



HAL
open science

Simulation de la filtration frontale de suspensions colloïdales

Yolaine Bessiere, Patrice Bacchin

► **To cite this version:**

Yolaine Bessiere, Patrice Bacchin. Simulation de la filtration frontale de suspensions colloïdales. Récents Progrès en Génie des Procédés, 2007, 96, pp.1-8. hal-00202263

HAL Id: hal-00202263

<https://hal.science/hal-00202263>

Submitted on 4 Jan 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SIMULATION DE LA FILTRATION FRONTALE DE SUSPENSIONS COLLOÏDALES

BESSIERE Yolaine*, BACCHIN Patrice

Laboratoire de Génie Chimique
Université Paul Sabatier, 31062 Toulouse Cedex 09

Résumé

Les procédés de filtration par membrane se sont beaucoup développés ces dernières années, notamment dans la production d'eau potable. Leur principale limitation dans ce secteur d'activité réside dans le colmatage, c'est-à-dire l'accumulation de matière à la surface de la membrane. Un des enjeux dans ce domaine est de pouvoir proposer des outils prédictifs de façon à anticiper la conduite des procédés.

Dans ce cadre, une étude théorique et expérimentale est menée de façon à décrire l'accumulation de matière lors de filtrations frontales menées à flux constant. Lors de cette simulation transitoire, la pression osmotique est utilisée pour décrire le comportement spécifique des colloïdes dans toute la gamme de concentration rencontrée au cours de la filtration – depuis une phase dispersée jusqu'à la formation et la croissance d'un dépôt-. Si les simulations s'avèrent extrêmement sensibles à la taille des particules considérées, elles permettent cependant une bonne description qualitative et quantitative de l'accumulation de matière en mode frontal et de ses conséquences directe sur l'opération de filtration.

Mots-clés : simulation, membrane, colmatage, colloïdes

1. Introduction

Les procédés de filtration trouvent leur principale limitation dans l'accumulation de matière dans ou sur la membrane. Dans le cas des filtrations de colloïdes, la limitation est souvent interprétée par la polarisation de concentration qui permet de décrire l'accumulation de petits composés et par la formation de dépôt entraînant une résistance supplémentaire qui traduit le comportement des particules. Cependant, lors de la filtration de suspensions colloïdales, le dépôt résulte directement de l'accumulation de la polarisation et les deux phénomènes doivent donc être pris en compte lors des modélisations.

Les données nécessaires à l'évaluation du transfert de matière lors de la filtration sont donc de deux ordres : d'une part, celles relatives à la suspension étudiée et d'autre part, celles se rapportant au procédé en lui-même. La simulation permet alors d'obtenir des profils de concentration desquels seront déduits les évolutions de pression transmembranaire et le volume filtré conduisant à la formation d'un dépôt. Les limites d'une telle approche seront soulignées et analysées par comparaison avec les résultats expérimentaux.

2. Description des modèles et des simulations

La simulation du transfert de matière nécessite une bonne description des propriétés de la suspension dans toute la gamme de concentration mise en jeu lors d'une opération de filtration. Sont ici présentés à la fois le modèle utilisé pour décrire l'évolution des propriétés d'une suspension colloïdale (en l'occurrence dans notre étude, il s'agit d'une suspension de particules de latex) et les équations permettant d'établir les bilans en filtration frontale, c'est-à-dire dans un régime transitoire.

2.1 Modélisation des propriétés de la suspension

2.1.1 Pression osmotique

* Auteur/s à qui la correspondance devrait être adressée : bacchin@chimie.ups-tlse.fr

Pour le lissage des résultats expérimentaux, tout en conservant une description continue, on distinguera la phase dispersée de la phase condensée de façon à prendre en compte la compressibilité du dépôt.

