



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Travaux publics.
Voiries et Ouvrages d'Art (VOA)

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Lazar Mohammed Cherif

Le : dimanche 24 juin 2018

***Transport et dépôt des particules solides dans les réservoirs
pétroliers non cimentés :développement d'un modèle de colmatage***

Jury :

Pr.	Abdelhamid GUETALA	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	Nabil HOUHOU	MCA	Université de Biskra	Examineur
Dr.	Sadok FEIA	MCB	Université de Biskra	Encadreur

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein de la faculté de Genie Civile de l'université Mohammed Khider .Biskra .

Je tiens tout d'abord a remercier Dieu le tous puissant qui ma donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail

Je remercie très chaleureusement mon directeur de thèse et encadrant Dr Feia Sadek pour avoir assisté avec moi avec patience, encouragement et disponibilité tout au long du parcourt de ce travail

Je tiens à rendre hommage à mes professeurs aux seins de la faculté et à toute l'équipe administrative pour toutes les facilités et aides qu'ils m'ont accordé

A mes chers collègues et ami(e)s de la promotion

Enfin je ne peux finir sans remercier toute ma famille et à leur tête mes chers parents pour le soutient indéfectibles qu'ils mont offert sans retenue

Dédicace

Je dédie ce travail a :

A mes parents **Ali, Jamila**, Aucun hommage ne pourrait être a la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler, que dieu leur procure que du bonheur, santé et longue vie.

A ma grande mère **Khadija**

Aux personnes dont j'ai bien apprécié la présence dans ce jour, a mes frères **Hatem,**

Mohammed Atef et ma sœur **Manoubia Nouha**

A mes cousins : **Oussama, Chamsou, Housseem, Hamoud, Islem, Wafi, Sadok**

A mes cousines: **Ilhem, Abir, Djihad, Ouided**

Aux personne qui m'ont toujours aidé et encourage, qui étaient toujours a mes coté, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieurs mes aimables amis, collègues

d'études, et frères de cœur : **Oussama, souhaib, Abdou, Chamsou, Othman, Hamid,**

Malouki, Amin, boubaker, Zakkaria, Souhail, Ibrahim, Lakhdar, Abdallah, Imene,

Maroua, Assema

A mes chérs amis

Résumé

Des phénomènes de colmatage de la structure granulaire des réservoirs pétroliers sont observés lors de la réinjection d'eau de production dans le réservoir (endommagement hydrique). Le dépôt des particules solides en suspension dans l'eau de production peut engendrer une réduction de la perméabilité du réservoir notamment autour des puits d'injection. Il en résulte une diminution significative de l'injectivité des puits. Un modèle de colmatage semi-analytique est trouvé dans la littérature. Ce modèle qui prend en compte une distribution spatiale des particules déposées dans le milieu et une double porosité du milieu (cake interne et milieu granulaire) ne prend pas en compte l'effet du cake externe (accumulation des particules à l'entrée du milieu). L'objectif de ce travail est de modifier ce modèle en rajoutant un terme qui permet de prendre en compte ce cake externe.

La nouvelle version du modèle proposé dans ce travail montre une très bonne compatibilité avec les résultats expérimentaux en termes d'évolution de la pression d'injection. Ce modèle a été vérifié en utilisant un essai qui n'a été pas utilisé dans la procédure de calage, ce modèle permet une prévision de l'évolution de la perméabilité de façon plus simple et directement applicable dans l'ingénierie des réservoirs.

Mots-clés : perméabilité - particules en suspension - cake – milieu poreux

Abstract

Clogging phenomena of the granular structure of the oil reservoirs are observed during the reinjection of produced water into the reservoir (hydraulic damage) the deposition of the solid particles suspended in the produced water may cause a reduction in the permeability of the reservoir, particularly around the injection wells. This results in a significant decrease in the injectivity of the wells. A semi-analytical clogging model is found in literature, This model, which takes in to account a spatial distribution of the particles deposited in the medium and a double porosity of the medium (inner cake and granular medium) does not take in to account the effect of the external cake (accumulation of particles at the entry of the medium) . The objective of this work is to modify this model by adding a term that allows taking in to account this external cake.

The new version of the model proposed in this work shows a very good compatibility with the experimental results in terms of evolution of the injection pressure. This model was verified using a test that was not used in the calibration procedure this model allows a prediction of the evolution of the permeability in a simpler and directly applicable way in the engineering of the tanks.

Keywords: permeability - suspended particles - cake – porous medium

ملخص

ظواهر انسداد الهيكل الحبيبي لخزانات النفط تمت ملاحظتها, خلال إعادة حقن المياه المنتجة في خزان (الأضرار الناجمة عن المياه). ترسب الجسيمات الصلبة العالقة في المياه المنتجة قد يؤدي إلى الحد من نفاذية الخزان بشكل خاص حول بئر الحقن. وينتج عن هذا انخفاض كبير في إنتاج الآبار. وجدنا عبر التاريخ نموذج انسداد شبيه تحليلي يأخذ هذا النموذج في الاعتبار التوزيع المكاني للجزيئات المودعة في الوسط والمسامية المزدوجة للمتوسطة (كعكة الداخلية ومتوسطة الحبيبية) لا تأخذ في الاعتبار تأثير الكعكة الخارجية (تراكم الجزيئات في مدخل المتوسط). الهدف من هذا العمل وتعديل هذا النموذج بإضافة عبارة تسمح بمراعاة هذه الكعكة الخارجية.

يظهر إصدار جديد من النموذج المقترح في هذا العمل توافق ممتاز مع النتائج التجريبية من حيث تطور ضغط الحقن. تم التحقق من هذا النموذج باستخدام اختبار لم يستعمل في إجراء معايرة هذا النموذج يسمح للتوقعات التغيرات في نفاذية بسيطة جدا وقابلة للتطبيق مباشرة في هندسة المكامن.

الكلمات المفتاحية: - نفاذية - جسيمات معلقة - مسامية الوسط.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1.1 Introduction	4
1.2 Eau de production et PWRI	4
1.3 Les mécanismes physiques lors du transport et du dépôt des particules	7
1.4 Etudes expérimentales du transport/dépôt des particules dans un milieu poreux	7
1.4.1 Dispositif d'injection en cellule et en chambre d'étalonnage	7
1.4.2 Résultat d'un essai d'injection	9
1.4.2.1 Résultat d'un essai d'injection en cellule	9
1.4.2.2 Résultat d'un essai d'injection en chambre d'étalonnage	12
1.5 Modélisation du transport et du dépôt des particules solides	16
1.5.1 Modèles phénoménologiques	16
1.5.2 Modèles d'Eylander (1988)	18
1.5.2.1 Cas d'un cake externe	19
1.5.2.1 Cas d'un cake externe	21
1.5.3 Loi de darcy	23
1.5.4 Modèle de Feia (2015)	23
1.6 Conclusion	24
CHAPITRE 2. FORMULATION DU MODÈLE	26
2.1 Introduction	27
2.2 Formulation du modèle dans la configuration axiale	27
2.2.1 Bilan de masse	27
2.2.2 Évolution de la pression d'injection axiale	29
2.3 Formulation du modèle dans la configuration radiale	30
2.3.1 Bilan de masse	30
2.3.2 Évolution de la pression d'injection radiale	31
2.4 Conclusion	32
CHAPITRE 3. RESULTATS DU MODÈLE	34
3.1 Introduction	35
3.2 Données expérimentales	35
3.3 Analyse des essais axiaux	36
3.4 Validation du modèle	38

3.5Analyse des essais radiaux	39
3.6 Conclusion	41
CONCUTION GENERALE	42
LISTE DES SYMBOLES	43
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	45

Introduction général

Dans l'ingénierie pétrolière, lorsqu'ils découvrent un champ de pétrole, ils peuvent savoir le volume de pétrole récupérable. Ce volume est estimé à partir de la quantité de pétrole présent dans des champs déjà connus, affectée d'un coefficient minorant dépendant de la capacité à extraire du sol ce pétrole. Ce coefficient dépend de chaque champ, il peut varier de 10 à 50 %, avec une moyenne mondiale de l'ordre de 35%.

Dans l'opinion publique, la production des hydrocarbures est rarement associée à une utilisation massive de l'eau. En réalité, l'eau est déjà présente dans le réservoir (eau de formation). Ensuite, elle est utilisée pour les besoins de forage, de fracturation hydraulique, de complétion et de traitement des puits. Enfin, elle est l'un des fluides les plus souvent injectés dans les réservoirs, par des puits spécifiques (puits injecteurs), au cours de la récupération dite "secondaire" afin de compenser la diminution de pression du réservoir consécutive à sa mise en production. Elle sert également pour améliorer l'efficacité de déplacement et d'extraction de l'huile. Les réglementations environnementales de plus en plus strictes encouragent le secteur pétrolier et gazier à réduire son empreinte environnementale et à mettre au point des solutions efficaces pour le traitement de l'eau en vue de sa réutilisation. Cette eau contient en général des matières qui sont défavorables à l'environnement. Il faut donc utiliser des équipements pour le traitement de l'eau produite qui sont très coûteux. De ce fait, la technique de réinjection d'eau produite (ou eau de production) dans les réservoirs s'est imposée et s'est développée. Cette technique, appelée PWRI (Produced Water Re-Injection ; Wong et al. 2010, Farajzadeh 2004, Al-Abduwani et al., 2003, Feia et al. 2015, Feia et al. 2017), a le grand avantage de maintenir la pression de réservoir et par conséquent le taux de production. Cependant, elle présente quelques inconvénients du fait que, malgré une filtration avant la réinjection, l'eau produite contient fréquemment des particules solides (diamètre de quelques microns) provenant de la formation géologique, l'huile résiduelle et le soluté d'autres produits chimiques. Par leur transport et leur dépôt, ces particules peuvent réduire considérablement les espaces poreux disponibles, dégrader la perméabilité du milieu et donc réduire l'efficacité d'injection et d'exploitation (Baghdikian et al. 1989 ; Li et al. 2008). De plus, dans le cas de la réinjection à débit imposé, la diminution de la perméabilité provoque une augmentation de la pression d'injection, parfois au-delà de la capacité des pompes.

La connaissance des mécanismes du transport et du dépôt des particules solides dans un milieu poreux et leurs conséquences en termes de diminution de la perméabilité sont donc très importants pour un meilleur contrôle des opérations de PWRI.

Dans ce contexte, plusieurs études expérimentales et numériques ont été réalisées sur le phénomène de transport et de dépôt de particules solides dans un milieu poreux. Eylinder (1988) et Feia (2015) ont réalisé des modélisations analytiques et semi-analytiques sur ce phénomène. Le modèle de Feia (2015) considère une distribution spatiale des particules déposées ce qui n'est pas le cas dans le modèle d'Eylinder. Cette distribution est inspirée de l'étude expérimentale réalisée par Feia et al. (2015). Le modèle de Feia (2015) prend en compte seulement le cake interne (dépôt des particules à l'entrée du milieu). En revanche, au voisinage des puits d'injection il pourrait être formé un cake interne et un cake externe au même temps. Le but de cette étude est d'essayer de reformuler le modèle de Feia (2015) de telle sorte à prendre les deux types de cakes cités ci-dessus.

Ce mémoire comporte trois chapitres

Premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les mécanismes de transport et de dépôt des particules solides dans un milieu poreux et leurs conséquences sur la variation de la porosité et de la perméabilité du milieu. On va présenter les essais expérimentaux et les anciens modèles sur ce domaine.

Dans le deuxième chapitre on va faire une reformulation du modèle, on va se baser sur le modèle de Feia (2015) et on va ajouter l'effet cake externe.

Le troisième chapitre va contenir les résultats de notre modèle, on va appliquer notre modèle sur des résultats expérimentaux et on va valider notre modèle sur des données expérimentales axiales et radiales

Ce manuscrit se termine par une conclusion générale qui récapitule les enseignements de ce travail.

CHAPITRE 1: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Sommaire:

1.1 Introduction.....	4
1.2 Eau de production et PWRI	4
1.3 Les mécanismes physiques lors du transport et du dépôt des particules	7
1.4 Etudes expérimentales du transport/dépôt des particules dans un milieu poreux	7
1.4.1 Dispositif d'injection en cellule et en chambre d'étalonnage	7
1.4.2 Résultat d'un essai d'injection	9
1.4.2.1 Résultat d'un essai d'injection en cellule	9
1.4.2.2 Résultat d'un essai d'injection en chambre d'étalonnage	12
1.5 Modélisation du transport et du dépôt des particules solides	16
1.5.1 Modèles phénoménologiques	16
1.5.2 Modèles d'Eylander (1988)	18
1.5.2.1 Cas d'un cake externe	19
1.5.2.1 Cas d'un cake externe	21
1.5.3 Loi de darcy	23
1.5.4 Modèle de Feia (2015)	23
1.6 Conclusion	24

1.1 Introduction

A travers l'histoire, les travaux publiés sur les phénomènes de transport et de dépôt des particules sont très riches dans plusieurs domaines à savoir les domaines pétroliers, environnementaux, génie civil, etc... Les recherches sur ces phénomènes ont probablement débuté avec les travaux de Iwasaki (1937) et se sont poursuivis par plusieurs travaux. On peut citer ceux de Herzig et al. 1970 et Tien (1979). Il existe de nombreuses études qui traitent le phénomène de manière générale (Herzig et al., 1970 ; Ryan et Elimelech, 1996 ; Benamar et al. 2007 ; Zamani et Maini, 2009). Dans ces recherches, le phénomène de colmatage est étudié soit à partir d'essais en laboratoire dans différentes conditions d'essais (Ison et Ives, 1969 ; Khilar et Fogler. 1984 ; Moghadasi et al., 2004 ; Wong et Mettananda, 2009 ; Elkawafi 2010), soit à partir d'une modélisation du phénomène (Barkman et Davidson, 1972 ; Tien, 1979 ; Gruesbeck et Collins, 1982 ; McDowell-Boyer et al., 1986 ; Sharma et Yortsos, 1987 ; Sharma et al., 1997 ; Ahfir et al., 2006 ; Ochi et al., 2007 ; Wong, 2008). Ces travaux ont beaucoup enrichi les approches théoriques et expérimentales à différentes échelles (microscopique, macroscopique et à l'échelle du site étudié). Les difficultés rencontrées dans ces études se trouvent dans la grande variété de paramètres influençant ce phénomène tels que les caractéristiques du milieu poreux (taille et forme des grains, taille des pores), les caractéristiques de la suspension (taille et forme des particules, concentration) et les conditions hydrauliques (débit ou vitesse d'injection, nombre de Reynolds). C'est pour cela que le phénomène du transport et du dépôt des particules dans un milieu poreux reste encore relativement mal connu.

A travers ce chapitre, une étude bibliographique des travaux publiés sera présentée sur le transport et le dépôt de particules solides dans les réservoirs pétroliers et de façon plus générale, dans les milieux poreux lors de l'injection d'une suspension de particules solides et les conséquences sur les modifications de porosité et de perméabilité du milieu.

