
Transport et rétention de particules d'argile dans un milieu poreux saturé

Abdellah Alem — Abdul-Ghadie Elkawafi — Ahmed Benamar — Huaqing Wang — Nasre-Dine Ahfir*

* *Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, FRE 3102 CNRS, Université du Havre, 53, rue de prony - BP 540, 76058 Le Havre cedex, France, abdellah.alem@univ-lehavre.fr, abdul-ghadir.el-kawafi212@univ-lehavre.fr, ahmed.benamar@univ-lehavre.fr, huaqing.wang@univ-lehavre.fr, nasre-dine.ahfir@univ-lehavre.fr*

RÉSUMÉ. L'étude des processus de mobilisation, transport et dépôt de particules solides dans un milieu poreux représente un sujet de recherche important dans différents domaines d'ingénierie et dans diverses applications industrielles. Les particules transportées par un écoulement peuvent se déposer à différents horizons du milieu poreux et provoquer son colmatage. La conséquence directe est une chute de la perméabilité du milieu.

Dans cet article on présente les résultats d'une étude expérimentale paramétrique du phénomène de colmatage. L'étude est menée sur des colonnes d'injection et d'infiltration. Le dispositif expérimental conçu pour cette étude permet de suivre le phénomène de transport et de filtration de particules en suspension dans un milieu poreux sous différentes conditions aux limites. Les résultats obtenus mettent en évidence les rôles majeurs de la granulométrie du milieu poreux et du débit d'écoulement dans le développement, la localisation et l'évolution dans l'espace et dans le temps du colmatage.

ABSTRACT. Processes of the mobilisation, the transport and the deposition of solid particles in porous media are an important research topic in different engineering fields and industrial applications. Clogging effect is a consequence of transport and deposition of particles in the porous medium resulting in a significant reduction of permeability. This paper presents some results of an experimental investigation on clogging phenomenon in laboratory columns. The transport and the filtration of the suspended particles are followed under different boundary conditions. The obtained results highlight the roles of the grain size distribution of the porous medium and the flow rate on the development and the localisation in space and time of the clogging in porous media.

MOTS-CLÉS: milieux poreux, étude expérimentale, colmatage, chute de perméabilité

KEYWORDS: porous media, experimental study, clogging, permeability decline

1. Introduction

L'étude des processus de mobilisation, transport et dépôt de particules solides dans un milieu poreux et les conséquences sur son endommagement progressif représente un sujet de recherche important qui offre un champ d'applications diversifié. Les applications sont nombreuses dans les domaines du génie civil (endommagement des ouvrages filtrants), de l'environnement (transfert de contaminants vers les nappes phréatiques) et du génie pétrolier (récupération secondaire d'hydrocarbures) (Ochi et Vernoux, 1998 ; Moghadasi et al., 2004). Les particules transportées par un écoulement peuvent se déposer à différents horizons et provoquer le colmatage du milieu poreux (Abrams, 1977 ; Vetter et al., 1987). La conséquence la plus problématique du colmatage est une chute, parfois accentuée, de la perméabilité du milieu dans le temps (Six, 1962) qui conduit à une réduction de la vie active pour certains ouvrages. Le colmatage est une des préoccupations majeures lors de la conception des ouvrages d'infiltration d'eaux pluviales. Le colmatage de ces types d'ouvrage est dû au dépôt de particules transportées par les eaux pluviales dans les pores du milieu poreux. Les particules les plus grosses s'accumulent en surface ou dans les premiers centimètres du milieu poreux (Wojtanowicz et al., 1987). Les particules les plus fines pénètrent plus profondément dans le sol (Ives, 1975). A des phénomènes physico-chimiques (McGechan et Lewis, 2002; Mays et Hunt, 2007) s'ajoute alors le développement de bactéries qui contribue au colmatage (Brown et al., 2006). Le processus de dépôt conduisant au colmatage d'un milieu poreux est influencé par plusieurs paramètres. Les conditions hydrauliques (Reddi et al., 2005), la concentration et la granulométrie des matières en suspension de l'influent (Lee et al. 2002 ; Moghadasi et al., 2004), la salinité des influents (Compère et al., 2001), la distribution granulaire (Lee et al., 2002 ; Moghadasi et al., 2004), la géométrie ainsi que l'état de surface des grains du milieu (Bhattacharjee et al., 1998 ; Shellenberger et Logan 2002 ; Tong et Johnson 2006) sont évidemment des paramètres majeurs qui contrôlent la dynamique de colmatage. Cet article présente les résultats obtenus dans le cadre d'une étude expérimentale visant à mieux comprendre le rôle de certains paramètres sur le colmatage et ses conséquences sur l'endommagement dans le temps du milieu poreux. On se focalise dans cet article sur l'impact de la granulométrie du milieu poreux et des effets hydrodynamiques sur le processus de dépôt et de colmatage. Un modèle mathématique de prévision de la chute de perméabilité est développé sur la base des résultats expérimentaux obtenus. Pour atteindre cet objectif, un modèle expérimental a été conçu et une étude paramétrique a été réalisée. L'initiation, la localisation et le développement du colmatage sont suivis par des mesures des caractéristiques hydrauliques dans l'espace poreux.