- $\phi < \phi_{crit}$

La relation utilisée dans ce travail pour décrire l'évolution de pression osmotique avec la fraction volumique en deçà de sa valeur critique est de la forme suivante :

$$\Pi = e^{\left(\frac{1}{\frac{1}{a \cdot \phi + b} + \frac{1}{c \cdot \phi + d} + \frac{1}{e \cdot \phi + f}} \right)} \quad (1)$$

et sa fonction dérivée associée :

$$\frac{d\Pi}{d\phi} = \Pi(\phi) \cdot \frac{\left(\frac{a}{[a \cdot \phi + b]^2} + \frac{c}{[c \cdot \phi + d]^2} + \frac{e}{[e \cdot \phi + f]^2} \right)}{\left(\frac{1}{a \cdot \phi + b} + \frac{1}{c \cdot \phi + d} + \frac{1}{e \cdot \phi + f} \right)^2} \quad (2)$$

- $\phi > \phi_{crit}$

au-delà de la fraction volumique critique, la pression osmotique est exprimée par l'équation 3 basée sur une loi puissance (Eberl, Landman, & Scales 1995) qui conduit à une limite infinie pour un empilement compact à savoir $\phi_{cp} = 0,74$ tout en assurant la continuité avec la fonction (1) et avec sa dérivée première (éq. 2).

$$\Pi = \Pi_{crit} \cdot \left(\left[\frac{\phi_{cp} - \phi_{crit}}{\phi_{cp} - \phi} \right]^m - m \cdot \frac{\phi - \phi_{crit}}{\phi_{cp} - \phi_{crit}} \right) \quad (3)$$

et sa fonction dérivée associée :

$$\frac{d\Pi}{d\phi} = \Pi_{crit} \cdot \left(\frac{m}{\phi_{cp} - \phi} \cdot \left[\frac{\phi_{cp} - \phi_{crit}}{\phi_{cp} - \phi} \right]^m - \frac{m}{\phi_{cp} - \phi_{crit}} \right) \quad (4)$$

où m traduit la compressibilité de la phase condensée : une valeur élevée de m traduira une faible compressibilité, à savoir que la pression de solide augmentera rapidement avec la fraction volumique.

2.1.2 Diffusion

L'approche que nous utilisons ici est basée sur l'approche d'Einstein de la diffusion permettant la prise en compte de l'évolution du coefficient de diffusion avec la fraction volumique et par là même avec la pression osmotique exercée par la suspension (Van den Broeck, Lostak, & Lekkerkerker 1981) : la diffusion collective est proportionnelle à la dérivée de la pression osmotique par la fraction volumique comme proposé dans l'équation (5).

$$D(\phi) = \frac{1}{6 \cdot \pi \cdot \mu_s \cdot r_p \cdot H(\phi)} \cdot V_p \cdot \frac{d\Pi}{d\phi} \quad (5)$$

où V_p et r_p sont respectivement le volume et le rayon des particules et $H(\phi)$ est la fonction de Happel définie par l'équation (6) qui vise à prendre en compte la présence de particules entourant celle considérée :

$$H(\phi) = \frac{6 + 4 \cdot \phi^{5/3}}{6 - 9 \cdot \phi^{1/3} + 9 \cdot \phi^{5/3} - 6 \cdot \phi^2} = \frac{1}{K(\phi)} \quad (6)$$

$K(\phi)$ est le coefficient hydrodynamique ou coefficient de sédimentation qui représente le rapport de la vitesse de sédimentation de la suspension à une fraction volumique donnée sur la vitesse de sédimentation dans un milieu dilué.

L'évolution du coefficient de diffusion obtenue à l'aide des équations (5) et (6) correspondant à la courbe $\Pi=f(\phi)$ présentée précédemment est reportée sur la figure 1 pour un diamètre moyen de particules de 120 nm.

