re-

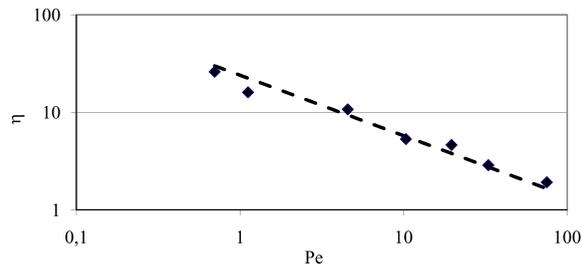


Fig. 8. Efficacité du collecteur en fonction du nombre de Péclet.

Fig. 8. Collector efficiency as a function of Péclet number.

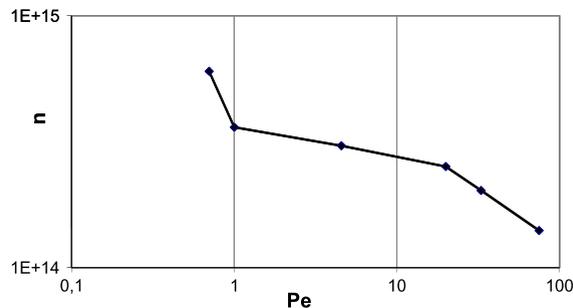


Fig. 9. Nombre de particules déposées après injection de 25 Volumes de Pores de suspension colloïdale en fonction du nombre de Péclet.

Fig. 9. Deposited particle number after injection of 25 pore volumes of colloidal suspension as a function of Péclet number.

marque que le dépôt de particules n'est pas détectable dans le cas où $Pe = 150$ ce qui indique une exclusion d'origine hydrodynamique très forte.

L'efficacité du collecteur, η_T , est calculée de la même manière que dans le paragraphe précédent. Les résultats sont présentés dans la Fig. 8.

Pour des valeurs du nombre de Péclet inférieures à 150 (valeur pour laquelle aucun dépôt n'est détecté, voir Fig. 7), l'efficacité du collecteur est corrélée par une relation en $Pe^{-0,62}$ et semble confirmer la loi puissance donnée par la relation (2), obtenue pour des particules colloïdales et des collecteurs sphériques dans la limite de ratios a_c/a élevés. Le nombre de particules déposées est calculé en intégrant les courbes d'élution. Les résultats sont présentés dans la Fig. 9.

Comme attendu, le nombre de particules déposées dépend significativement du nombre de Péclet. Le dépôt est d'autant plus important que Pe est faible et ce dépôt devient très faible pour $Pe > 100$ dans nos conditions expérimentales. L'explication de cette décroissance réside dans le phénomène d'ombrage hydrodynamique, augmentation de la zone d'exclusion, sous les effets hydrodynamiques, derrière les particules déposées à mesure que la vitesse d'injection croît.

3.3. Mesures locales du dépôt de particules en milieu poreux

Le dépôt de particules en milieu poreux peut être quantifié de manière globale par la mesure de la réduction de sa perméabilité. Il est cependant possible d'y accéder de façon précise et localisée par utilisation de techniques de gammamétrie.

La mesure de porosité par atténuation d'un rayonnement γ est basée sur la différence d'absorption du rayonnement qui existe entre un milieu poreux sec, saturé et endommagé par la présence de particules déposées dans le volume poral. Le principe expérimental, la précision des mesures et les précautions d'utilisation sont détaillés dans une publication antérieure [25].

La procédure expérimentale est similaire à celle décrite plus haut avec des étapes intermédiaires correspondant aux comptages γ . Ces comptages γ sont effectués à différentes étapes de l'injection de la suspension de particules, le volume injecté est exprimé en multiples du volume de pores (V_0). Nous présentons ici les résultats d'une expérience

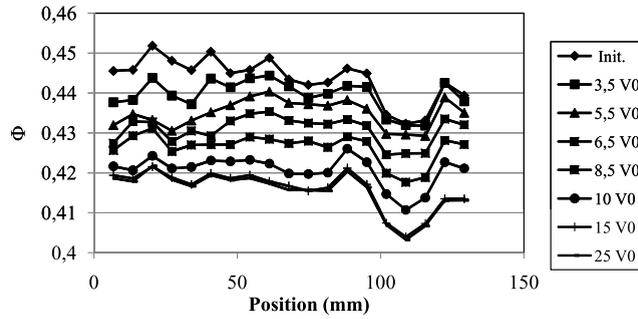


Fig. 10. Evolution locale du champ de porosité à différentes étapes d'un processus de dépôt de particules dans un milieu poreux (Pe = 9,8, I = 0,0072 M).