2. Dispositif expérimental

L'étude du transport de matières en suspension (MES) en injection continue et du colmatage dans un milieu poreux en laboratoire se fait généralement sur des échantillons placés dans des colonnes de petites dimensions. Le dispositif expérimental utilisé (Figure 1) est composé d'une colonne en plexiglas de 4,1 cm de diamètre intérieur et de 40 cm de longueur placée verticalement. La colonne est équipée de huit piézomètres pour suivre les variations des pressions dans le milieu poreux pendant les essais. Le remplissage de la colonne se fait en position verticale et en conditions saturées. Le matériau granulaire est déversé dans la colonne préalablement remplie d'eau pour éviter le piégeage de bulles d'air. La première étape de la procédure expérimentale consiste à caractériser le milieu initial. La colonne est alors alimentée à charge constante à partir d'un réservoir d'eau claire placé en amont. Les mesures des différentes pressions le long de l'échantillon permettent de contrôler l'homogénéité du milieu poreux et de déterminer sa perméabilité initiale. L'essai d'injection se fait ensuite à partir du réservoir de MES. Une pompe péristaltique pour assurer un débit constant pendant l'essai et un débitmètre numérique pour contrôler le débit d'alimentation sont placés respectivement à l'entrée et à la sortie de la colonne. Le système de détection à la sortie de la colonne est composé d'un turbidimètre qui permet, après un étalonnage préalable d'obtenir la concentration en matières en suspension de l'effluent.

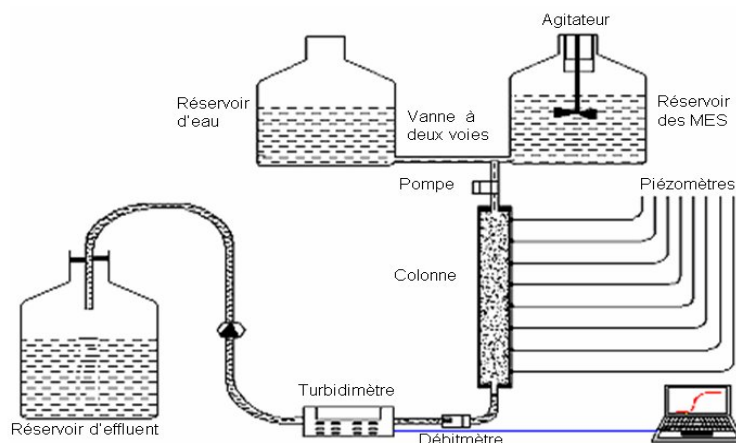
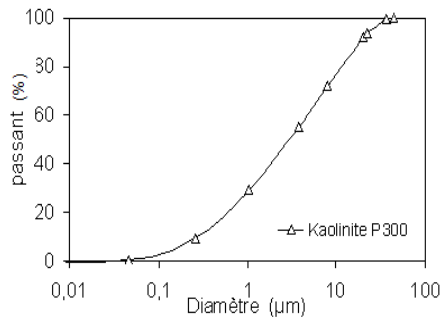