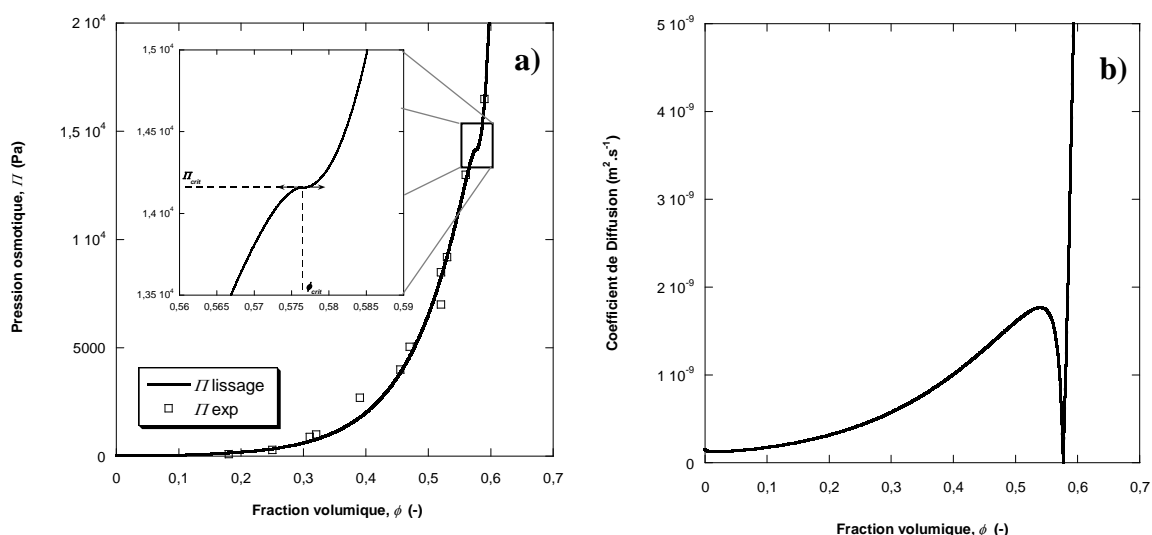


Figure 1 : évolution de la pression osmotique (a) et du coefficient de diffusion (b) avec la fraction volumique

Cette courbe peut se décomposer en plusieurs zones caractéristiques du comportement d'une suspension colloïdale : en milieu très dilué, le coefficient de diffusion est quasiment constant puis augmente rapidement avec la concentration en particules du fait des interactions répulsives et passe par un maximum. Puis, quand l'attraction entre particules devient importante, la pression osmotique augmente moins vite avec la fraction volumique ce qui conduit à une diminution du coefficient de diffusion. La transition de phase conduit alors à une diffusion nulle synonyme d'irréversibilité : le dépôt ne peut pas retourner en solution par simple diffusion. Au-delà de la fraction volumique critique, ce terme de diffusion décrit la façon dont se comprime le dépôt.

2.2 Simulation de filtration frontale

La simulation devra permettre de traduire le transfert de matière tant dans une phase dispersée qu'en présence d'un solide. Or, dans une phase dispersée, le transfert se traduit par un équilibre de phénomènes de transport par perméation et par diffusion alors que dans une phase condensée (dépôt) les forces de traînée engendrées par la perméation s'équilibrent avec la résistance de compression du réseau de particules.

Dans une **phase dispersée**, lorsque l'on considère l'état d'équilibre, la somme du flux diffusif (gradient de concentration) et du flux convectif (flux de perméation) est nulle :

$$J \cdot \phi - D(\phi) \cdot \frac{d\phi}{dx} = 0 \quad (7)$$

En exprimant le coefficient de diffusion par la relation de Stokes-Einstein, on peut obtenir l'équation régissant le profil de concentration dans la couche de polarisation (terme de gauche) à partir de la pression osmotique et de la mobilité des particules (terme de droite) :

$$\phi \cdot dx = \frac{1}{6 \cdot \pi \cdot \mu_s \cdot r_p} \cdot V_p \cdot \frac{K(\phi)}{J} \cdot d\Pi \quad (8)$$