1.2 Eau de production et PWRI

La production des hydrocarbures est généralement accompagnée par une production d'eau qui vient de la formation et/ou de la quantité d'eau préalablement injectée dans la formation afin d'améliorer la productivité des hydrocarbures (Figure 1-1). La Figure 1-2 montre que le rapport eau/huile ou le pourcentage en volume d'eau dans le fluide produit ne cessent d'augmenter. Cette quantité d'eau augmente au fur et à mesure de la maturation du champ.

Ces eaux sont souvent mélangées avec des émulsions d'huile et des particules solides venant de la formation. Il faut également ajouter que la réglementation des rejets de l'eau de production évolue vers des teneurs en huile et matières solides de plus en plus faibles. De ce fait, la réinjection de l'eau de production est la solution adoptée par les ingénieurs réservoir pour évacuer ces eaux et pour maintenir la pression de réservoir. Le traitement des eaux produites en vue de la réinjection est essentiel pour la récupération assistée du pétrole. Malgré le grand nombre de traitements, l'eau produite contient encore fréquemment des particules solides d'une taille de quelques microns avec une très faible concentration, de l'huile résiduelle, des solutés d'autres produits chimiques et des bactéries (Kreuger, 1986 cité par Ali Joumaa, 2007). Par leur transport et dépôt, ces produits peuvent réduire considérablement l'espace poreux disponible dans le réservoir, dégrader la perméabilité du milieu et donc réduire l'efficacité de l'injection (Figure 1-3).

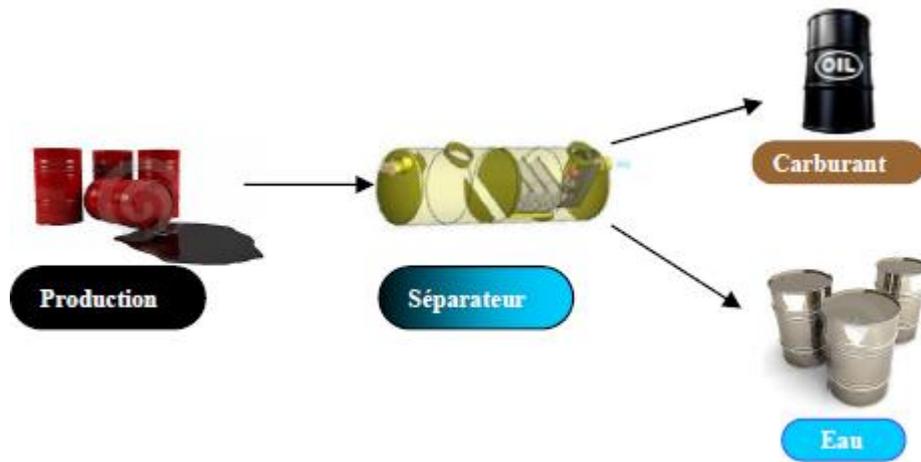


Figure 1-1 – Schématisation d'une unité de séparation d'hydrocarbure

La Figure 1-4 montre l'évolution de l'injectivité (eg. baisse de perméabilité) d'un puits pétrolier réel au cours de l'injection de l'eau de production, présentée par Shamra et al. (1997). Cette figure montre qu'au bout de 100 jours on a réduit de 80% la perméabilité du milieu. Elle montre également que, malgré les traitements apportés (injection de HCl, changement de filtre après certain temps d'injection), l'injectivité continue à baisser considérablement

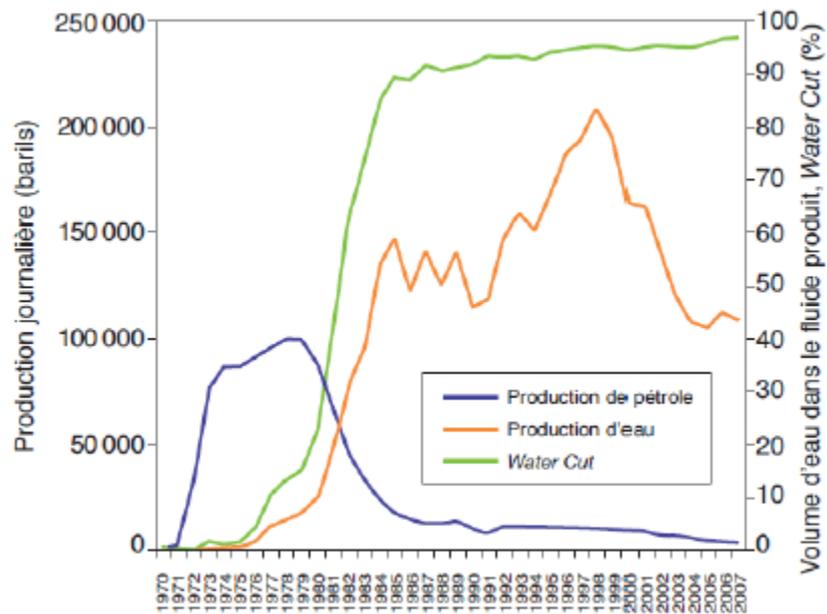


Figure 1-2 – Evolutions typiques des débits de production et du pourcentage en volume d'eau dans le fluide produit (Water Cut) au cours de la vie d'un puits producteur d'hydrocarbures (Panaroma, 2011)

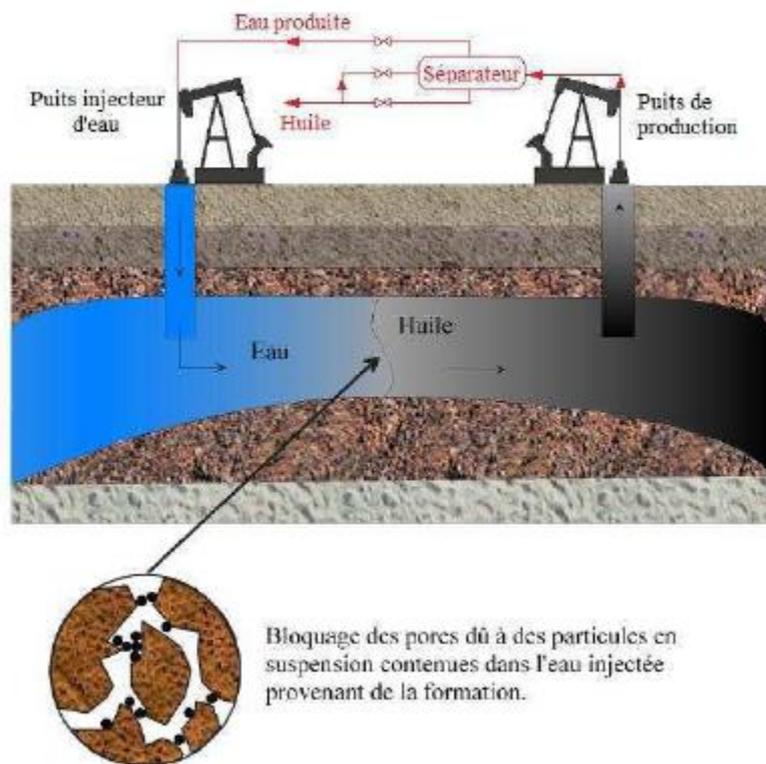


Figure 1-3 – Schéma de principe de la technique d'injection d'eau produite (Canseco Ruiz, 2009)

1.3 Les mécanismes physiques lors du transport et du dépôt des particules

Les particules solides peuvent se déposer lors de leur déplacement dans le milieu poreux en provoquant un colmatage progressif du milieu et une diminution de sa perméabilité. Selon Remize (2006) on distingue trois types de colmatages (Figure 1-4) :

- Dépôt de particules en surface : les particules ayant une taille supérieure à celle des pores du milieu se déposent à la surface de celui-ci et forment une couche qui freine l'écoulement
- blocage des pores : les particules plus petites que les pores peuvent pénétrer et bloquer partiellement ou totalement ces pores. Ce phénomène dépend de la forme et de la taille relative des pores et des particules ainsi que des conditions hydrodynamiques.
- adsorption : Ce phénomène, qui se produit généralement avec les macromolécules (e.g des protéines) présentes dans le fluide, dépend de la nature du couple soluté/milieu, des conditions du milieu (températures, pH) et des conditions opératoires de filtration (concentration en soluté, vitesse de circulation).

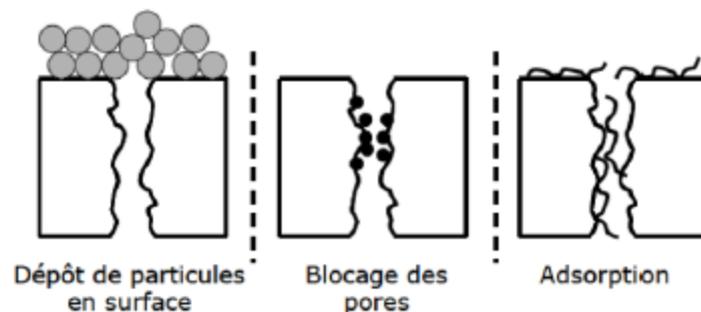


Figure 1-4 – Représentation schématique des différents mécanismes de colmatage. (Remize, 2006)

1.4 Etudes expérimentales du transport et du dépôt des particules dans un milieu poreux

1.4.1 Dispositif d'injection axiale et radiale

Les études expérimentales sur le transport et le dépôt des particules solides sont réalisées soit à partir d'essais d'injection, soit à partir d'essais d'érosion. Les équipements requis pour ces deux types d'essai sont similaires. Pour l'essai d'injection, les particules fines sont mises en suspension dans l'eau et dans l'éprouvette. En revanche, pour l'essai d'érosion, les particules sont mélangées avec la matrice constituant l'éprouvette et de l'eau claire est ensuite injectée à travers l'éprouvette. Entre ces deux types d'essai, l'essai d'injection correspond mieux au problème de PWRI. On présente sur les Figure 1-5 et 1.6, à titre d'exemple, le dispositif des

essais d'injection axial et radial, développé par Feia (2015). Le dispositif d'injection axiale en cellule se compose d'une cellule d'injection qui est similaire à une cellule triaxiale classique. Les embases inférieures et supérieures sont de forme conique d'angle 45°. Cette forme permet d'avoir un écoulement vertical ascendant sur toute la surface de l'éprouvette. La cellule est placée sur une balance Sertorius. Cette dernière permet de mesurer la variation de la masse de la cellule en cours d'essai. La pression de confinement de la cellule et la pression d'injection sont mesurées à l'aide de capteurs de pression. Le débit d'injection est imposé par une pompe péristaltique équipée d'un afficheur indiquant la valeur du débit imposé. Le débit est également mesuré par un débitmètre installé à l'entrée de l'éprouvette. La concentration de l'effluent est mesurée grâce à un turbidimètre préalablement étalonné. Les deux capteurs de pression, la balance, le débitmètre et le turbidimètre sont reliés à un micro-ordinateur via une carte d'acquisition et un multimètre (HP35970A). Un programme développé sous le logiciel d'acquisition Labview permet d'enregistrer l'ensemble des mesures et de les visualiser en temps réel, et pour le dispositif d'injection radiale en chambre d'étalonnage, il a le même principe que le dispositif d'injection axial sauf que l'objectif du dispositif est de s'approcher au mieux des conditions du puits en générant un écoulement radial d'une suspension faiblement concentrée.

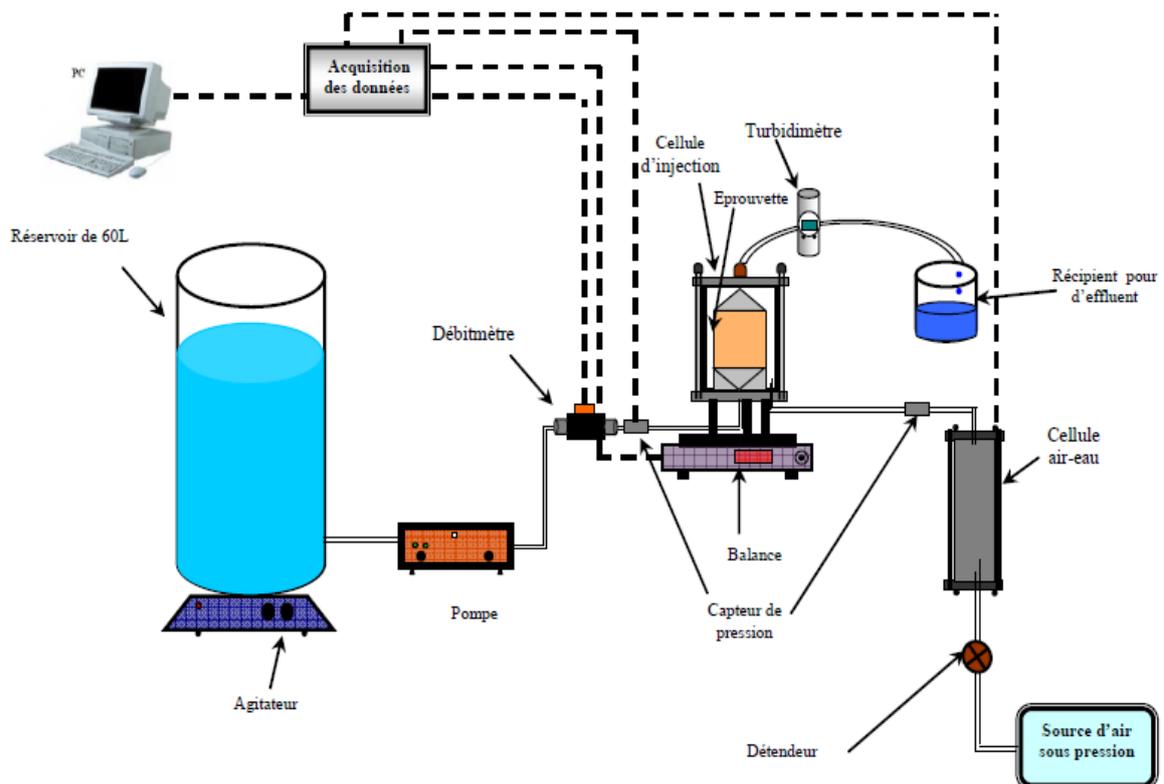


Figure 1.5 - Schéma fonctionnel du dispositif d'injection axial en cellule (Feia2015)