Fig. 10. Local evolution of porosity field at different steps of particle deposition in a porous medium (Pe = 9.8, I = 0.0072 M).

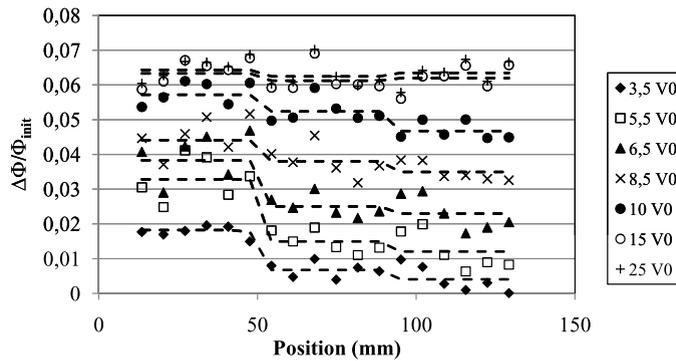


Fig. 11. Variations relatives des porosités locales le long de l'échantillon. Les traits interrompus correspondent à des valeurs moyennes calculées sur 6 points consécutifs dans les zones amont, centrale et aval du milieu poreux.

Fig. 11. Relative variation of local porosities along the core. The dashed lines correspond to average values computed over 6 consecutive points in the inlet, central and outlet zones of the porous medium.

obtenus sur un échantillon poreux d'une longueur de 0,15 m, effectuée à une valeur du nombre de Péclet de 9,8 avec une force ionique égale à 0,0072 M et un pH de 7,0. Les variations de porosité, le long de l'échantillon sont présentées dans la Fig. 10.

La Fig. 10, malgré quelques hétérogénéités locales de porosité, montre clairement la réduction de porosité due au dépôt de particules dans l'espace poral. Cette réduction de porosité s'observe d'abord dans la partie du milieu poreux proche de la zone d'injection avant de se développer progressivement tout au long du milieu poreux. La diminution de porosité se poursuit ensuite continument pour se stabiliser aux alentours de 25V₀ injectés comme attendu au vu des courbes d'élution (voir Fig. 4). Ce comportement est confirmé dans la Fig. 11 où on a tracé les évolutions locales et moyennes par section (pour plus de lisibilité) de la variation relative de porosité. On voit clairement le processus de dépôt progressif (lire de bas en haut) de particules le long du milieu poreux avant d'aboutir à un profil quasi horizontal et constant correspondant à un dépôt régulier de particules sur toute la longueur du milieu poreux.

Les épaisseurs de la couche déposée peuvent être calculées directement à partir de la variation de porosité [25] et peuvent alors être comparées à celles déduites des mesures globales de réduction de la perméabilité du milieu.

La réduction de perméabilité est définie par :

$$R_k = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_i} \tag{5}$$

où ΔP_i et ΔP_c sont respectivement la perte de charge initiale (mesurée avant l'injection de la suspension de particules) et la perte de charge mesurée après endommagement du milieu suite au dépôt de particules.

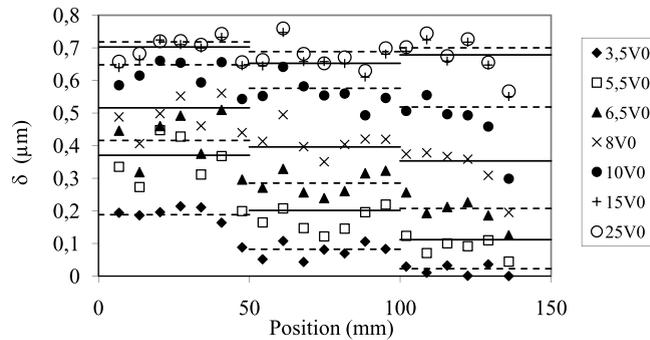


Fig. 12. Epaisseurs de couche déposée calculées par les variations locales de porosité (symboles) et par les réductions de perméabilité mesurées le long de l'échantillon (traits pleins et interrompus).

Fig. 12. Deposited layer thickness computed from local porosity variation (symbols) and with permeability reduction measured along the core (dashed and full lines).