Figure 1. *Dispositif expérimental*

Les matières en suspension utilisées sont des particules naturelles d'argile (Kaolinite P300) de taille comprise entre 0 et 45 μ m (Figure 2). La Kaolinite P300 est utilisée pour ses qualités non dispersives (Tarog, 2000). Le tableau 1 résume les

principales caractéristiques de l'argile utilisée. Le milieu poreux est constitué de sable de Seine lavé de différentes granulométries (Figure 3). L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB) montre que les grains de sable sont de forme anguleuse avec une surface rugueuse (Figure 4).



γ_s (KN/m ³)	% < 45(μ m)	d_{50} (μ m)	ω_L (%)	ω_p (%)
26,5	100	3	40	20

Tableau 1. Principales caractéristiques de la Kaolinite P300

Figure 2. Courbe granulométrique de la Kaolinite P300

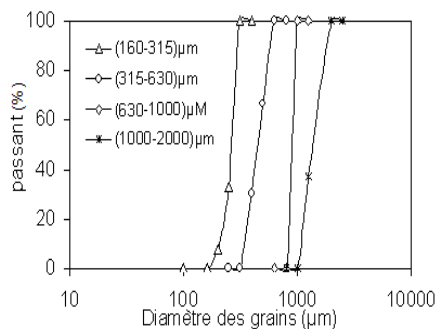


Figure 3. Courbes granulométriques des sables utilisés



Figure 4. Vue au MEB des grains de sable

3. Résultats et analyse

3.1. Courbes de restitution et de dépôt dans le milieu poreux

Pour quantifier les effets respectifs du débit et de la granulométrie du milieu sur le colmatage, deux types d'expériences ont été menés. Le premier type d'expériences est conduit avec plusieurs débits entre 25 et 95 ml/min. Nous présentons ici les résultats obtenus sur le milieu (315-630) μ m avec une concentration de MES de 2g/l. La porosité initiale du milieu est de 0,36 (\pm 0,005) et sa perméabilité initiale de $6,5 \cdot 10^{-4}$ (\pm $5 \cdot 10^{-5}$) m/s. Le deuxième type d'expérience est

réalisé sur des milieux de granulométries différentes sélectionnées à partir du sable de Seine (Figure 3). Nous présentons les résultats obtenus avec un débit constant de 25 ml/min et une concentration de MES de 2g/l. Pour tous les essais réalisés, la procédure expérimentale reste la même et le volume total de la solution injectée est égal à 42 fois le volume de pores.

Le temps d'injection est multiplié par quatre lorsque l'on passe du débit de 95ml/min à 25ml/min. Il est donc préférable de représenter les évolutions des paramètres mesurés en fonction du nombre de volume de pores injecté (V_p). La figure 5 présente les courbes de restitution des MES pour les différents débits testés. Le comportement des courbes dépend fortement du débit. Pour un même volume injecté, le taux de restitution augmente avec le débit. Le dépôt de MES dans le milieu poreux est moins important quand les forces hydrodynamiques sont importantes. Après l'injection de 42 volumes de pores, le taux de restitution atteint 51% pour un débit de 95 ml/min, il est égal à 38 % pour un débit de 75ml/min et chute à 18,6% pour un débit 55 ml/min. La restitution est nulle pour le débit de 25 ml/min. Pour ce débit, les vitesses dans les pores sont très faibles et les forces hydrodynamiques sont faibles et insuffisantes pour éviter le dépôt de la totalité des MES injectées dans le milieu. Aussi, ces forces sont insuffisantes pour permettre l'arrachement et le transport des particules déposées. Pour les autres débits, les courbes de restitution présentent un palier jusqu'à un volume injecté critique qui varie avec le débit (Figure 6). L'allure des courbes est conforme à la réponse d'un milieu propre. Au-delà de ce volume critique, les courbes de restitution croient quasi linéairement avec le volume injecté. La cinétique de dépôt décroît comme le confirme la figure 7 qui représente l'évolution de la cinétique moyenne de dépôt dans milieu en cours d'injection. Cette cinétique de dépôt est évaluée directement des mesures de la restitution par la relation [1].