Dans un **dépôt**, le flux de perméation est exprimé en fonction du gradient de pression par la loi de Darcy :

$$J = - \frac{k(\phi)}{\mu_s} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (9)$$

En considérant l'équilibre entre les forces de traînée et la perte de charge dans le dépôt, comme proposé par Zick et Homsy (Zick & Homsy 1982), on peut relier la perméabilité $k(\phi)$ dans le dépôt au coefficient de sédimentation $K(\phi)$ (défini par l'éq. 6) :

$$k(\phi) = \frac{2 \cdot r_p^2}{9} \cdot \frac{K(\phi)}{\phi} \quad (10)$$

En combinant les équations (9) et (10) et en considérant que, dans le dépôt, la somme de la pression, p , et de la pression de solide, Π , est constante (cette hypothèse est classiquement effectuée (Sherwood 1997) pour décrire les phénomènes de compression dans un dépôt), on peut là aussi exprimer le profil de concentration dans le dépôt :

$$\phi \cdot dx = \frac{2 \cdot r_p^2}{9 \cdot \mu_s} \cdot \frac{K(\phi)}{J} \cdot d\Pi \quad (11)$$

En considérant des particules sphériques, les équations obtenues pour décrire le transfert dans la couche de polarisation (éq.8) et dans le dépôt (éq. 11) sont tout à fait similaires ; une seule et même équation est adaptée pour la description des phénomènes de transfert de masse de la phase dispersée au dépôt où Π aura valeur de pression osmotique et de pression de compression respectivement.

Tableau 1 : Données utilisées dans le modèle

Particules	Matière agrégée	Milieu
Rayon (m) $r_p=6 \cdot 10^{-8}$	Fract. vol. emp. comp. $\phi_{cp}=0,74$	Force ionique (M) $I=10^{-3}$
$\Pi(\phi)$ Eq.1 et 3	Compressibilité $m=5,66$	Viscosité (Pa.s) $\mu_s = \mu_a = 10^{-3}$
		Fract. Vol. (-) $\phi_a=1,4431 \cdot 10^{-4}$

3. Résultats de simulation

3.1 Profils de concentration

Les simulations, réalisées en utilisant les données du tableau 1 permettent de décrire l'évolution du profil de concentration au cours de la filtration comme présenté figure 2.

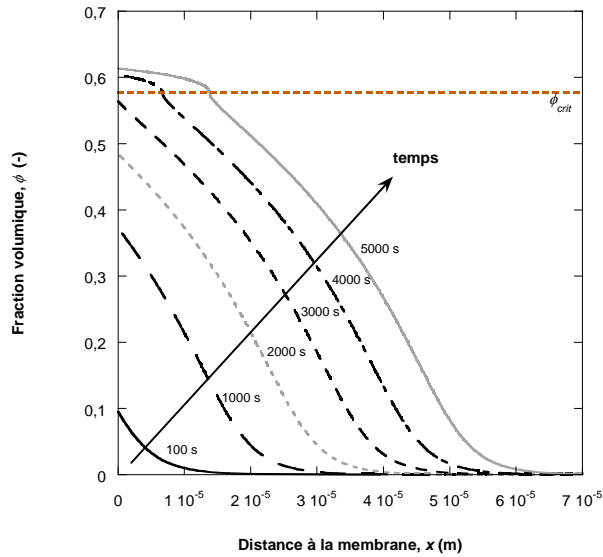


Figure 2 : Evolution du profil de concentration au cours du temps – $J=110 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$

Dans la mesure où il n'y a pas de cisaillement en filtration frontale (contrairement à la filtration tangentielle), on observe d'une part, une augmentation continue de la fraction volumique à la membrane (absence de conditions de fonctionnement stationnaire) et d'autre part, une augmentation de l'épaisseur de la couche dans laquelle se développe le gradient de concentration avec le temps. Il est important de noter que la simulation permet de décrire de façon continue le passage d'un mécanisme de polarisation de concentration (lorsque $\phi < \phi_{crit}$ c'est à dire pour des temps inférieurs à 51 minutes) à un mécanisme de colmatage par dépôt pour des temps supérieurs.