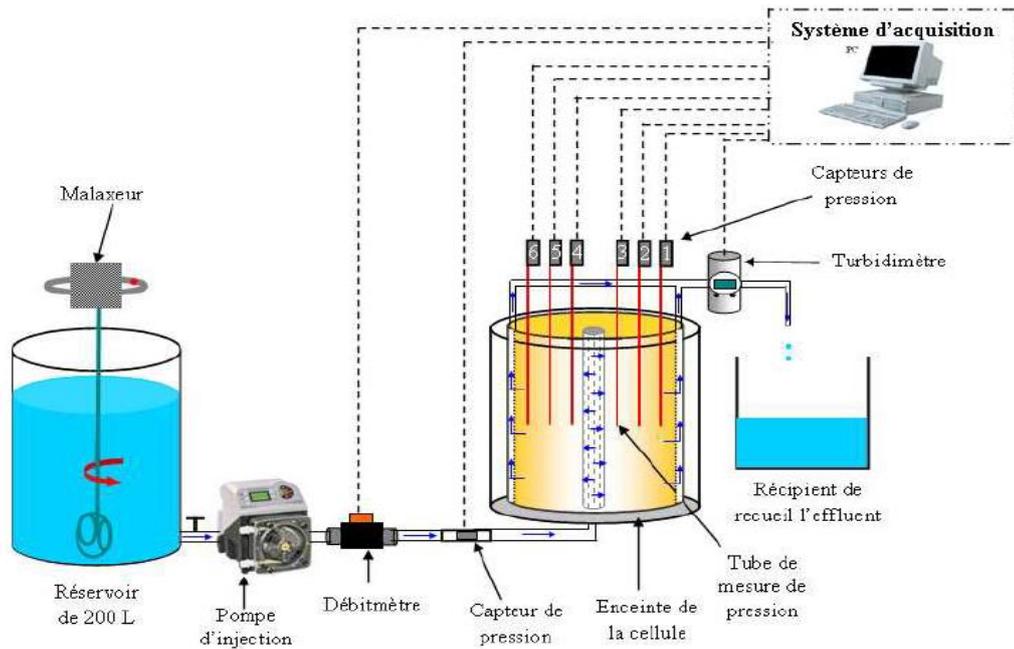


Figure 1.6 - Schéma fonctionnel du dispositif d'injection radiale en chambre d'étalonnage (Feia2015)

1.4.2 Résultat d'un essai d'injection

1.4.1.1 Résultat d'un essai d'injection en cellule

Dans ce paragraphe nous présentons les résultats typiques d'un essai réalisé dans le dispositif d'injection en cellule. Cet essai a été réalisé sur une éprouvette de sable de Fontainebleau avec un débit d'injection de $1,4 \text{ cm}^3/\text{s}$ et une concentration en particules ($d_p = 6 \mu\text{m}$) de 1 g/l

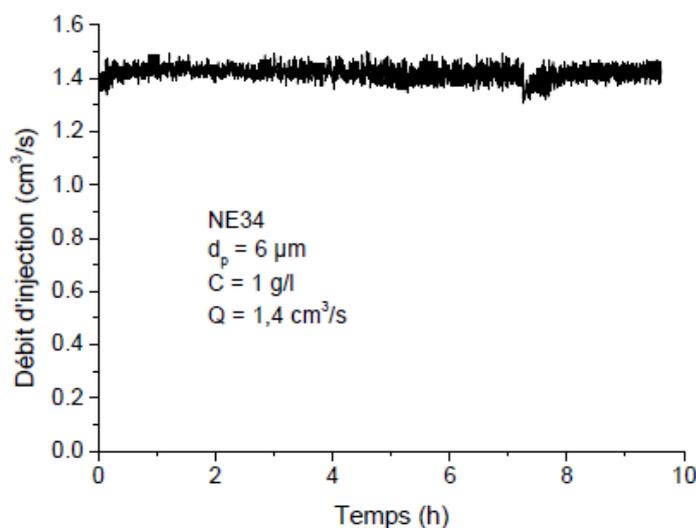
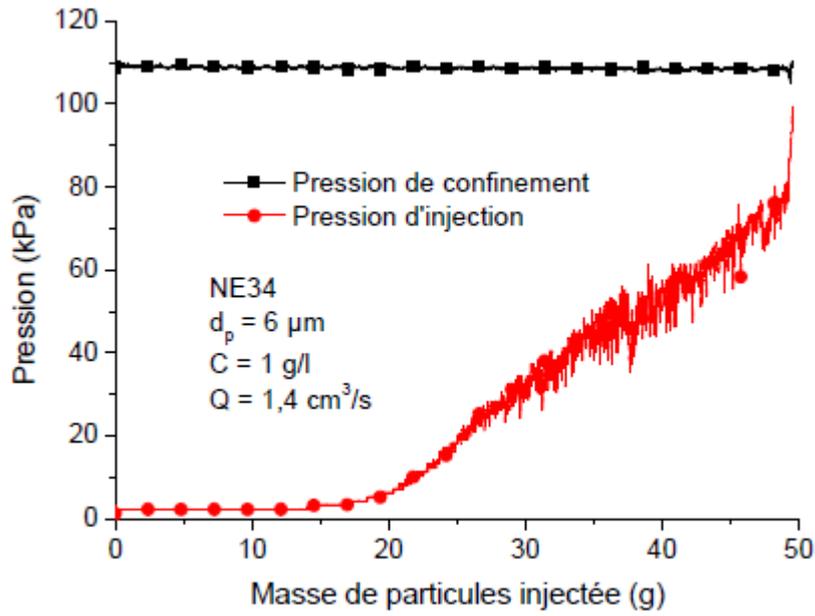
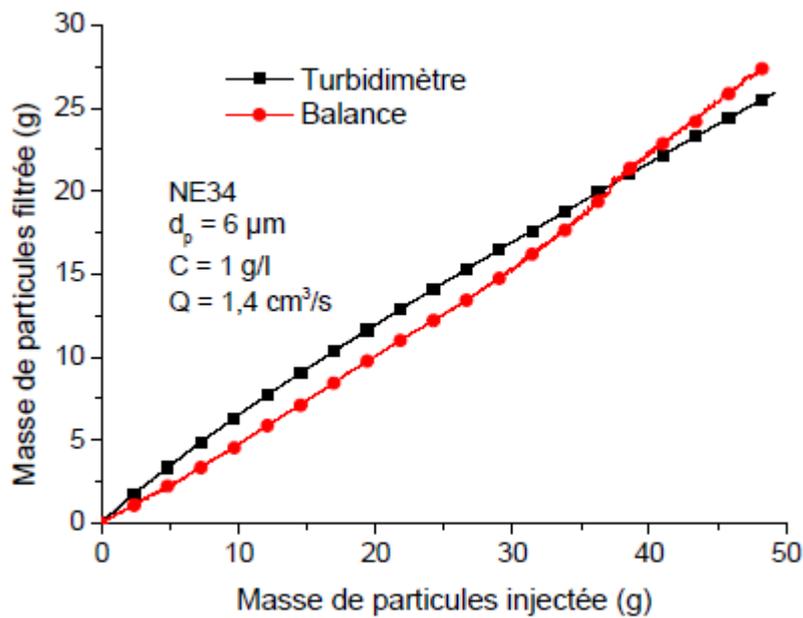


Figure 1-7 – Evolution du débit d'injection (Feia2015)

Cette phase consiste à injecter à débit constant ($1,4 \text{ cm}^3/\text{s}$), à travers l'éprouvette un mélange d'eau chargée en particules avec une concentration de 1 g/l , maintenue constante Durant l'injection. Ils ont imposé un débit constant durant l'essai (Figure 1-7), ils ont évité le dépôt et le relargage de particules dû uniquement à des changements brutaux de débit de type « impulsion ».



(a)



(b)

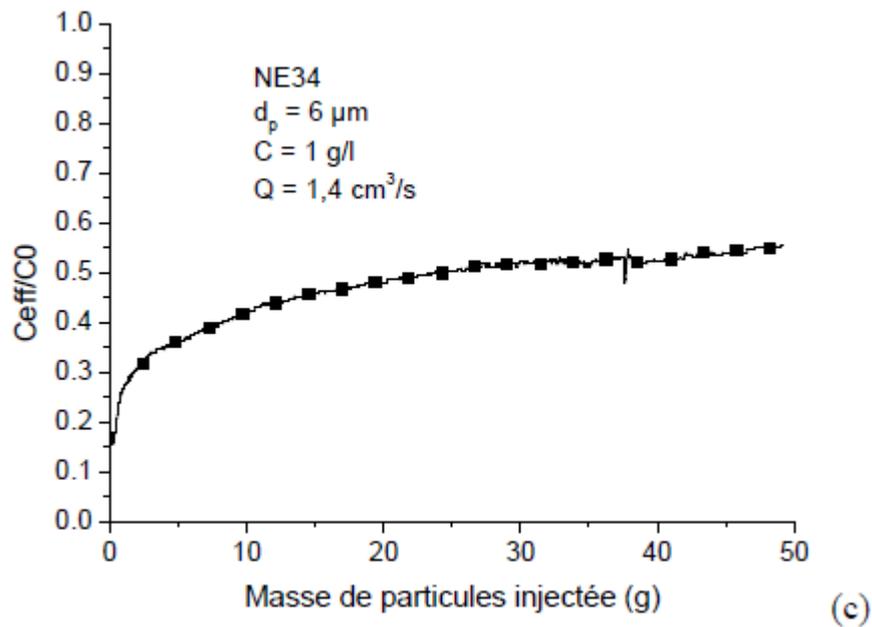


Figure 1-8 – Injection de la suspension :(a) évolution de la pression d’injection ; (b) évolution de la masse de particules filtrée ; (c) évolution de la concentration de fluide sortant (Feia2015)

Les résultats présentés sur la Figure 1-8montrent une variation de la pression d’injection (Figure 1-8-a), de la masse filtrée (Figure 1-8-b), et le rapport entre les concentrations à la sortie et initiale (Figure 1-8-c) en fonction de la masse de particules injectée.

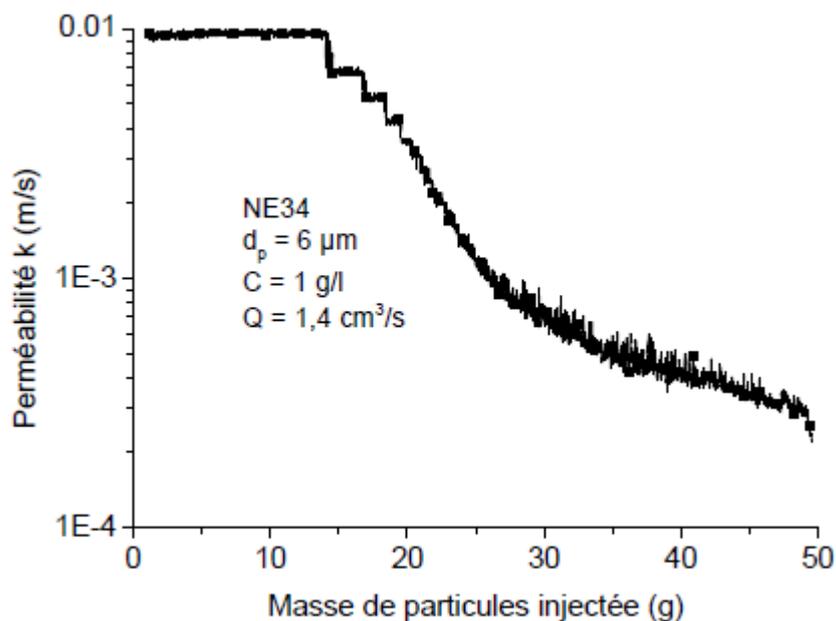


Figure 1-9 – Variation de la perméabilité pendant l’injection de la suspension (Feia2015)

A partir de la courbe de la pression d'injection et à l'aide de la loi de Darcy, ils ont pu tracer la courbe d'évolution de la perméabilité moyenne de l'éprouvette au cours de l'injection. Cette évolution est présentée sur la Figure 1-9. Cette figure montre une diminution de plus d'un ordre de grandeur de la perméabilité du milieu après injection de la suspension au cours de l'essai (10 heures d'injection).

1.4.2.2 Résultat d'un essai d'injection en chambre d'étalonnage

Après avoir terminé l'essai ils ont fait le démontage du dispositif afin d'analyser le massif de sable colmaté. Deux types de prélèvements en différents endroits ont été réalisés (Figure 1-10). D'une part, cinq couronnes de matériaux prélevés autour de la crépine (11 cm de diamètre extérieur et 6 cm de diamètre intérieur (diamètre de la crépine) et 5 cm d'épaisseur) à différentes hauteurs le long de celle-ci (7,5, 12,5, 17,5, 22,5, 27,5 cm) (voir Figure 1-10-a et Figure 1-11). D'autre part, six carottages de 2 cm de diamètre et de 4 cm de hauteur ont été également effectués sur un même diamètre, à différentes distances du centre du massif (7, 12,22 cm), à deux hauteurs différentes (13, 20 cm) (voir Figure 1-10-b et Figure 1-12-a). Des carottages symétriques par rapport à l'axe de la crépine ont été aussi réalisés (Figure 1-12-b), afin de vérifier l'homogénéité de dépôt sur le diamètre du massif à la même hauteur. Ils sont donc cinq anneaux et douze carottes (voir Figure 1-10).

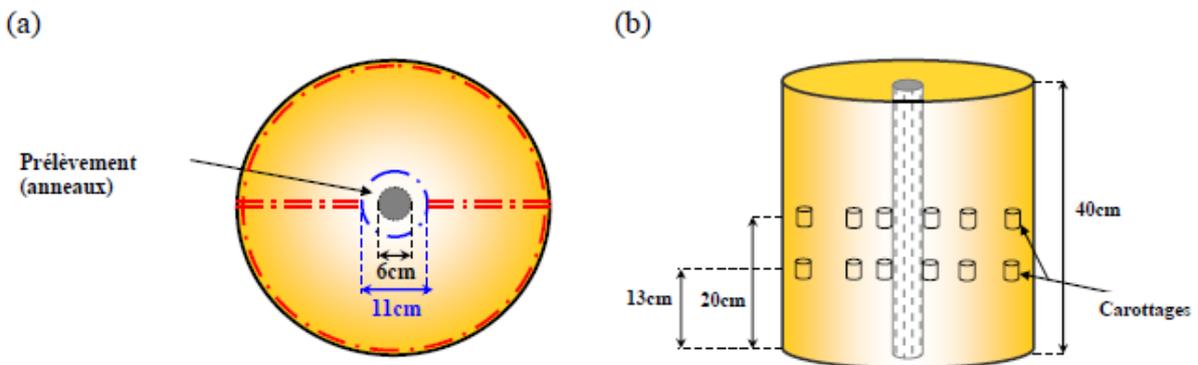


Figure 1-10 – Schéma d'implantation des prélèvements effectués : (a) prélèvements des couronnes de matériaux autour de la crépine ; (b) carottages (Feia2015)



Figure 1-11 – Photo montrant l'emplacement des prélèvements annulaires de sable autour de la crépine (Feia2015)



Figure 1-12 – Photos des zones de prélèvements : (a) carottages sur différents rayons ; (b) carottages symétriques par rapport à l'axe de la crépine (Feia2015)

Les échantillons prélevés ont été séchés à l'étuve à 100°C pendant 24 heures puis tamisés sur un tamis de 80 μm afin de quantifier les particules fines présentes dans chaque prélèvement. Dans cette analyse, la masse de particules mesurée a été normalisée par rapport à la masse de l'échantillon. La Figure 1-13 présente le profil de dépôt de particules sur un rayon pour les deux hauteurs de prélèvements de carottes réalisées. On observe un dépôt de particules

relativement important près de la crépine, puis une diminution très rapide dès qu'on s'éloigne de la crépine. Cette évolution est cohérente avec celle des pressions de fluide. On peut également noter une différence entre les masses de particules pour les deux hauteurs de prélèvements (13 cm et 20 cm). Une plus grande quantité de particules est déposée à plus faible hauteur. Ce dernier résultat montre une certaine hétérogénéité du dépôt sur la hauteur du massif. La Figure 1-14 présente le profil de deux groupes de trois prélèvements chacun, réalisés à la même profondeur (20 cm) et symétriques par rapport à l'axe de la crépine. Nous observons qu'il n'y a pas de différence significative sur la masse de particules déposées, ce qui confirme que l'injection est bien homogène dans une section horizontale. La Figure 1-15 présente le profil de dépôt, sur la hauteur du massif autour de la crépine, obtenu à partir du tamisage des cinq anneaux prélevés à différentes profondeurs autour de la crépine (voir Figure 1-11). Les résultats montrent une hétérogénéité du dépôt de particules sur la hauteur du massif. Cette hétérogénéité est également observée lors du démontage de la crépine. En effet, nous observons sur les photos de la Figure 1-16, la formation d'un cake externe plus épais en partie supérieure qu'en partie basse de la crépine. On observe également que la plupart des ouvertures de la crépine sont colmatées par les particules formant ce cake externe. Ces particules ont été soigneusement prélevées, séchées à l'étuve et pesées. La masse de particules obtenue égale à 363,3 g. A partir de cette masse, et faisant l'hypothèse d'une porosité du cake de l'ordre de 20%, nous pouvons estimer une épaisseur moyenne du cake externe de 2,2 mm.