$$\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial t} = u.(C_0 - C) \cdot \frac{1}{L} \quad [1]$$

Avec C_0 la concentration volumique à l'entrée du milieu [-], C la concentration volumique à la sortie du milieu [-], $\bar{\sigma}$ le volume total de MES déposé par unité de volume du milieu [-], u la vitesse d'écoulement [L/T] et L la longueur de la colonne [L].

Pour le débit 25 ml/min, la restitution étant nulle, la cinétique de dépôt est constante. La masse injectée se dépose entièrement dans le milieu qui se colmate totalement après injection de 42 volumes de pores. Pour les autres débits, la cinétique de dépôt est constante jusqu'au volume critique, puis décroît avec le volume injecté (Figure 7). La masse déposée dans le milieu, pour un même volume de MES injecté, diminue avec le débit.

Les courbes de restitution pour les différents milieux sont regroupées sur la figure 8. La restitution est nulle dans les deux milieux fins. Ces deux milieux sont

totallement filtrants. Pour les autres milieux, Le taux de restitution augmente avec le diamètre des grains. Le dépôt de MES et par conséquent le colmatage est moins important lorsque le diamètre des grains est élevé. Les courbes de restitution présentent un palier jusqu'à un volume injecté critique autour de 10 V_p (l'allure des courbes est conforme à la réponse d'un milieu propre). Au-delà de ce volume critique, les courbes de restitution croient quasi linéairement avec le volume injecté. La cinétique de dépôt décroît comme le confirme la figure 9 qui représente l'évolution de la cinétique moyenne de dépôt dans le milieu en cours d'injection. Pour les deux milieux fins, la restitution étant nulle, la cinétique de dépôt reste constante. La masse injectée se dépose entièrement dans le milieu. Pour les autres milieux, la cinétique de dépôt est constante jusqu'au volume critique puis décroît avec le volume injecté. Pour un même volume de MES injecté, la masse déposée diminue avec la taille des grains constituant le milieu poreux.

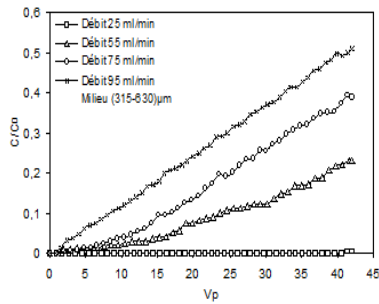


Figure 5. Courbes de restitution des MES en fonction du V_p pour les différents débits testés.

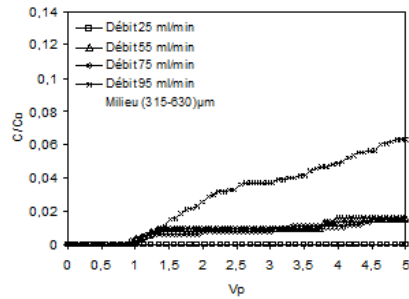


Figure 6. Courbes de restitution après 5 V_p injectés

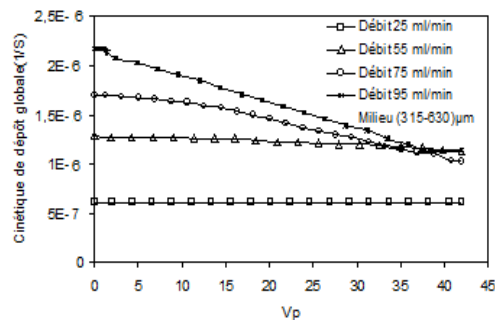


Figure 7. Cinétique de dépôt globale dans le milieu en fonction du V_p pour les différents débits testés.