Afin de mettre en évidence cette transition, la Figure 3 présente l'évolution de la quantité accumulée (en terme de volume de solide) dans chacune des deux phases (dans la couche polarisée $V_{s_{cp}}$ et dans la couche déposée V_{s_d}) correspondante.

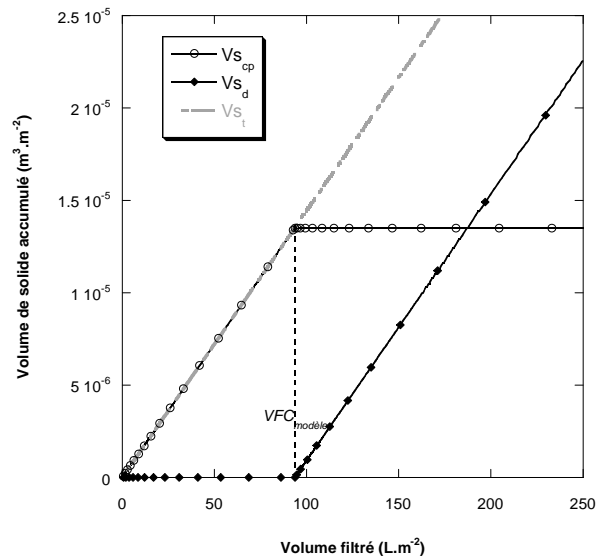


Figure 3 : Volume accumulé dans la couche polarisée $V_{s_{cp}}$ et dans le dépôt V_{s_d} selon le volume filtré $J=110 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$

Cette évolution se décompose en deux parties : dans un premier temps, lorsque la concentration en particules est inférieure à sa valeur critique, le volume s'accumule dans la couche polarisée. Puis, dans un second temps, lorsque la fraction volumique atteint sa valeur critique – qui est ici de 0,5765 –, à savoir après un volume filtré critique de 93 L.m^{-2} , le dépôt se forme et croît alors que le volume de particules dans la phase dispersée reste constant.

Il est intéressant de signaler que la masse constituant le dépôt est inférieure à la masse totale accumulée, $V_{s_t} : V_{s_d} = J \cdot \phi_a \cdot t - VFC \cdot \phi_a$. L'approche de filtration sur gâteau couramment utilisée qui considère que lors d'une filtration frontale, toutes les particules participent à la formation du dépôt (— sur la figure 3) peut donc conduire à surestimer la quantité déposée et par là même entraîner une sous-estimation de la résistance spécifique. Il a été montré théoriquement que cet écart est d'autant plus important que les colloïdes filtrés sont stables (Bacchin et al., 2002).

3.2 Effet des paramètres opératoires

De nombreux paramètres sont susceptibles d'avoir un effet sur la façon dont se déroule l'accumulation de matière : les propriétés physico-chimiques de la suspension par l'intermédiaire de la pression osmotique et de la taille des particules ainsi que les conditions opératoires du procédé comme le flux de perméation et la fraction volumique de l'alimentation. Ici, l'effet du flux de perméation est approfondi dans la mesure où c'est un paramètre qui conditionne la façon dont la matière s'accumule. La Figure 4 présente les profils de concentrations obtenus pour des flux allant de 50 à 140 $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ et un même volume filtré de $100 L \cdot m^{-2}$.