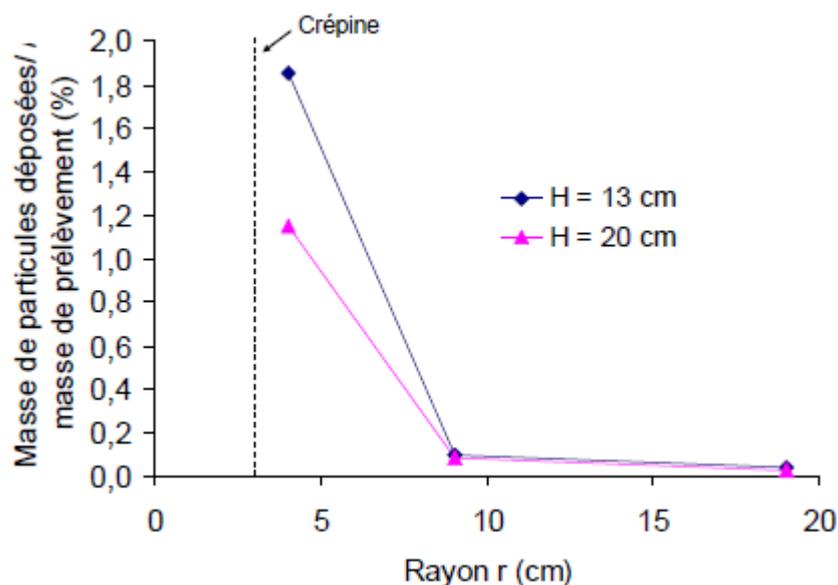


Figure 1-13 – Profil de dépôt de particules sur le rayon de massif pour deux hauteurs différentes (13, 20 cm) (Feia2015)

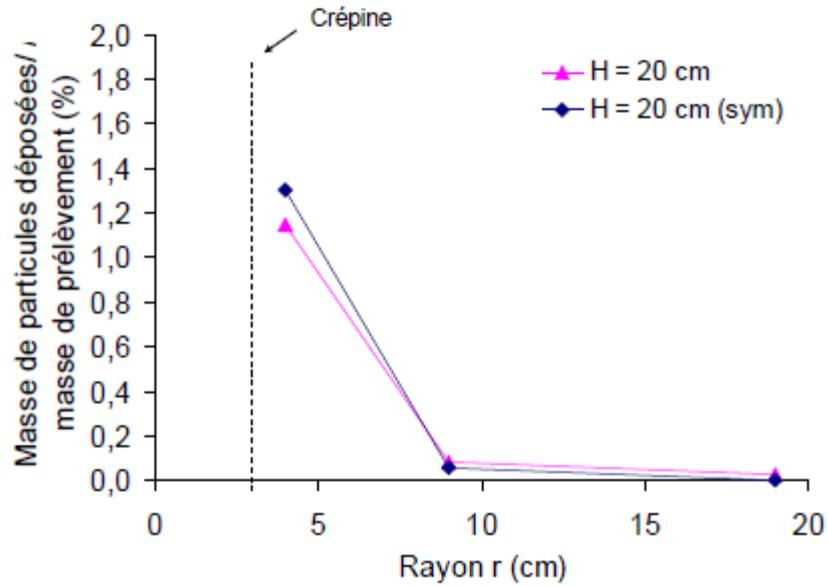


Figure 1-14 – Profil de dépôt des particules sur deux rayons à la même hauteur ($H = 20$ cm) Symétriques par rapport à l'axe de la crépine (Feia2015)

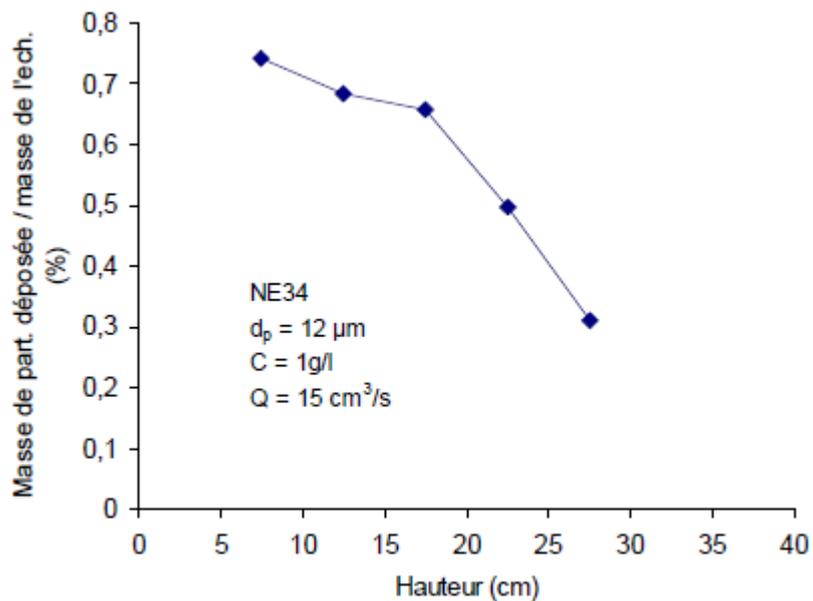


Figure 1-15 – Profil de dépôt de particules autour de la crépine en fonction de la hauteur dans le massif (Feia2015)



Figure 1-16 – Vues de la crépine pendant le démontage (Feia2015)

1.5 Modélisation du transport et du dépôt des particules solides

Dans la littérature, il y a plusieurs chercheurs qui ont travaillé dans la modélisation du phénomène de transport et de dépôt des particules solides dans les milieux poreux et qui ont développé plusieurs modèles, on va citer de suite quelques-uns :

1.5.1 Modèles phénoménologiques

Les modèles phénoménologiques (Herzig et al, 1970) prennent en considération le principe de conservation de masse, et ne se basent pas sur une modélisation physique des mécanismes de dépôts des particules. Il suffit donc de déterminer des lois phénoménologiques de rétention et d'évolution des pressions, qui sont conformes avec les résultats expérimentaux. Les mécanismes de rétention ne sont pas considérés à l'échelle du pore, mais plutôt de manière globale à l'échelle du VER. Par contre, les résultats fournis par ce type de modèles sont généralement en bon accord avec les résultats expérimentaux. L'équation traduisant le mécanisme de transport – dépôt des particules peut s'établir en se basant sur l'équation de conservation de la masse des particules ainsi que sur l'équation cinématique de transport et de dépôt des particules. Dans ce type de modèle, l'équation de conservation de masse s'écrit en général (en négligeant la diffusion des particules (Tien 1979)) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{U}{\phi} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial t} = 0 \quad (1-1)$$

C étant la concentration des particules en suspension, u est la vitesse moyenne des particules, ϕ la porosité du milieu, ψ la rétention des particules, c'est-à-dire le volume des particules capturées par unité de volume du filtre.

Les concentrations en particules sont très souvent faibles (concentration de 0,1% d'après Herzig et al., (1970), concentration inférieure à 0,5 g/l d'après Ghidaglia (1994) et Wong et Mettananda (2009)). Afin de résoudre l'équation (1-1), une loi d'évolution de la rétention des particules doit être introduite. Herzig et al (1970) utilisent la loi proposée par Iwasaki (1937) :

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \lambda \cdot u \cdot C \quad (1-2)$$

Le paramètre λ est appelé coefficient de filtration (Roge et Folger, 1988). Il est fonction des différents paramètres du milieu poreux (filtre) et de la suspension, et évolue avec le colmatage. Plusieurs études montrent que λ n'est pas constant et évolue avec le dépôt. Tien (1979) a exprimé le coefficient de filtration λ par :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot F(\psi) \quad (1-3)$$

Le coefficient λ_0 est appelé coefficient de filtration initial et il est utilisé pour décrire les premiers temps de la filtration dans un milieu de longueur L . λ_0 peut être obtenu à partir des données expérimentales :

$$\lambda_0 = \frac{-1}{L} \ln \left(\frac{C}{C_0} \right) \quad (1-4)$$

Une autre expression du terme de dépôt, souvent utilisée dans la bibliographie (Kretzschmar, 1997; Wang et al., 2000; Benamar et al., 2005; Ahfir et al., 2006), exprime une relation linéaire entre le taux de dépôt et la concentration via un coefficient appelé coefficient cinétique de dépôt k_d :

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = k_d \cdot C \quad (1-5)$$

Il y'a aussi une autre loi constitutive proposée par Feia(2015) et qui prend en compte, de manière simple, les mécanismes mentionnés ci-avant, en se basant sur les travaux de Vardoulakis et al.(1996) et Wang et al. (2011), sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = k_d \cdot C (1 + \beta \psi) - k_r \cdot \psi \quad (1-6)$$

Le premier terme $k_d C(1 + \beta \psi)$ a comme conséquence une accentuation du phénomène de dépôt avec la quantité des particules déjà déposées. Cette accentuation est contrôlée par le

paramètre β . Le phénomène de relargage (réentraînement de particules) est pris en compte dans le deuxième terme de l'équation (1-6) par le biais d'un coefficient de relargage κ_r .

1.5.2 Modèles d'Eylander(1988)

Dans le processus de filtration dans les milieux poreux, le rapport entre la distribution de la taille des particules avec celle de la taille d'accès aux pores est très important. En effet, ce paramètre contribue à la détermination du type d'endommagement (Valdes et Santamarina, 2006). Les petites particules peuvent pénétrer dans le milieu et être capturées dans les accès aux pores. Ce type d'endommagement est appelé filtration interne. Au-delà d'un certain volume injecté, une filtration interne (localisée à l'entrée du milieu) et/ou externe sous forme d'un cake peut se produire à l'entrée du milieu. La Figure 1-17 présente un schéma illustrative des deux types de cake qui peuvent se former à l'entrée d'un milieu poreux granulaire D'après Khatib (1994), l'effet du blocage des particules dans le milieu sur la perméabilité est dominant seulement dans les premiers temps de l'injection. Une fois que le cake externe est formé et atteint son épaisseur caractéristique, l'effet de la filtration interne est négligeable comparé à celui du cake externe. Cependant, la filtration interne/externe sous forme d'un cake est un phénomène important qui nécessite la détermination des ses caractéristiques telles que son épaisseur, sa porosité et sa perméabilité

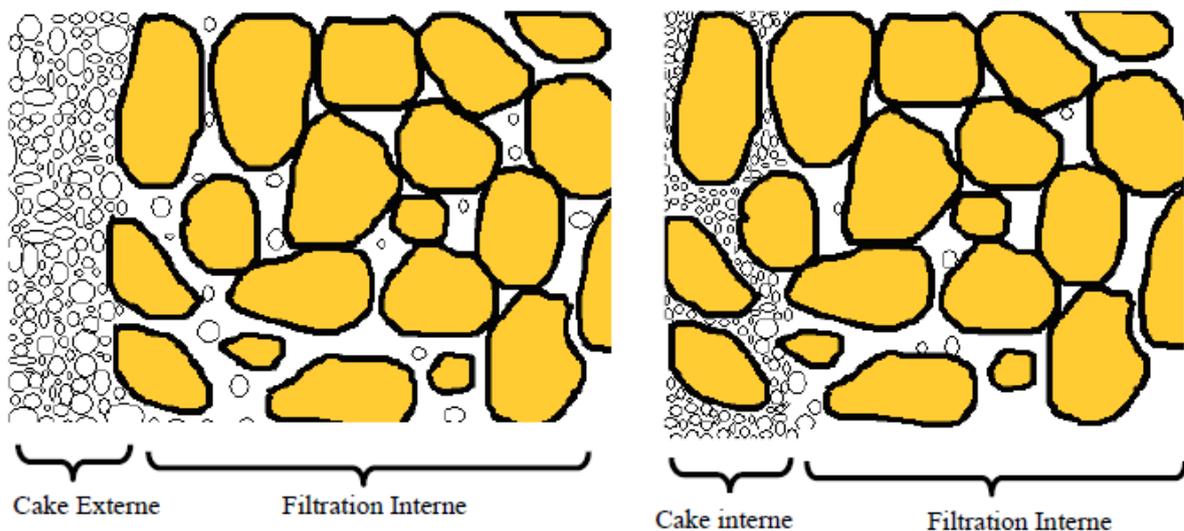


Figure 1-17 – Schéma illustratif des deux types de filtration (filtration interne et externe sous forme d'un cake (Feia 2015)

1.5.2.1 Cas d'un cake externe

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles décrivant le cake externe et ses caractéristiques ainsi que le temps de transition de la filtration interne à la filtration externe. La plupart des ces modèles s'intéressent à la filtration des particules en suspension à l'échelle macroscopique. Dans ces modèles, l'endommagement est divisé en deux processus. Un premier processus est considéré comme une filtration profonde, qui correspond à une invasion profonde du milieu poreux. Il est suivi par un deuxième processus qui correspond à la formation d'un cake externe.