En faisant l'hypothèse que le milieu poreux est constitué de tubes capillaires de même dimension dans lesquels on peut appliquer la loi de Poiseuille

$$Q = \frac{\pi R_p^4 \Delta P}{8\mu L} \quad (6)$$

où Q est le débit-volume dans le capillaire, μ la viscosité dynamique du fluide, ΔP la perte de charge, L la longueur du milieu poreux et R_p le rayon de pore défini comme suit,

$$R_p = \sqrt{8k/\phi} \quad (7)$$

où k est la perméabilité initiale du milieu poreux et ϕ sa porosité initiale.

On en déduit l'épaisseur moyenne de la couche de particules déposées,

$$\delta = R_p(1 - R_k^{-1/4}) \quad (8)$$

Les épaisseurs de la couche déposée ainsi calculées à partir des mesures globales sont comparées sur la Fig. 12 à celles déduites des mesures locales de fluctuation de la porosité selon une méthode décrite ailleurs [25].

En traits pleins et interrompus nous avons représenté les résultats des mesures globales sur les trois sections du milieu poreux (amont, centrale et aval) alors que les symboles représentent les résultats obtenus à partir des mesures locales. On remarque des fluctuations d'épaisseurs qui sont le résultat de fluctuations de porosité liées à l'hétérogénéité de l'échantillon et à la précision de mesure (évaluée à 2% [25]). On constate un accord satisfaisant entre les épaisseurs obtenues par les deux méthodes. On note également qu'en fin de dépôt (après 25 V_0 de suspension injectée) l'épaisseur de la couche déposée est de l'ordre de 0,7 μm proche du diamètre des particules indiquant ainsi que nous sommes en présence d'une monocouche de particules déposée sur la surface porale de l'échantillon. Cependant, la méthode basée sur les mesures de fluctuation de porosité semble plus appropriée pour appréhender la cinétique de l'endommagement du milieu poreux en donnant accès aux variations locales de porosité du milieu.

4. Conclusions

Les résultats de cette note montrent que dans les conditions expérimentales décrites :

- L'augmentation de la force ionique accroît l'efficacité du collecteur et le taux de couverture de surface des pores à conditions hydrodynamiques constantes.
- L'efficacité de collection est fonction décroissante du nombre de Péclet conformément aux prédictions théoriques à conditions physico-chimiques égales.

Les résultats expérimentaux montrent aussi que de faibles fluctuations de porosité peuvent être détectées par l'utilisation de la technique de gammamétrie qui permet de sonder localement l'adsorption des colloïdes en milieu poreux

et de là leur cinétique de dépôt. Les principaux avantages de cette technique sont sa sensibilité et son caractère local alors que les techniques de mesure globales ne permettent de caractériser l'adsorption qu'à des échelles topologiques plus grandes. Elle semble donc indiquée pour appréhender plus finement des phénomènes comme la désorption où dans certaines conditions seule une faible fraction de colloïdes est remise en suspension.