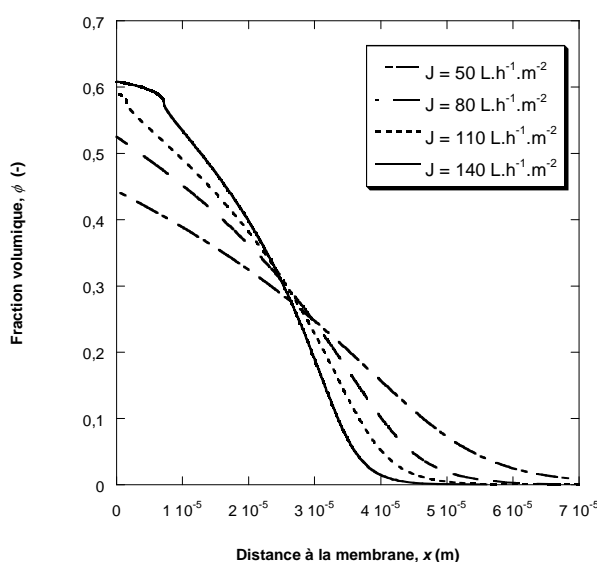


Figure 4 : Influence du flux de filtration sur le profil de concentration après filtration de $100 L \cdot m^{-2}$

Il apparaît clairement que pour un même volume filtré, c'est-à-dire une même quantité de particules de latex amenée à proximité de la membrane, les conséquences en terme de mécanisme d'accumulation sont fortement dépendantes du flux de filtration. Lorsque le flux de filtration appliqué augmente, la concentration en matière près de la membrane est plus importante alors que l'épaisseur des couches accumulées est réduite. Le flux de perméation comprime la couche polarisée. Ainsi, après $100 L \cdot m^{-2}$ de suspension filtrée, les flux de 50 et $80 L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ ne conduisent pas à la formation de dépôt, pour $110 L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ le dépôt commence juste à se former alors que pour $140 L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ la croissance du dépôt est nette et celui-ci atteint $7,2 \mu m$ d'épaisseur.

Le volume filtré ou bien le volume de solide accumulé (produit du volume filtré et de la fraction volumique de l'alimentation) critique, à partir duquel apparaît un dépôt dépend directement du flux imposé. Ainsi, la Figure 5 permet de visualiser l'incidence du flux de filtration sur chacun de ces deux paramètres.

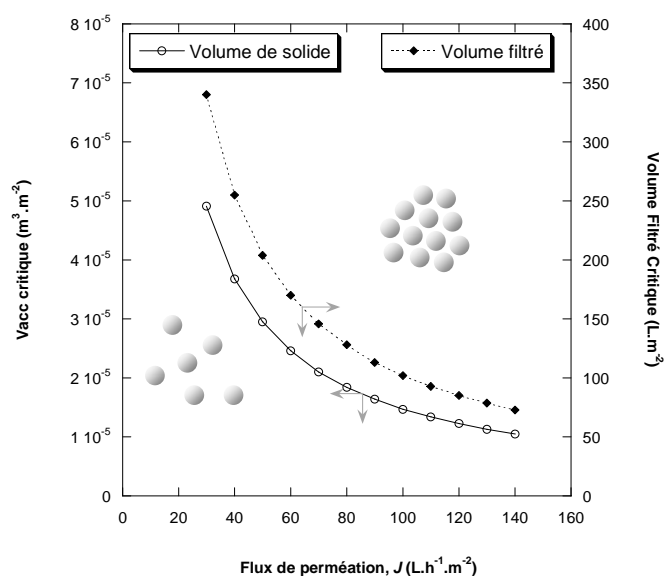


Figure 5 : Influence du flux sur le volume filtré et le volume de solide accumulés critiques

Les résultats obtenus par la simulation mettent en évidence que le colmatage de la membrane par dépôt est accentué pour des flux élevés, et plus précisément elle propose une évolution en 1/J du volume filtré critique. Le modèle permet d'expliquer au moins qualitativement les variations expérimentales du VFC avec le flux.