La formulation théorique de ces modèles consiste à répartir l'augmentation de la pression (ou la diminution de la perméabilité) lors de l'injection entre la zone colmatée (cake interne) et le cake externe. Elle conduit à une simple corrélation entre les paramètres du modèle qui permettent la prédiction de l'évolution de la perméabilité du milieu. Le premier modèle est proposé par Barkman et Davidson (1972), qui prévoient la vitesse de diminution de la perméabilité à partir d'une simple mesure du rapport entre la concentration en particules du fluide et la perméabilité du cake formé par ces particules. En effet, lorsque le cake est complètement formé, une corrélation entre le volume cumulé d'eau injectée en fonction de la racine carrée du temps conduit à une ligne droite. La pente de cette droite donne la perméabilité du cake et l'ordonnée à l'origine donne la perméabilité de la zone colmatée. Eylander (1988) suggère que ce modèle est applicable seulement pour les expériences à pression constante et il montre souvent des défaillances dans les expériences à débit contrôlé. En revanche, Eylander (1988) a proposé un modèle basé sur les mêmes hypothèses que celles de Barkman et Davidson (1972) qui est capable de prévoir les caractéristiques du cake à partir des données d'un essai à débit contrôlé. Dans ce modèle, il a considéré que le cake est uniforme sur la surface du milieu, qu'il remplit tous les pores et que sa porosité moyenne est constante. Autrement dit, à l'intérieur de la zone du cake, ce modèle suppose un remplissage instantané de la totalité du volume poreux par le cake. La variation de la pression totale dans le milieu est la somme de la variation de la pression du cake et de celle du milieu. En utilisant la loi de Darcy, on trouve :

$$\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_m = \frac{\mu}{A} \left(\frac{e}{k_c} + \frac{L_m}{K_m} \right) \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1-7)$$

où e est l'épaisseur du cake, k_c est sa perméabilité, k_m est la perméabilité intrinsèque du milieu, L_m est sa longueur, A est la surface du milieu et μ est la viscosité de l'eau. L'épaisseur e et le volume injecté sont liés et la relation entre ces deux grandeurs peut être trouvée en utilisant l'équation de la conservation de masse:

$$Ae(1-W)(1-\phi_c)\rho_s = VW\rho_l + AeW\phi_c\rho_l \quad (1-8)$$

où W est la concentration en particules, ϕ_c est la porosité du cake, ρ_s et ρ_l sont la masse volumique des grains de sable et de l'eau respectivement.

$$e = \frac{WV\rho_l}{A[(1-W)(1-\phi_c)\rho_s - W\phi_c\rho_s]} \quad (1-9)$$

En supposant $W \ll 1$ on obtient :

$$e = \frac{WV\rho_l}{A(1-\phi_c)\rho_s} \quad (1-10)$$

A partir de l'équation (1-8) et de la relation (1-10) on trouve :

$$\frac{\Delta t}{\Delta V} \Delta p = mV + b \quad (1-11)$$

où

$$m = \frac{u\rho_l W}{A\rho_s(1-\phi_c)K_c} \quad (1-12)$$

et

$$b = \frac{u L_m}{A K_m} \quad (1-13)$$

Elyander a utilisé l'équation de Kozeny-Carman pour décrire la perméabilité du cake en fonction de sa porosité, l'équation (1-12) devient donc :

$$m = \frac{u}{A^2} \frac{\rho_l}{\rho_s} W c_k S_0^2 \frac{(1-\phi_c)}{\phi_c^3} \quad (1-14)$$

où S_0 est la surface spécifique et C_K est la constante de Kozeny-Carman. En traçant la quantité $\Delta p dt / dV$ en fonction du volume injecté V , on trouve une droite à partir de laquelle on peut déduire les paramètres m et b comme illustré sur la Figure 1-18

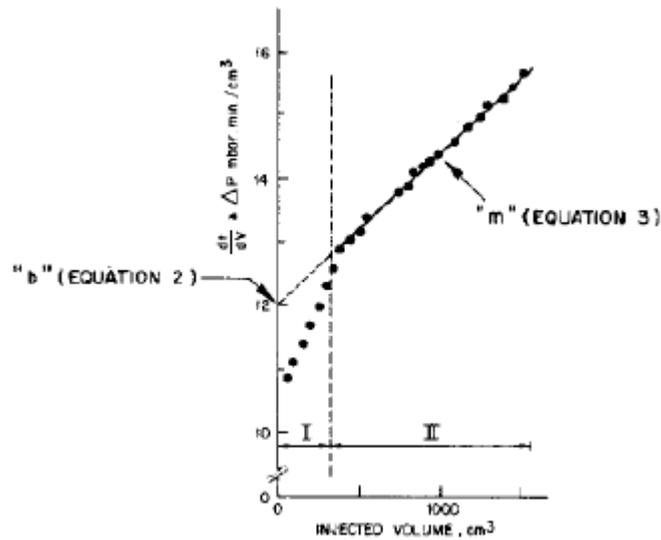


Figure 1-18 - Calage du modèle sur les données expérimentales pour déterminer m et b (Elyander, 1988)

1.5.2.2 Cas d'un cake interne

Comme pour le cake externe, Elyander (1988) a proposé une modélisation de la formation du cake interne en utilisant la même méthode de pression employée pour le cake externe. Il considère deux différences de pression : DP_I exprimant la pression du milieu où les particules sont déposées et dont l'épaisseur est e (qui est l'épaisseur du cake interne), et DP_{II} exprimant la résistance du milieu où aucune particule n'est déposée et dont l'épaisseur est $(L_m - e)$. D'où, en utilisant la loi de Darcy :

$$\Delta p = \Delta p_I + \Delta p_{II} = \frac{u}{A} \left(\frac{e}{K'_m} + \frac{L_m - e}{K_m} \right) \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1-15)$$

D'autre part, en utilisant la conservation de la masse et en supposant que la fraction massique $W \ll 1$, on peut écrire :

$$e = \frac{WV\rho_l}{A\rho_s(1-\phi_c)\phi_m} \quad (1-16)$$

En substituant l'équation (1-15) dans l'équation (1-16) on obtient :

$$\frac{\Delta t}{\Delta V} \Delta p = mV + b \quad (1-17)$$

ou

$$m = \frac{u W \rho_l}{A^2 \rho_s (1 - \phi_c) \phi_m} \left(\frac{1}{K'_m} - \frac{1}{K_m} \right) \quad (1-18)$$

$$\text{et} \quad b = \frac{u L_m}{A K_m} \quad (1-19)$$

Dans l'équation (1-18), il y a deux inconnues ; la porosité du cake ϕ_c et la perméabilité du milieu après dépôt de particules K'_m . Etant donné que le volume occupé dans les pores inclut la porosité propre des particules fines et celle du milieu initial simultanément, l'équation de Kozeny-Carman employée dans l'analyse du cake externe n'est plus valable, d'où la nécessité de regarder de plus près le terme de variation de pression DP_l . En effet, la perméabilité K'_m peut être exprimée en fonction de la perméabilité initiale du milieu K_m et de celle de la couche des particules déposées K_c en introduisant le paramètre f exprimant la fraction volumique de volume poreux occupée par le cake (équation 1-20).

$$K'_m = f\phi_m K_c + (1-f)\phi_m K_m \quad (1-20)$$

L'équation (1-20) se réduit, en cas limite de blocage total ($f = 1$), à :

$$k'_m = f\phi_m k_c \quad (1-21)$$

A partir de ces équations, nous arrivons aux équations finales :

$$m = \frac{u W \rho_l}{A^2 \rho_s (1-\phi_c) \phi_m} \left(\frac{1}{\phi_m K_c} - \frac{1}{K_m} \right) \quad (1-22)$$

où

$$m = \frac{u W \rho_l}{A^2 \rho_s \phi_m} \left(\frac{C_k S_0^2 (1-\phi_c)}{\phi_m \phi_c^3} - \frac{1}{K_m (1-\phi_c)} \right) \quad (1-23)$$

La Figure 1-19 montre comment on peut déterminer les paramètres m et b à partir des données expérimentales d'une injection avec une concentration de 0,67 g/l présentées par Eylander (1988)

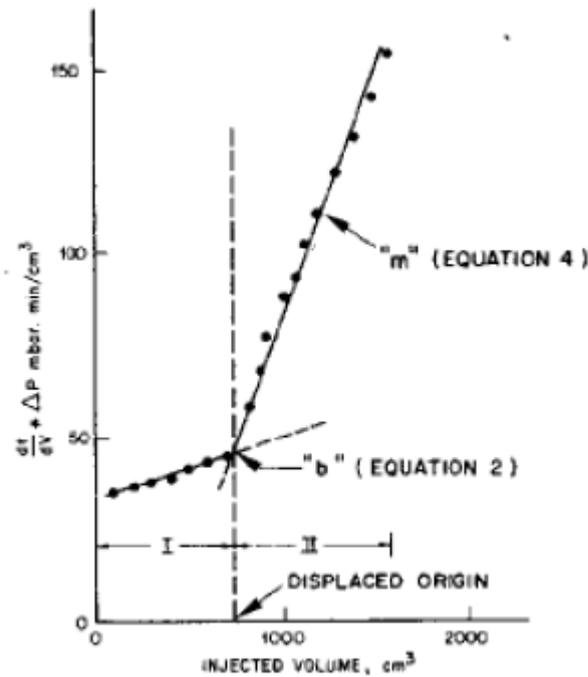


Figure 1-19 – Evaluation des paramètres m et b à partir des données expérimentales (Eylander,1988)

1.5.3 Loi de Darcy

Le remplissage non-uniforme du milieu par le cake engendre une perméabilité non-uniforme qui diminue avec la progression du remplissage. En utilisant la loi de Darcy, l'évolution de la pression d'injection dans le milieu est exprimée par l'équation suivante :

$$\Delta p = \frac{u}{A} Q \int_0^L \frac{dx}{K_f(x)} \quad (1-24)$$

où $k_f(x)$ est la perméabilité intrinsèque du milieu dans un point donné.

1.5.4 Modèle de colmatage de Feia (2015)

Dans son travail il a proposé un nouveau modèle basé sur les mêmes idées que le modèle d'Eylander (1988), mais en apportant des améliorations sur plusieurs points : il suppose que les particules se déposent en profondeur dans le milieu poreux avec une intensité maximale au point d'injection, qui diminue progressivement dans la profondeur du milieu. De plus, il suppose un remplissage progressif des pores du milieu avec un cake ayant une porosité interne constante. Dans ce modèle, le cake est donc considéré comme une structure poreuse formée par les particules déposées. Le milieu poreux et le cake forment par conséquent un milieu à double porosité. Un autre changement par rapport au modèle d'Eylander concerne la

loi de perméabilité-porosité utilisée. Eylander (1988) utilise la loi de Kozeny-Carman, tandis que dans le nouveau modèle, une loi de type puissance est utilisée qui peut potentiellement, suivant la l'exposant utilisé pour cette loi, donner une non-linéarité plus forte aux variations de la perméabilité et par conséquent aux variations de la pression au cours de l'injection.

Ce modèle a été basé sur la conservation de la masse des particules(MDP) (masse de particules injectées, déposées et en suspension).

Le bilan de masse des particules s'écrit :

$$MDP \text{ injectées} = MDP \text{ déposées} + MDP \text{ en suspension}$$

$$VC'_{\rho_l} = \int_0^L A(1 - \phi_c) \phi_m f(x) \rho_s dx + \int_0^L A \phi_m (1 - f(x)) C' \rho_s dx \quad (1-25)$$

ou
$$f(x) = \frac{a}{\frac{x}{L} + b} \quad (1-26)$$

et en ce basent aussi sur la loi de darcy pour avoir le modèle suivant :

$$\Delta p = \frac{u}{A} Q \int_0^L \frac{dx}{K_m \left(1 - \frac{a}{\frac{x}{L} + b}\right) (1 - \phi_c)^n} \quad (1-27)$$

Le paramètre a dans cette relation permet de simuler l'augmentation de la pression d'injection due à l'injection d'un volume de fluide contenant des particules en suspension et la formation d'un cake dans le milieu poreux.

1.6 Conclusion

Le transport et le dépôt des particules solides dans les milieux poreux sont depuis longtemps des domaines activement explorés dans l'industrie pétrolière, car une bonne compréhension de ces deux aspects peut permettre de résoudre certains problèmes rencontrés lors de l'application de la technique PWRI.

On a tout d'abord parlé de la technique PWRI, utilisée dans l'industrie pétrolière, et les problèmes rencontrés liés au transport et au dépôt des particules. Ensuite, les mécanismes physiques principaux ont été présentés. Puis, nous avons parlé de la modélisation du transport et le dépôt des particules solides dans les milieux poreux et on a vu qu'au-delà d'un certain temps d'injection de particules, une structure composée de particules peut se former à l'entrée du milieu poreux connue par le nom « cake » interne ou externe. Enfin on a vu une étude expérimentale sur l'essai du dispositif d'injection axial et radial. La compréhension de l'influence des paramètres sur le phénomène de colmatage d'un milieu, en particulier le débit

d'injection et la concentration en particules injectées, reste assez mal connue à ce jour. Alors l'objectif de notre travail est de développer un nouveau modèle de colmatage semi analytique à travers les résultats expérimentaux des essais du dispositif d'injection axial en cellule et d'adapter un modèle développé sur une configuration radial à travers les résultats expérimentaux de l'essai du dispositif d'injection radiale en chambre d'étalonnage afin de s'approcher des conditions du puits pétrolier.

CHAPITRE 2:FORMILATION DU MODÈLE

Sommaire:

2.1 Introduction	27
2.2 Formulation du modèle dans la configuration axiale	27
2.2.1 Bilan de masse	27
2.2.2 Évolution de la pression d'injection axiale	29
2.3 Formulation du modèle dans la configuration radiale	30
2.3.1 Bilan de masse	30
2.3.2 Évolution de la pression d'injection radiale	31
2.4 Conclusion	32

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédant, nous avons présenté les études et les résultats expérimentaux concernant les phénomènes de transport et de dépôt des particules solides dans un milieu poreux trouvés dans la littérature. Les deux modèles semi-analytiques simples qui sont présentés dans le chapitre précédent (Eylander 1988, Feia 2015) prennent en compte juste le cake interne, avec l'effet important du cake externe. Le modèle précédent de (Feia 2015), qui prend en compte une distribution spatiale des particules dans le milieu, ne prend pas en compte les particules qui s'accumulent à l'entrée du milieu poreux. Ces particules vont s'accumuler et elles vont faire un autre cake à l'extérieur qui s'appelle le cake externe.

Dans ce chapitre nous allons faire une reformulation du l'ancien modèle de Feia (2015) en prenant en compte le cake interne et le cake externe à la fois. Les résultats de ce nouveau modèle seront calés sur des essais expérimentaux axial et radial.

2.2 Formulation du modèle dans la configuration axial :

Comme on a vu dans le chapitre précédant, la formulation du modèle est principalement basée sur l'équation du bilan de masse des particules. Elle concerne la masse des particules injectées, les particules déposées formant le cake interne et celles de la suspension similaire au modèle d'Eylander (1988). A cette version nous allons essayer d'ajouter la partie qui concerne les particules déposées formant le cake externe. Dans ce modèle la masse des particules sortantes est négligée. Notons que pour une application de ce modèle dans le cas d'injection dans un réservoir, on suppose que la masse de particules sortantes du milieu est nulle. La deuxième équation utilisée dans ce modèle décrit l'évolution de la pression d'injection en utilisant la loi de Darcy.

2.2.1 Bilan de masse:

Supposons un milieu poreux unidimensionnel (équivalent à une éprouvette dans un essai d'injection) ayant une longueur L , une surface A et une porosité ϕ_m . Le milieu est soumis à l'injection d'un volume V d'un fluide de densité ρ_l , contenant des particules de densité ρ_s en suspension avec une concentration massique C' (gr/gr). On utilise une concentration massique ici pour être compatible avec le modèle d'Eylander tel que :

$$C' = \frac{C}{\rho_l} \quad (2-1)$$

On définit le paramètre f comme le rapport entre le volume du cake V_c et le volume poreux V_{ϕ_m} pour décrire le niveau de remplissage du volume poreux par le cake dans un point donné.

$$f(x) = \frac{V_c}{V_{\phi_m}} \quad (2-2)$$

$f = 0$ correspond au milieu poreux non-rempli avant l'injection. Au cours de l'injection et avec la formation de cake interne et externe, f augmente progressivement de façon non-uniforme dans le milieu, avec des valeurs plus grandes près du point d'injection. La valeur limite $f = 1$ correspond au remplissage total de volume poreux par le cake interne et externe en un point donné. Concernant les particules en suspension, on suppose que ces particules peuvent être uniquement dans le volume poreux non-rempli par le cake. Autrement dit, les particules ne peuvent pas être en suspension à l'intérieur du cake. On suppose également que la concentration des particules en suspension est la même que celle de l'injection. Ceci est évidemment une hypothèse simplificatrice, mais admissible pour les faibles concentrations de particules considérées ici.