Références

- [1] H. van de Weerd, A. Leijnse, W.H. van Riemsdijk, Transport of reactive colloids contaminants in groundwater: Effect of nonlinear kinetic interactions, *Journal of Contaminant Hydrology* 32 (1998) 313–331.
- [2] F. Kuhn, K. Barmettler, S. Bhattacharjee, M. Elimelech, R. Kretzschmar, Transport of iron oxide colloids in packed quartz sand media: Monolayer and multilayer deposition, *Journal of Colloid and Interface Science* 231 (2000) 32–41.
- [3] S.-B. Kim, M.Y. Corapcioglu, Contaminant transport in dual-porosity media with dissolved organic matter and bacteria present as mobile colloids, *Journal of Contaminant Hydrology* 59 (2002) 267–289.
- [4] N. Tufenkji, J.A. Redman, M. Elimelech, Interpreting deposition patterns of microbial particles in laboratory-scale column experiments, *Environ. Sci. Technol.* 37 (2003) 616–623.
- [5] W.P. Johnson, X. Li, S. Assemi, 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 Resources* 30 (2007) 1432–1454.
- [6] K.C. Khilar, H.S. Fogler, *Migration of Fines in Porous Media*, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-5284-X, 1998.
- [7] M. Elimelech, C. O'Melia, Effect of particle size on collision efficiency in the deposition of Brownian particles with electrostatic energy barriers, *Langmuir* 6 (1990) 1153–1163.
- [8] Z. Adamczyk, Particle adsorption and deposition: Role of electrostatic interactions, *Advances in Colloid and Interface Science* 100–102 (2003) 267–347.
- [9] J.N. Ryan, M. Elimelech, Review: Colloid mobilization and transport in groundwater, *Colloids and Surfaces A* 107 (1996) 1–56.
- [10] L.M. McDowell-Boyer, Chemical mobilization of micron-sized particles in saturated porous media under steady flow conditions, *Environ. Sci. Technol.* 26 (1992) 586–593.
- [11] J.M. Frey, P. Schmitz, J. Dufreche, I. Gohr Pinheiro, Particle deposition in porous media: Analysis of hydrodynamic and inertial effects, *Transport in Porous Media* 37 (1999) 25–54.
- [12] I. Gohr Pinheiro, P. Schmitz, D. Houi, Particle capture in porous media when physico-chemical effects dominate, *Chem. Eng. Sci.* 54 (1999) 3801–3813.
- [13] K.M. Yao, M.T. Habibian, C.R. O'Melia, Water and waste water filtration: Concepts and applications, *Environ. Sci. Technol.* 5 (11) (1971) 1105–1112.
- [14] W.B. Russel, D.A. Saville, W.R. Schowalter, *Colloidal Dispersions*, Cambridge University Press, 1989.
- [15] M.W. Hahn, C.R. O'Melia, Deposition and re-entrainment of Brownian particles in porous media under unfavorable chemical conditions: Some concepts and applications, *Environ. Sci. Technol.* 38 (2004) 210–220.
- [16] D. Grolimund, M. Elimelech, M. Brokovec, Aggregation and deposition kinetics of mobile colloidal particles in natural porous media, *Colloids and Surfaces A* 191 (2001) 179–188.
- [17] R. Kretzschmar, K. Barmettler, D. Grolimund, Yao-de Yan, M. Brokovec, H. Sticher, Experimental determination of colloid deposition rates and collision efficiencies in natural porous media, *Water Res. Res.* 33 (5) (1997) 1129–1137.
- [18] T. Blume, N. Weisbrod, J.S. Selker, On the critical salt concentrations for particle detachment in homogeneous Hanford sediments, *Geoderma* 124 (2005) 121–132.
- [19] T.K. Sen, K.C. Khilar, Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media, *Advances in Colloid and Interface Science* 119 (2006) 71–96.
- [20] C.-H. Ko, M. Elimelech, The shadow effect in colloid transport and deposition dynamics in granular porous media: Measurements and mechanisms, *Environ. Sci. Technol.* 34 (2000) 3680–3689.
- [21] Z. Adamczyk, B. Siwek, L. Szyk, Flow-induced surface blocking effects in adsorption of colloid particles, *Journal of Colloid and Interface Science* 174 (1995) 130–141.
- [22] X. Li, P. Zhang, C.L. Lin, W.P. Johnson, Role of hydrodynamic drag on microsphere deposition and re-entrainment in porous media under unfavourable conditions, *Environ. Sci. Technol.* 39 (2005) 4012–4020.
- [23] J.A. Bergendahl, D. Grasso, Mechanistic basis of particle detachment from granular media, *Environ. Sci. Technol.* 37 (2003) 2317–2322.
- [24] J.A. Bergendahl, D. Grasso, Prediction of colloid detachment in a model porous media: Hydrodynamics, *Chem. Eng. Sci.* 55 (2000) 1523–1532.
- [25] D. Gharbi, H. Bertin, A. Omari, Use of gamma ray attenuation technique to study colloid deposition in porous media, *Experiments in Fluids* 37 (2004) 665–672.
- [26] S.A. Bradford, J. Simunek, M. Bettahar, M.Th. Van Genuchten, S.R. Yates, Modeling colloid attachment, straining, and exclusion in saturated porous media, *Environ. Sci. Technol.* 37 (2003) 2242–2250.
- [27] N. Tufenkji, G.F. Miller, J.N. Ryan, R.W. Harvey, M. Elimelech, Transport of cryptosporidium oocysts in porous media: Role of straining and physicochemical filtration, *Environ. Sci. Technol.* 38 (2004) 5932–5938.
- [28] Y.S. Kim, A.J. Whittle, Filtration in a porous granular medium: 1 Simulation of pore-scale particle deposition and clogging, *Transport in Porous Media* 65 (2006) 53–87.