Les conséquences en terme de conduite de procédé sont importantes puisqu'en dessous de ces courbes, le colmatage est attendu comme étant réversible (un rinçage de l'unité de filtration par de l'eau brute peut permettre d'éliminer les couches accumulées) alors qu'au-delà, les colloïdes sont agrégés à la surface de la membrane par l'effet combiné du flux de perméation et du volume filtré. Dans ce dernier cas, les conditions opératoires mènent à la formation d'un dépôt nécessitant un rétrolavage, opération de décolmatage qui réduit la productivité (en consommant une partie du perméat produit par le cycle de filtration) et augmente la consommation énergétique globale de l'installation. Des procédures alternant des filtrations et des rinçages (pour des valeurs de volume filtré inférieur au volume filtré critique) peuvent améliorer de façon significative le fonctionnement d'une unité de filtration.

4. Conclusions

Des simulations ont été réalisées pour décrire l'accumulation d'une dispersion colloïdale à la surface d'une membrane en filtration frontale à flux constant. Ces simulations permettent de traduire de façon continue l'accumulation de matière par un mécanisme de polarisation de concentration (accumulation d'une phase dispersée) et un mécanisme de dépôt (accumulation d'une phase de particules colloïdales condensée ou agrégée). Un volume filtré critique, VFC, caractérisant la transition entre ces deux mécanismes d'accumulation peut ainsi être déterminé et sa sensibilité aux paramètres opératoires (volume filtré, flux de perméation, stabilité colloïdale) peut être analysée par le biais des simulations. Ce nouveau paramètre pour le procédé est d'un intérêt certain dans la mesure où il va permettre d'adapter les conditions opératoires de filtration afin d'améliorer la gestion des moyens de décolmatage à mettre en oeuvre en regard du type de colmatage attendu.

Des simulations ont été réalisées pour décrire l'accumulation de matière en filtration frontale à flux constant. Ces simulations permettent de traduire de façon continue le transfert de matière depuis une phase dispersée jusqu'au dépôt de particules colloïdales. Un volume filtré critique, VFC, caractérisant la transition entre ces deux mécanismes d'accumulation peut ainsi être déterminé ; ce paramètre est d'un intérêt certain dans la mesure où il va permettre d'adapter les conditions opératoires

Références

- Bacchin, P., Meireles, M., Aïmar, P., 2002. Modelling of filtration: from the polarised layer to deposit formation and compaction; *Desalination* 145(1-3), 139-146.
- Bessiere, Y. 2005. Filtration frontale sur membrane : mise en évidence du volume filtré critique pour l'anticipation et le contrôle du colmatage; Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Chen, V., Fane, A. G., Madaeni, S., Wenten, I. G., 1997. Particle deposition during membrane filtration of colloids: transition between concentration polarization and cake formation. *Journal of Membrane Science* 125(1), 109-122.
- Eberl, M., Landman, K. A., & Scales, P. J., 1995. Scale-up procedures and test methods in filtration: a test case on kaolin plant data. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 103(1-2), 1-10.
- Espinasse, B., 2003. Approche théorique et expérimentale de la filtration tangentielle de colloïdes : flux critique et colmatage. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Happel, J. 1958. Viscous flow in multiparticle systems: Slow motion of fluids relative to beds of spherical particles. *AIChE Journal* 4(2), 197-201.
- Russel, W. B., Saville, D. A., Schowalter, W. R. 1989. *Colloidal dispersions*. Cambridge University Press, 0-521-42600-6
- Sherwood, J. D. 1997. Initial and final stages of compressible filtercake compaction. *AIChE Journal* 43(6), 1488-1493.
- Sherwood, J. D., Meeten, G. H. 1997. The filtration properties of compressible mud filtercakes. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 18(1-2), 73-81.
- Van den Broeck, C., Lostak, F., Lekkerkerker, H. N. W. 1981. The effect of direct interactions on Brownian diffusion. *The Journal of Chemical Physics* 74(3), 2006-2010.
- Zick, A. A., Homsy, G. M. 1982. Stokes flow through periodic arrays of spheres., *Journal of Fluid Mechanics* 115, 13-26.