Le bilan de masse des particules de (Feia 2015) s'écrit :

$$\begin{aligned} \text{MDP injectées} &= \text{MDP déposées (intérieur)} + \text{MDP en suspension} \\ VC'\rho_l &= \int_0^L A(1 - \phi_c) \phi_m f(x) \rho_s dx + \int_0^L A \phi_m (1 - f(x)) C' \rho_s dx \end{aligned} \quad (2-3)$$

En s'inspirant des profils de concentration des particules déposées, obtenues par la modélisation numérique de transport-déposition-relargage des particules dans un milieu poreux , on adopte la forme empirique suivante pour la distribution de variable f dans le milieu :

$$f(x) = \frac{a}{\frac{x}{L} + b} \quad (2-4)$$

a et b étant les paramètres du modèle. Nous avons $b \geq a$ (car $f \leq 1$) et le rapport a/b donne la valeur du remplissage maximal du volume poreux obtenue au point d'injection ($x = 0$).

Afin de ajouter la partie qui concerne les particules formant le cake externe nous avons supposé qu'un rapport a/b des particules déposées reste à l'entrée du milieu mais à l'extérieure. Le nouveau bilan de masse des particules est présenté sur l'équation (2-5).

MDP injectées = MDP déposées (intérieur)+MDP en suspension + MDP déposées (extérieur)

$$VC'\rho_l = \int_0^L A(1 - \phi_c) \phi_m f(x) \rho_s dx + \int_0^L A \phi_m (1 - f(x)) C' \rho_s dx + \frac{a}{b} VC' \rho_l \quad (2-5)$$

A partir des équations (2-4) et (2-5) on peut exprimer le paramètre a en fonction du paramètre b et des autres paramètres du modèle, tel que :

$$a = \frac{VC' \rho_l - ALC' \rho_s \phi_m}{A \rho_s \phi_m L \ln\left(1 + \frac{1}{b}\right) (1 - \phi_c - C') + \frac{VC' \rho_l}{b}} \quad (2-6)$$

2.2.2 Evolution de la pression d'injection :

Le remplissage non-uniforme du milieu par le cake engendre une perméabilité non-uniforme qui diminue avec la progression du remplissage. En utilisant la loi de Darcy et en ajoutant l'effet du cake externe, l'évolution de la pression d'injection dans le milieu est exprimée par l'équation suivante :

$$\Delta p = \frac{\mu}{A} Q \int_0^L \frac{dx}{K_f(x)} + \frac{T}{k_c} \quad (2-7)$$

où $k_f(x)$ est la perméabilité intrinsèque du milieu dans un point donné, T est l'épaisseur du cake externe, k_c est la perméabilité du cake externe et μ est la viscosité du fluide.

$$T = \frac{aV_c \rho_l}{bA\rho_s(1-\phi_c)} \quad (2-8)$$

La porosité ϕ du milieu peut être exprimée comme une fonction de la porosité initiale et de la porosité du cake via la fonction f en considérant un milieu à double porosité

$$\phi = \frac{V_{\phi_m} - V_c + V_{\phi_c}}{V} = \phi_m - \frac{V_c}{V_{\phi_c}} \frac{V_{\phi_m}}{V} + \frac{V_{\phi_c}}{V_c} \frac{V_{\phi_m}}{V} = \phi_m - f\phi_m + f\phi_c\phi_m \quad (2-9)$$

$$\phi(x) = \phi_m [1 - f(x)(1 - \phi_c)] \quad (2-10)$$

Lorsque $f = 0$ (état initial) la porosité est égale à la porosité initiale ϕ_m et quand $f = 1$ (remplissage total du milieu) la porosité du milieu ϕ est égale à $\phi_m \phi_c$ (porosité d'un milieu à double porosité).

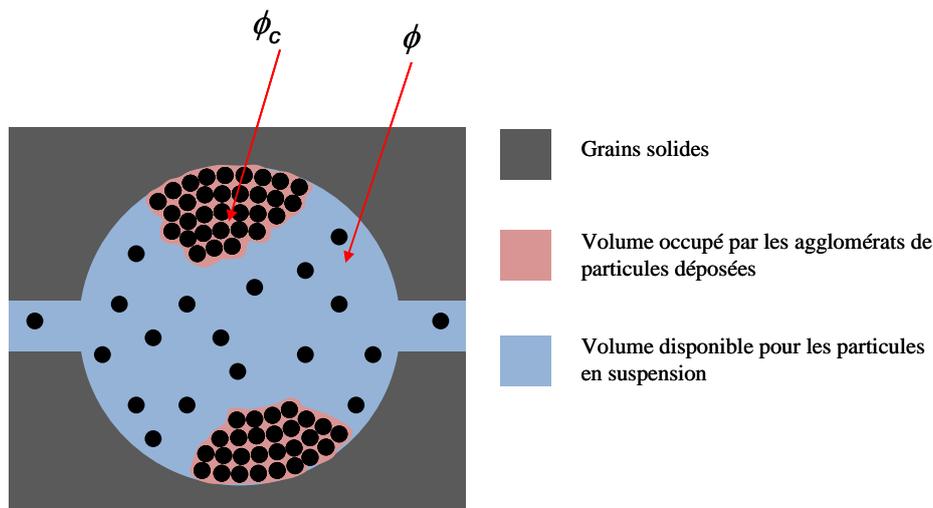


Figure 2-1 Vue schématique d'un milieu à double porosité: ϕ est la porosité du milieu et ϕ_c porosité de l'agglomérat (cake) (Feia 2015)

En faisant l'hypothèse d'une relation perméabilité-porosité de type loi puissance, la perméabilité du milieu peut être exprimée comme suit :

$$k_f = k_m \left(\frac{\phi}{\phi_m} \right)^n + k_c \quad (2-11)$$

Où est un paramètre du modèle et k_m est la perméabilité initiale du milieu et k_c est la perméabilité du cake externe. A l'aide de l'équation (2-10) on trouve :

$$k(x) = k_m [1 - f(x)(1 - \phi_c)] + k_c \quad (2-12)$$

En utilisant les équations (2-5) et (2-11), l'équation (2-7) devient :

$$\Delta p = \frac{u}{A} Q \int_0^L \frac{dx}{\left[\left(k_m \left(1 - \frac{x^a}{L^a+b} \right) (1 - \phi_c) \right) \right]^n} + \frac{T}{k_c} \quad (2-13)$$

Le paramètre a dans cette relation est donnée par l'équation (2-6). L'équation (2-13) permet de simuler l'augmentation de la pression d'injection due à l'injection d'un volume de fluide contenant des particules en suspension et la formation des deux cakes dans le milieu poreux.

2.3 Formulation du modèle dans la configuration radiale:

2.3.1 Bilan de masse:

Dans cette partie nous allons suivre les mêmes principes que la configuration axiale sauf que les paramètres vont changer parce que l'essai dans la chambre d'étalonnage est très près de la réalité.

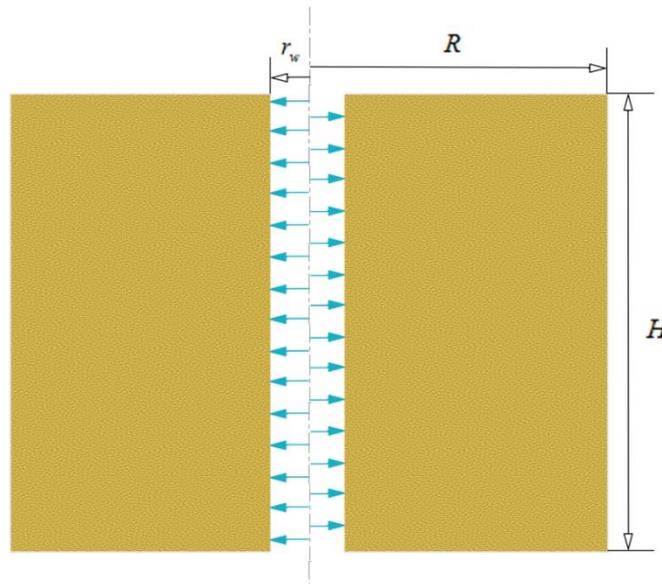


Figure 10 - Géométrie de la configuration du modèle radiale (Feia 2015)

Alors le bilan de masse devient :

$$VC'\rho_l = \int_{r_w}^R 2\pi H(1 - \phi_c)\phi_m f(r)\rho_s r dr + \int_{r_w}^R 2\pi H r \phi_m (1 - f(r))C'\rho_s r dr + \frac{a}{b}VC'\rho_l \quad (2-14)$$

La fonction $f(x)$ devient :

$$f(r) = \frac{a}{\frac{r-r_w}{R-r_w} + b} \quad (2-15)$$

Où r_w est le rayon de la crépine et R est le rayon de la chambre d'étalonnage et r est le rayon de dépôt des particules.

A partir des équations (2-3) et (2-15) on peut exprimer le paramètre a en fonction du paramètre b et des autres paramètres du modèle, tel que :

$$a = \frac{VC'\rho_l - 2\pi H\left(\frac{R^2}{2} - \frac{r_w^2}{2}\right)C'\rho_s\phi_m}{2\pi H\rho_s\phi_m K_1(1 - \phi_c - C') + \frac{VC'\rho_l}{b}} \quad (2-16)$$

ou

$$K_1 = (R - r_w)(R - r_w + (bR + Brw + rw)) \ln \frac{R - r_w + b(R - r_w)}{b(R - r_w)} \quad (2-17)$$

2.3.2 Evolution de la pression d'injection :

En appliquant les même loi dans l'étape précédente, en utilisant la loi de darcy ,, l'évolution de la pression d'injection dans le milieu est exprimée par l'équation suivante :

$$\Delta p = \frac{u}{2\pi H r} Q \int_{r_w}^R \frac{dx}{k_f(x)} + \frac{T}{k_c} \quad (2-18)$$

Ou $k_f(x)$ est la perméabilité intrinsèque du milieu dans un point donné.

La porosité ϕ du milieu peut être exprimée comme une fonction de la porosité initiale et de la porosité du cake via la fonction f en considérant un milieu à double porosité (2-9) (2-10).

La perméabilité du milieu est exprimée par la relation (2-11) (2-12).

En utilisant les équations (2-5) et (2-11), l'équation (2-7) devient :

$$\Delta p = \frac{u}{2\pi H} Q \int_{r_w}^R \frac{dx}{r \left(k_m \left(1 - \frac{a}{\frac{r-r_w}{R-r_w} + b} \right) (1 - \phi_c) \right)^n} + \frac{T}{k_c} \quad (2-18)$$

Le paramètre a dans cette relation est donné par l'équation (2-6). L'équation (2-19) permet de simuler l'augmentation de la pression d'injection due à l'injection d'un volume de fluide contenant des particules en suspension et la formation des deux cakes dans le milieu poreux.

2.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous nous sommes consacrés à la modélisation du phénomène de colmatage d'un milieu poreux, Nous avons pris le modèle développé par (Feia 2015) et nous avons pris en considération l'effet du cake externe dans le bilan de masse et la loi de darcy qui décrivent le colmatage du milieu et on a développé un nouveau modèle qui prend en compte les deux cakes à la fois

CHAPITRE 3:RESULTATS ET DISCUSSION

Sommaire:

3.1 Introduction	35
3.2 Données expérimentales	35
3.3Analyse des essais axiaux	36
3.4 Validation du modèle	38
3.5Analyse des essais radiaux	39
3.6 Conclusion	41

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que les anciens modèles de (Feia 2015) ne prennent pas en compte l'effet du cake externe et le modèle de (Eylander 1988) prend en compte soit le cake interne soit le cake externe, alors on a fait une reformulation de l'ancien modèle de (Feia2015) ou on a ajouté l'effet du cake externe aux modèles précédents.

Dans ce chapitre nous allons appliquer les résultats du modèle proposé sur des résultats expérimentaux réalisés par (Feia et al 2015) afin de réaliser une validation de cette nouvelle version du modèle.

3.2 Données expérimentales

Le modèle proposé est appliqué sur les résultats expérimentaux des essais d'injection effectués par Feia et al. (2015). Ces essais d'injection sont réalisés sur un dispositif expérimental appelé "cellule d'injection". Nous avons choisi trois essais d'injection avec trois débits d'injection différents (3, 4 et 8 cm³/s). Les résultats des essais en termes de pression d'injection sont présentés sur la Figure 3-1. On observe que la pression d'injection est quasi constante au début puis elle augmente progressivement jusqu'à une valeur proche de la pression de confinement. La réponse initiale reflète le fait que la filtration des particules se produit plutôt uniformément le long de l'échantillon sans affecter la perméabilité globale de l'échantillon. Ce processus se poursuit et le dépôt de particules est progressivement concentré près du point d'injection, formant un cake, à l'extérieur et à l'intérieur, de filtration à faible perméabilité, ce qui entraîne une augmentation rapide de la pression d'injection.

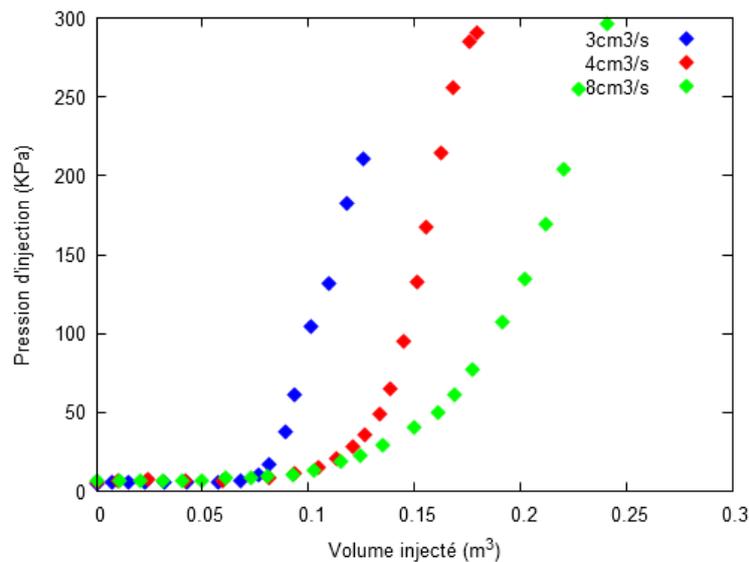


Figure 3-1 - Résultats expérimentaux : Évolution de la pression d'injection de trois essais effectués à trois différents débits d'injection

3.3 Analyse des essais axiaux

A partir du calage des paramètres b et n le modèle permet de simuler l'évolution de la pression interstitielle en cours d'injection. On a le paramètre b qui contrôle la distribution de l'intensité de déposition et de formation du cake dans le milieu, tandis que le paramètre n contrôle la dépendance de la perméabilité aux variations de la porosité. Les paramètres du modèle sont présentés dans le Tableau 3-1.