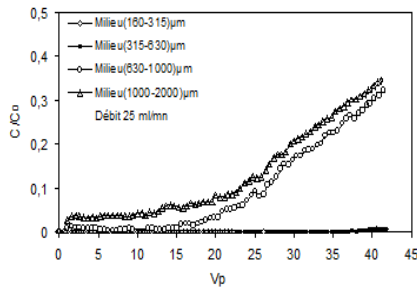


Figure 8. Courbes de restitution des MES en fonction du V_p pour les différents milieux testés.

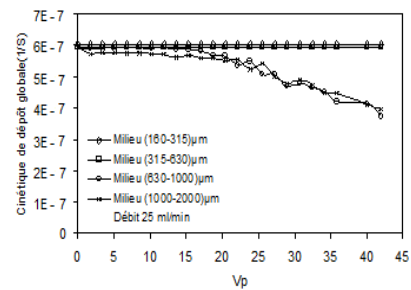


Figure 9. Cinétique de dépôt globale en fonction du V_p pour les différents milieux testés.

3.2 Variation de la perméabilité du milieu poreux

L'endommagement dans le temps du milieu en conséquence du dépôt est évalué à partir des variations de la perméabilité et de la porosité. La mesure des pressions dans le milieu permet, en se basant sur la loi de Darcy, de suivre l'évolution spatiale et temporelle de la perméabilité du milieu en cours d'injection. Les figures 10 et 11 représentent l'évolution du rapport de perméabilité (K/K_0) du milieu poreux en cours d'injection respectivement pour les différents débits et granulométries testées (K est la perméabilité après injection d'un nombre de volume de pores MES et K_0 la perméabilité initiale).

La chute de perméabilité dans le temps est plus rapide et plus accentuée lorsque le débit est faible (Figure 10). L'évolution dans le temps du colmatage du milieu est brutale et importante entraînant une plus forte modification des caractéristiques hydrauliques du milieu. La chute de perméabilité est moins importante et plus lente dans le temps lorsque le débit est élevé. Après l'injection de 42 volumes de pores, la perméabilité du milieu diminue de 55% pour un débit de 25 ml/min, elle diminue de 45 % pour un débit de 55ml/min et seulement de 35% pour un débit 95 ml/min.

La figure 11 montre la chute de la perméabilité des différents milieux poreux étudiés. Pour le milieu le plus fin (160-315µm), la chute de perméabilité globale atteinte 43% de la perméabilité initiale du milieu après injection de 24 V_p . Cependant, l'entrée du milieu poreux est totalement colmatée. Pour les autres milieux la perméabilité décroît plus lentement pour se stabiliser après injection d'un volume équivalent à 15 fois le volume des pores. Ceci montre que, dans les conditions d'essais, malgré un colmatage progressif, ces trois milieux restent percolant.

Plusieurs modèles semi empiriques ont été utilisés pour simuler la diminution de la perméabilité en fonction du dépôt. Pour tous les essais réalisés, la chute de la perméabilité globale du milieu est simulée de manière très satisfaisante (Figure 12) par la relation empirique suivante :

$$\frac{K}{K_0} = \exp^{-\alpha(\omega - \omega_0)} \quad [2]$$

Avec ω_0 la porosité initiale du milieu [-], ω la porosité au temps t du milieu calculée par la relation [4] et α un coefficient de calage fonction des caractéristiques géométriques du milieu et débit d'écoulement. Pour tous les essais réalisés, ce coefficient est donné par la relation suivante :

$$\alpha = \left(\frac{-0,18 \times Q + 39,34}{d_g} \right) \quad [3]$$

Avec Q le débit d'écoulement [L³/T] et d_g le diamètre moyenne des grains [L].