Tableau 3-1 - paramètres du modèle axiale

A (m ²)	L(m)	ϕ_m	ϕ_c	k_m (m ²)	C' (gr/gr)	ρ_l (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)
0.005	0.08	0,36	0.39	9×10^{-12}	10^{-4}	1000	2700

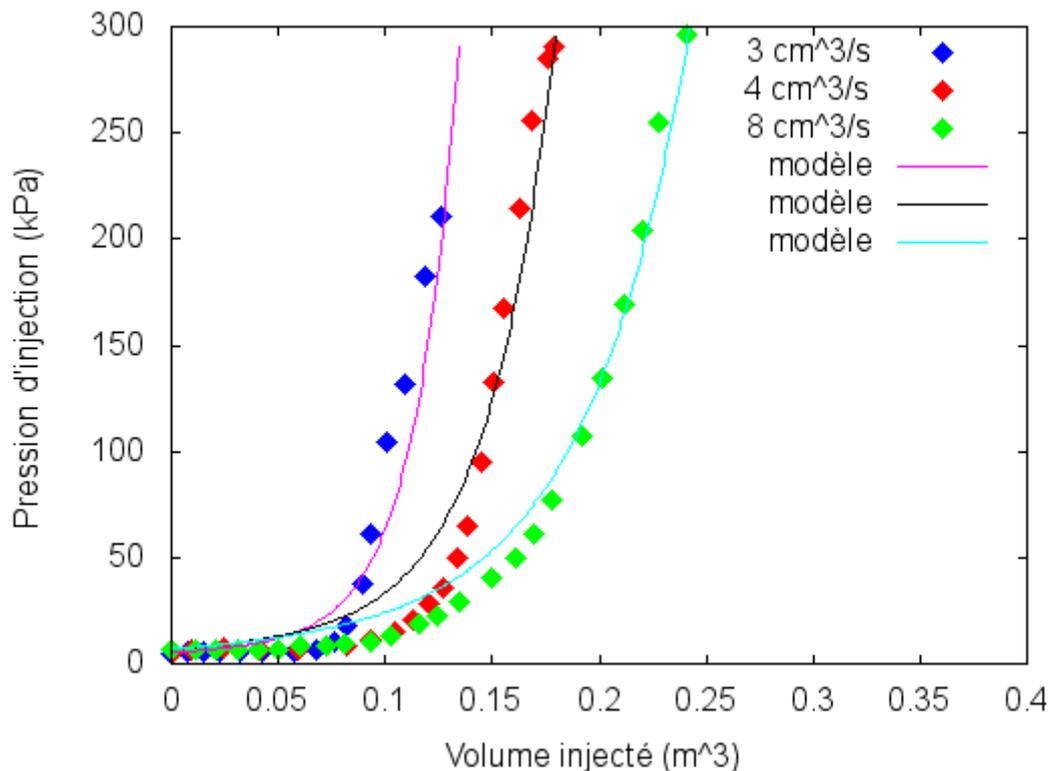


Figure 3-2-Simulation des essais avec le nouveau modèle du cake interne et du cake externe

Les résultats de la simulation en termes de pression d'injection sont présentés sur la figure 3-2 et comparés aux résultats expérimentaux. On observe que le modèle proposé permet de reproduire toute l'évolution de la pression lors des essais d'injection. Les valeurs évaluées du paramètre b augmentent avec l'augmentation du débit d'injection (Figure 3-3). Le modèle simule également le changement de l'épaisseur du cake externe pendant l'injection. La Figure 3-4 montre ce changement pour le test réalisé à une vitesse d'injection de $8 \text{ cm}^3/\text{s}$. Cette évolution montre que le cake externe atteint une épaisseur de 1 mm à la fin de l'essai.

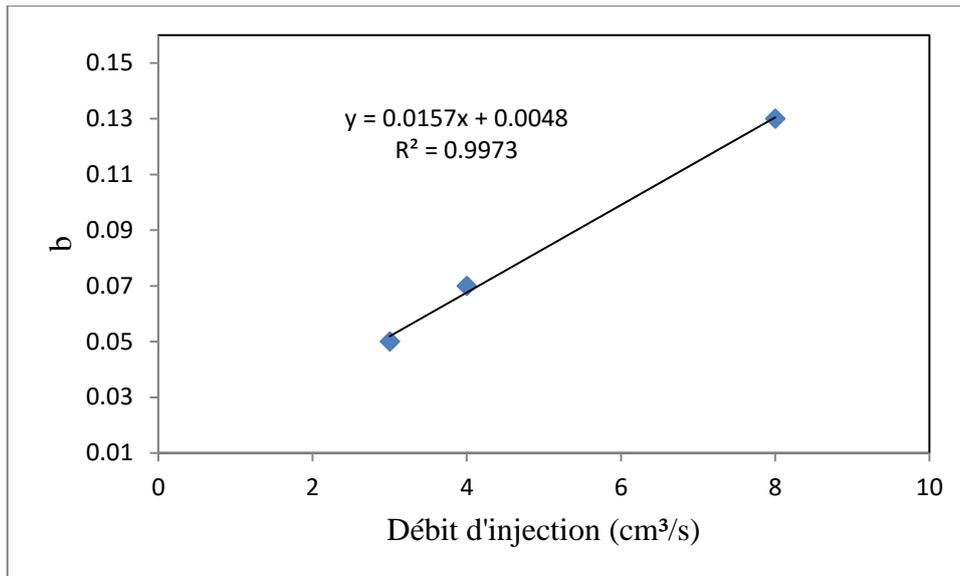
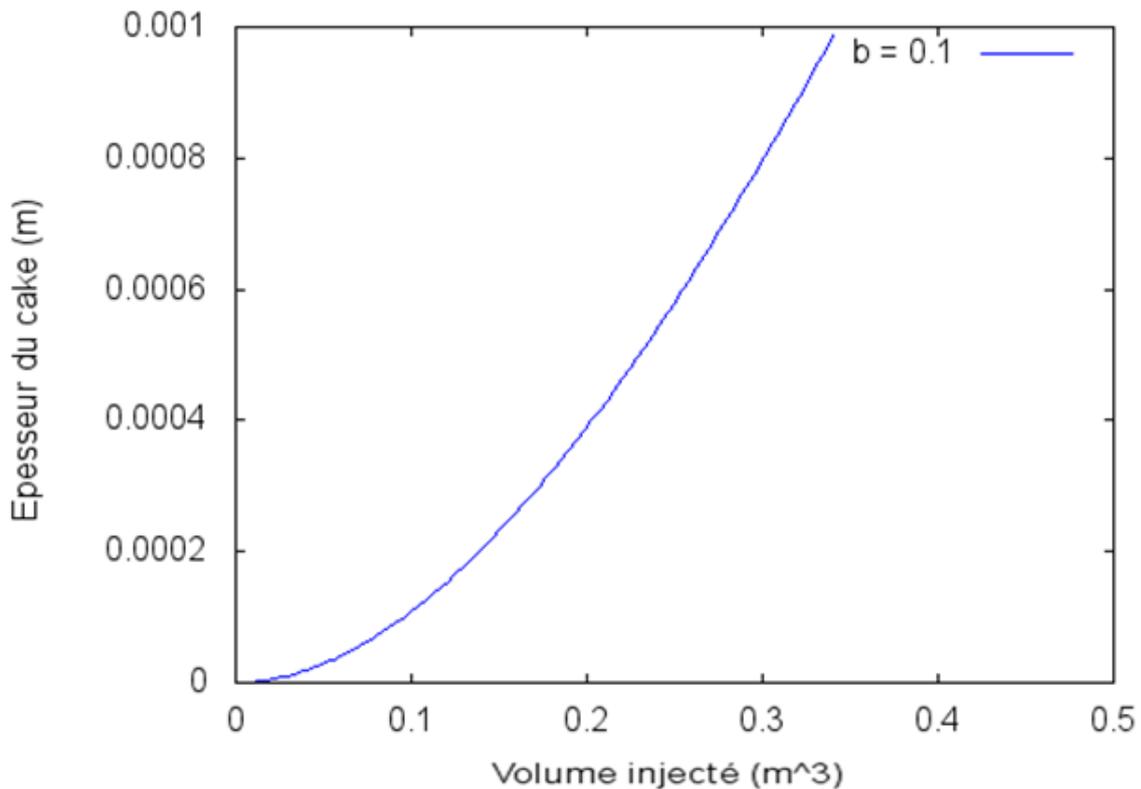
Figure 3-3 – Evaluation du paramètre du modèle b 

Figure 3-4 - Évolution de l'épaisseur du cake externe pendant l'injection

Le modèle permet également de suivre l'évolution de la porosité du milieu au cours de l'injection. La Figure 3-5 présente les profils de porosité dans le milieu pour trois différents volumes injectés pour l'essai réalisé avec un débit de 3 cm³/sec. On observe la diminution progressive de la porosité dans le milieu et une réduction plus significative près du point d'injection sachant que la valeur de porosité initiale du milieu était 0,36.

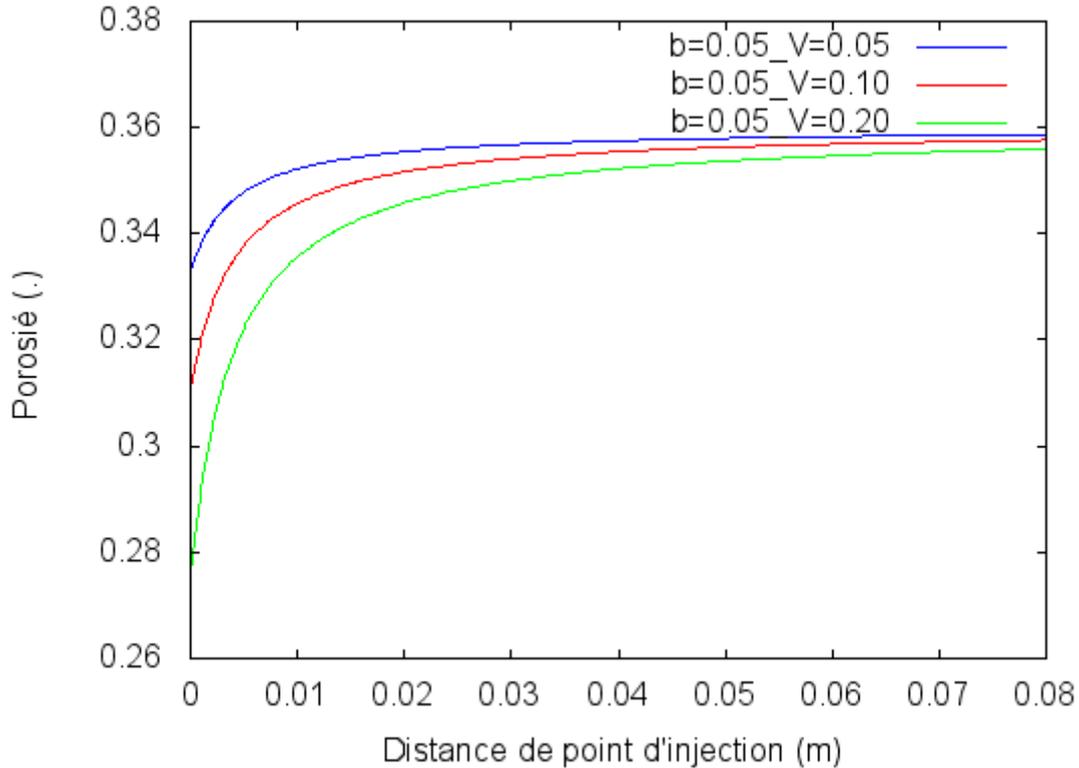


Figure 3-5 – Profil de porosité pour différents volumes injectés V (m^3)

3.4 Validation du modèle

Après cette étape de calage, le modèle proposé est validé en simulant un essai qui n'a pas été utilisé dans la procédure de calage. Pour cela, on choisit un essai d'injection réalisé avec un débit de $7 \text{ cm}^3/\text{s}$. Les résultats présentés sur la Figure 3-3 montrent une augmentation du paramètre b avec le débit d'injection. À l'aide d'une interpolation linéaire, présenté sur la Figure 3-3, on trouve $b = 0,1147$ pour ce débit d'injection. Les autres paramètres sont les mêmes que ceux présentés dans le Tableau 3-1. Le résultat de la simulation est présenté sur la Figure 3-6 et comparé avec le résultat de l'essai. On observe un très bon accord, ce qui montre la validité du modèle proposé.

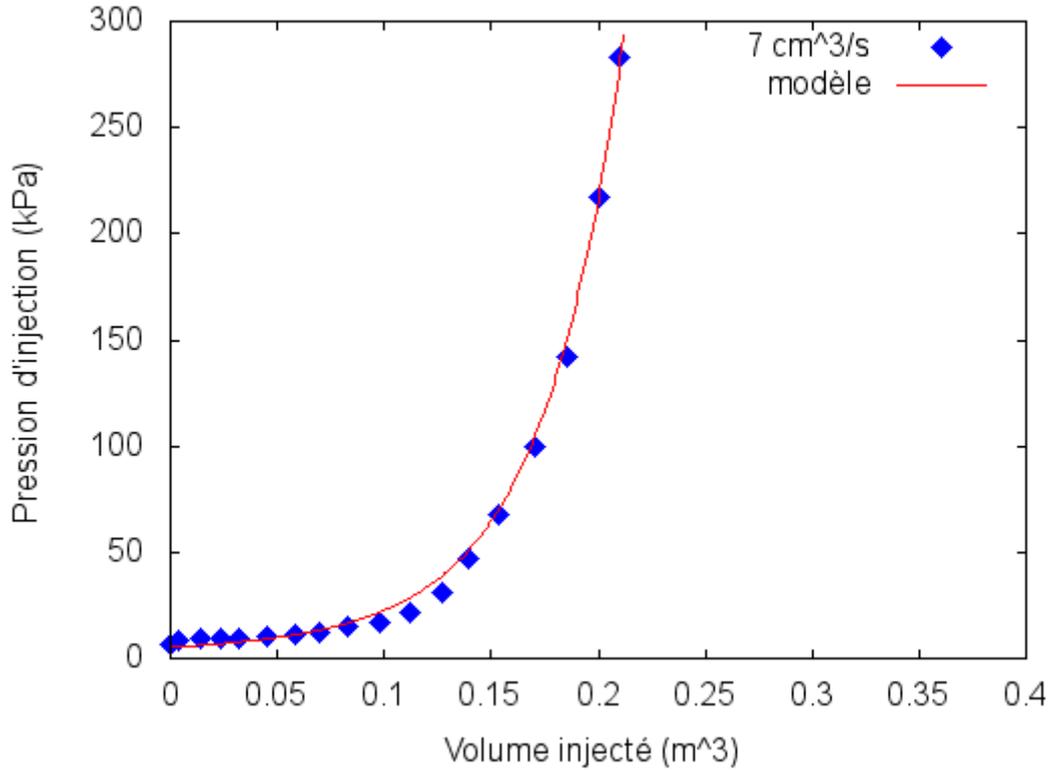


Figure 3-6 – Validation du modèle – simulation d’un essai réalisé avec un débit de 7 cm³/s

3.5 Analyse des essais radiaux

Dans cette partie, nous allons prendre des résultats expérimentaux des essais d’injection radiale, réalisés sur la chambre d’étalonnage avec deux différentes concentrations d’injection (0,5 et 1 g/l), et nous allons appliquer notre modèle dessus. On a le paramètre b qui contrôle la distribution de l’intensité de dépôt et de formation du cake dans le milieu, tandis que le paramètre n contrôle la dépendance de la perméabilité aux variations de la porosité. Les paramètres du modèle sont présentés dans le Tableau 3-7.