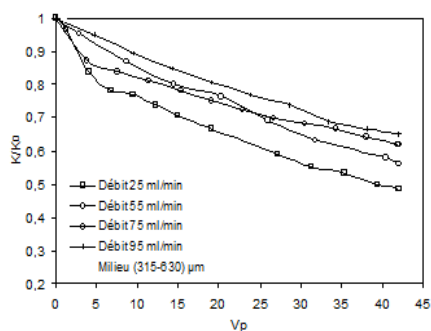


Figure 10. Variation de la perméabilité : effet du débit d'écoulement

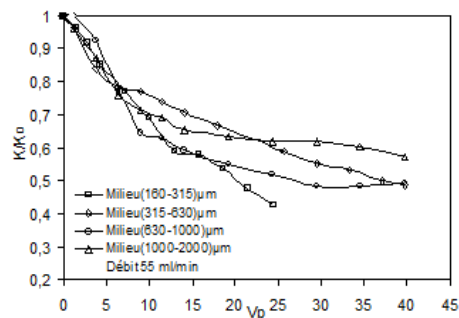


Figure 11. Variation de la perméabilité : effet du milieu poreux

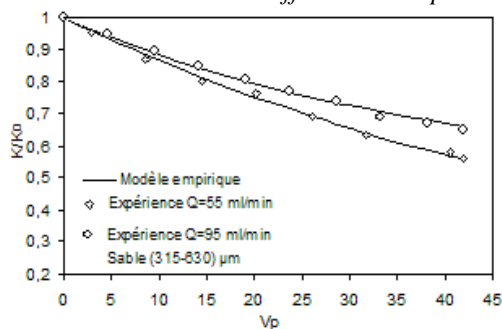


Figure 12. Courbes expérimentales et simulées de la variation de la perméabilité du milieu

3.3 Evolution de la porosité du milieu poreux

Le dépôt de (MES) conduit à des modifications dans le temps des caractéristiques initiales du milieu poreux. La porosité est l'un des paramètres, directement lié à la perméabilité, qui évolue à cause du dépôt. Les variations de la porosité constituent un facteur d'évaluation de l'endommagement du milieu. Ces variations sont évaluées à partir des volumes de particules déposées à différents horizons du milieu poreux par la relation suivante :

$$\omega = \omega_0 - \frac{\bar{\sigma}}{(1 - \varepsilon_p)} \quad [4]$$

où ε_p est la porosité moyenne du dépôt prise égale à 0,7 (Gassara, 2007).

L'endommagement du milieu est non seulement fonction du volume de MES déposé mais surtout du profil de dépôt dans le milieu. Pour un même volume de MES déposé, une accumulation du dépôt à l'entrée du milieu entraîne une chute plus importante de la perméabilité qu'un dépôt plus étalé. Pour mettre en évidence ce phénomène, nous avons tracé sur la figure 13 les profils de porosité dans les différents milieux poreux après injection des MES. La porosité chute fortement à l'entrée du milieu fin causant une forte chute de sa perméabilité. La chute de porosité est moins importante et plus étalée dans les milieux grossiers. La plus forte chute de la porosité se manifeste à un horizon de plus en plus loin de l'entrée de la colonne lorsque la taille des grains du milieu augmente.

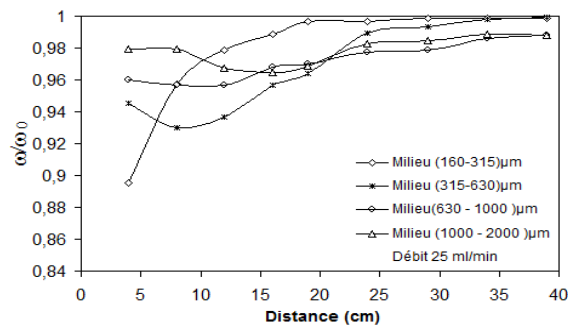


Figure 13. Profil de porosité le long de la colonne en fin d'essai

4. Conclusion

Une étude expérimentale visant à quantifier le rôle important de la granulométrie et des effets hydrodynamiques sur le processus de dépôt des MES et ses conséquences sur l'endommagement du milieu poreux est présentée. La démarche expérimentale permet de suivre les variations spatio-temporelles de la perméabilité ainsi que les variations de la porosité. Les résultats confirment une phénoménologie du dépôt qui dépend fortement de la granulométrie du milieu et du débit d'écoulement. Le dépôt diminue lorsque le débit ou la taille des grains du milieu poreux augmente. De plus le dépôt est mieux réparti dans l'espace poreux. La conséquence est une chute moins importante et plus lente de la perméabilité du milieu. Cette chute de perméabilité peut être simulée de manière très satisfaisante par un modèle empirique simple.

5. Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'ANR-ERINOH (Erosion interne des ouvrages hydrauliques)

6. Bibliographie

- Abrams A., «Mud design minimize rock impairment due to particle invasion», *JP et TECH*, 1977, p.586-592.
- Bhattacharjee, S., Ko, C.-H., et Elimelech, M., «DLVO Interaction between Rough Surfaces», *Langmuir*, vol. 14, June 1998, p. 3365-3375.
- Brown D. G., A., Abramson. «Collision efficiency distribution of a bacterial suspension flowing through porous media et implications for field-scale transport», *Water research*, 40 (8), 2006, p. 1591-1598.
- Compère F., G. Porel, F. Delay., «Transport and retention of clay particles in saturated porous media. Influence of ionic strength and pore velocity», *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 49, 2001, p. 1-21.
- David C. Mays, et James R. Hunt., «Hydrodynamic and Chemical Factors in Clogging by Montmorillonite in Porous Media », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 41 (16), 2007, p. 5666-5671.
- Gassara, D., Simulation de la formation d'un dépôt de particules en microfiltration. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- Ives K.J., «Captur mechanisms in filtration in the scientific basic of filtration», *Nootdhoff, Leyden*, 1975, p.183-201.
- Karl Shellenberger et Bruce E. Logan «Effect of Molecular Scale Roughness of Glass Beads on Colloidal and Bacterial Deposition», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 36, 2002, p.184-189.

- Lakshmi N. Reddi, Ming Xiao, Malay G. Hajra, et In Mo Lee. , «Physical clogging of soil filters under constant flow rate versus constant head », *Can Geotech. J.* vol. 42, (2005), p.804-811.
- Lee I.M., Y.J. Park, et Lakshmi N. Reddi ., «Particle transport characteristics and filtration of granitic residual soils from the Korean peninsula», *Can. Geotech. J.* vol. 39, (2002), P.472–482.
- McGechan M. B., N. J. Jarvis, P. S. Hooda, et A. J. A. Vinten ., «Parameterization of the MACRO model to represent leaching of colloidally attached inorganic phosphorus following slurry spreading», *Soil Use Manage.* vol. 18, 2002, p.61– 67.
- Moghadasi, J., Müller-Steinhagen, H., Jamialahmadi, M., Sharif, A «Theoretical and experimental study of particle movement and deposition in porous media during water injection», *J. Petrol. Sci. Eng.* vol. 43, 2004, p.163 –181
- Ochi J. et J-F. Venoux., «Permeabilité decrease in sandstone reservoirs by fluid injection : Hydrodynamique and chemical effects», *Journal of Hydrology.* vol.208, 1998, p.237-248.
- Six P., «Contribution à l'étude de la perméabilité d'une roche poreuse è un liquide», *revue de l'institut français de pétrole* n°12, 1962, P.1454-1472.
- Tarog I, «Perméabilité et érosion interne des mélanges sable-argile. Contribution théorique et expérimentale, Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 2000.
- Tong M., et W.P. Johnson, «Excess colloid retention in porous media as a function of colloid size, fluid velocity, and grain angularity», *Environ. Sci. Technol.* vol. 40, 2006, p.7725-7731.
- Vetter O.J, Kandarpa V. Stratton M et Veith E., «Particle invasion into porous medium and related injectivity problem», *SPE paper*, vol.16255, 1987, p.101-120.
- Wojtanowicz A.K Krilv Z et Langlinais J.P., «Study on the effect of pore bloking mechanisms on formation damage», *SPE paper*, vol.16233, 1987, p.449-463.