Tableau 3-7 - paramètres du modèle axiale

R(m)	r_w (m)	H(m)	ϕ_m	ϕ_c	k_m (m/s)	C' (gr/gr)	ρ_l (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)
0.26	0.03	0.40	0,36	0,2	9×10^{-12}	10^{-3}	1000	2700

Les résultats de la simulation en termes de pression d’injection sont présentés sur la Figure 3-8 et comparés aux résultats expérimentaux radiaux. On observe que les valeurs évaluées du paramètre b augmentent avec l’augmentation de la concentration.

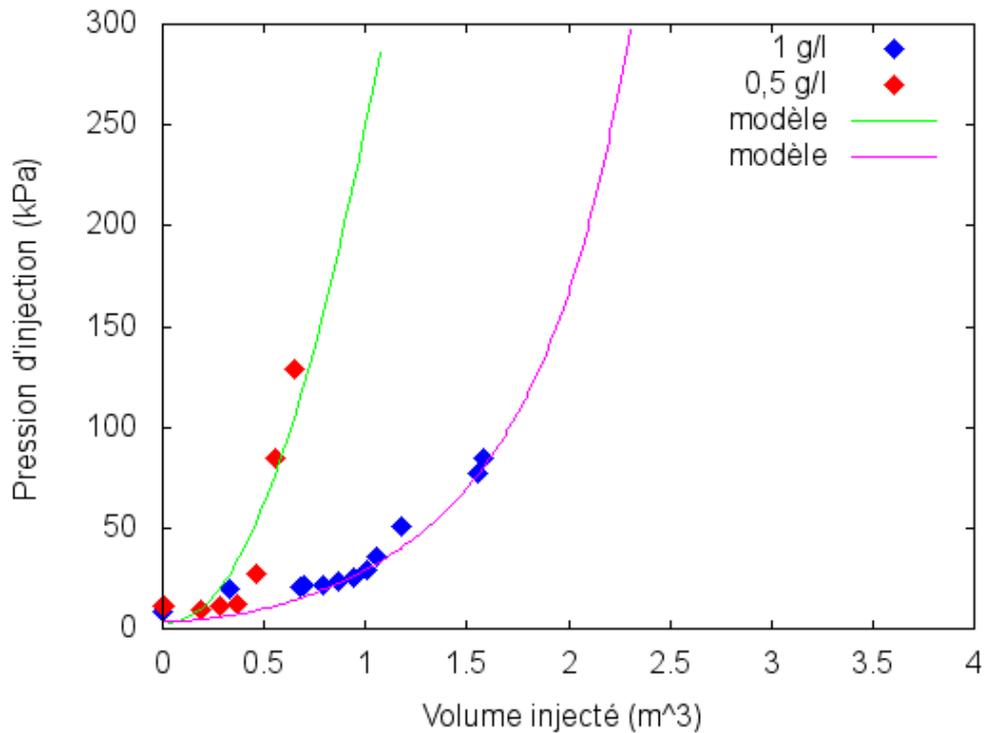


Figure 3-8-Simulation des essais avec le nouveau modèle du cake interne et du cake externe

La Figure 3-9 présente les profils de porosité dans le milieu pour trois différentes valeurs de b . On observe les mêmes résultats du profil de porosité axial. On voit que la diminution progressive de la porosité dans le milieu et une réduction plus significative près du point d'injection.

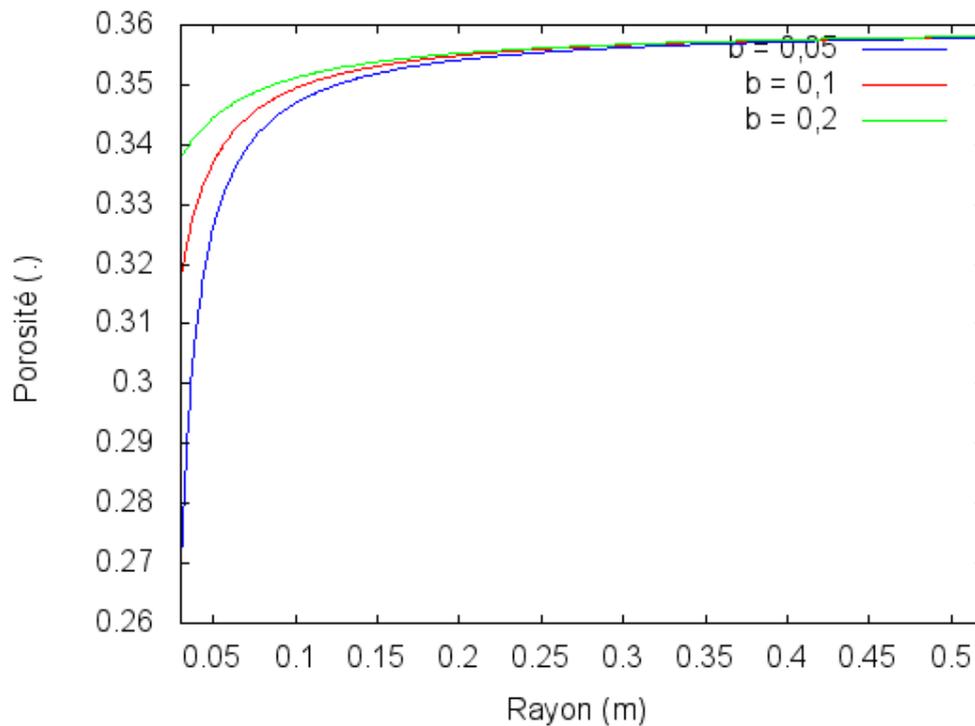


Figure 3-9 – Profil de porosité pour différentes valeurs de b

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pris notre modèle semi analytique simple et nous avons calé ce modèle sur des résultats expérimentaux axiaux et radiaux. Ce modèle montre une très bonne compatibilité avec les résultats expérimentaux en termes d'évolution de la pression d'injection. Ce modèle permet de prédire de manière simple les changements de perméabilité et de les appliquer directement dans l'ingénierie des gisements en calibrant seulement trois paramètres.

Conclusion générale

Ce travail de fin d'études avait pour objectif d'étudier les phénomènes de transport et de dépôt des particules solides dans les réservoirs pétroliers et plus généralement dans les milieux poreux. Nous avons modifié l'ancien modèle de Feia (2015) en ajoutant l'effet du cake externe. Ce modèle proposé, décrivant le colmatage du milieu, prend en compte à la fois les cakes interne et externe. Le calage du modèle a été réalisé à l'aide des résultats expérimentaux des essais d'injection axiale et radiale trouvés dans la littérature. Ce modèle montre une très bonne compatibilité avec les résultats expérimentaux en termes d'évolution de la pression d'injection axiale et radiale. Ce modèle a été vérifié en utilisant un essai qui n'a pas été pas utilisé dans la procédure de calage. Ce modèle permet une prévision de l'évolution de la perméabilité de façon plus simple et directement applicable dans l'ingénierie des réservoirs.

Liste des symboles

Grandeurs	Dimensions	Définitions
A	L^2	Surface du milieu poreux
C	$M.L^{-3}$	Concentration volumique en particules injectées
C'	$M.M^{-1}$	Concentration massique en particules injectées
C_{kc}	-	Coefficient de Kozeny Carman
d_{50g}	L	Diamètre moyen de grains du milieu
d_p	L	Diamètre moyen de particules injectées
D_p	L	Diamètre moyen d'accès aux pores de milieu
e	L	Epaisseur de cake
f	-	Distribution spatiale de particules déposées
H	L	Hauteur de l'éprouvette
J	M/T	Débit massique de particules injectées
k_c	$L.T^{-1}$	Perméabilité du cake
k_f	$L.T^{-1}$	Perméabilité du milieu
k_m	$L.T^{-1}$	Perméabilité initiale du milieu
L	L	Longueur du milieu poreux
m	$M.L^{-7}$	Pente de la deuxième partie de la courbe de pression
P	$M.L^{-1}.T^{-2}$	Pression d'injection
Q	$L^3.T^{-1}$	Débit d'injection
S	L^{-1}	Surface spécifique
u	$L.T^{-1}$	Vitesse moyenne de l'écoulement
V	L^3	Volume du fluide injecté
V_C	L^3	Volume de la structure formée par les particules
$V_{\phi m}$	L^3	Volume de l'espace poreux
ρ_s	$M.L^{-3}$	Masse volumique des particules
ρ_l	$M.L^{-3}$	Masse volumique du fluide
ϕ_c	-	Porosité du cake
ϕ_m	-	Porosité du milieu poreux
a et b et n	-	Paramètres du modèle
μ	$M.L^{-1}.T^{-1}$	Viscosité du fluide
σ	$M.L^{-1}.T^{-2}$	Contrainte de confinement
κ_d	T^{-1}	Coefficient de dépôt

κ_r	T-1	Coefficient de relargage
β	L ³ .M-1	
ψ	M.L-3	Concentration de particules déposées

Références bibliographique

1. Ahfir, N.-D., Wang, H.-Q., Benamar, A., Alem, A., Massei, N., & Dupont, J.-P. (2006). Transport and deposition of suspended particles in saturated porous media: hydrodynamic effect. *Hydrogeology Journal*, 15(4), 659–668. doi:10.1007/s10040-006-0131-3.
2. Al-abduwani F., Shirzadi, A., Van den Brock, W., & Currie, P. (2003) Formation Damage vs. Solid Particles Deposition Profile During Laboratory-Simulated Produced-Water Reinjection. *SPE Journal*, 10(2). doi:10.2118/82235-PA
3. Ali, M. A. J. (2007). The Effect of Residual Oil on Deep Bed Filtration and Formation Damage. PhD thesis. Delft University of Technology, Netherlands.
4. Baghdikian, S., Sharma, M. M., & Handy, L. (1989) Flow of Clay Suspension Through Porous Media. *SPE Reservoir Engineering*, 4(2). doi:10.2118/16257-PA
5. Barkman, J. H., & Davidson, D. H. (1972). Measuring Water Quality and Predicting Well Impairment. *Journal of Petroleum Technology*, 24(7). doi:10.2118/3543-PA.
6. Benamar, A., Ahfir, N., Wang, H., & Alem, A. (2007). Particle transport in a saturated porous medium: Pore structure effects. *Comptes Rendus Geosciences*, 339(10), 674–681. doi:10.1016/j.crte.2007.07.012
7. EL Kawafi, A. (2010). Colmatage d'un milieu poreux saturé soumis à un écoulement chargé de particules. L'UNIVERSITE DU HAVRE.
8. Eylander, J. G. R. (1988). Suspended Solids Specifications for Water Injection From Coreflood Tests. *SPE Reservoir Engineering*, 3(4). doi:10.2118/16256-PA.
9. Farajzadeh, R. (2004) Produced Water Re-Injection (PWRI) An Experimental Investigation into Internal Filtration and External Cake Build up. MSc thesis, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.
10. Feia - 2015 - Effet de l'injection d'eau de production sur la perméabilité des réservoirs pétroliers non cimentés
11. Feia et al. - 2015 - Experimental investigation of particle suspension injection and permeability impairment in porous media
12. Feia et al. - 2017 - An Experimental Setup with Radial Injection for Investigation of Transport and Deposition of Suspended Particles in
13. Ghidaglia C. (1994) "Filtration en profondeur de particules". Thèse présentée à l'Université de Paris VI, France. Spécialité : Physique des liquides. 172 pages.
14. Gruesbeck C. and Collins R.E. (1982) Entrainment and deposition of fine particles in porous media. *Soc. Petr. Eng. J.*, Dec. 1982, 847-856.

15. Herzig, J.P., Leclerc D.M., Le Goff P., (1970). Flow of suspension through porous media: Application to deep filtration, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 62, 129 – 157.
16. Ison, C.R., and Ives, K.J. (1969). “Removal mechanisms in deep bed filtration.” *Chem. Eng. Sci.* 20(11), 965-973.
17. Iwasaki (1937). Some notes on sand filtration. *Water Works Assoc*, 29, 1591-1597.
18. Khilar, K.C., et Folger, H.S (1984). “The existence of a critical concentration for particle release.” *J. Colloid Interface Sci.* 101(1), 214-224.
19. Krueger, R.F. (1986). “An overview of formation damage and well productivity in oilfield operations” *J.Petroleum Science and Engineering*: 131-152.
20. Li, Z., & Wong, R.C.K. (2008) Estimation of Suspended Particle Retention Rate and Permeability Damage in Sandstone from Back Analysis of Laboratory Injection Tests. *Proceedings of Canadian International Petroleum Conference. Society of Petroleum Engineers.* doi:10.2118/2008-017.
21. Mcdowell-Boyer, L.M., Hunt, J.R., Sitar. N. (1986) Particle transport through porous media. *Water Resource Research*, 22(13), 1901 – 1921.
22. Moghadasi, J., Müller-Steinhagen, H., 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*, 43(3-4), 163–181.
23. Ochi, J., Detienne, J.-L., & Rivet, P. (2007). Internal Formation Damage Properties and Oil-Deposition Profile Within Reservoirs During PWRI Operations. In *Proceedings of European Formation Damage Conference. Society of Petroleum Engineers.* doi:10.2118/108010-MS
24. Rege S.D., Fogler H.S. (1988) "A network model for deep bed filtration of solid particles and emulsion drops". *AIChE journal*. Vol. 34, No. 11, pp. 1761-1772.
25. Remize, P.J. (2006) Etude des rétrolavages assistés par l’air et contrôle du colmatage résiduel : Application à la production d’eau potable en filtration frontale. Thèse de doctorat. 388 pages.
26. Ryan, J.N., et Elimelech, M. (1996). « Colloid mobilization and transport in groundwater, » *Colloid Surf. AZ* 107, 1-56.
27. Sharma, M. M., & Yortsos, Y. C. (1987). Fines migration in porous media. *AIChE Journal*, 33(10), 1654–1662. doi:10.1002/aic.690331009.
28. Sharma, M.M., Pang, S., Wennberg, K., Morgenthaler, L., (1997) Injectivity Decline in Water Injection Wells: An Offshore Gulf of Mexico Case Study, in: *Proceedings of*

- SPE European Formation Damage Conference, The Hague, Netherlands, Society of Petroleum Engineers, 6–13.
29. Tien, C. and Payatakes, A., (1979) Advances in deep filtration. *Aiche Journal*, 25, (5), 737-759.
30. Valdes, J., & Santamarina, J. (2006). Particle Clogging in Radial Flow: Microscale Mechanisms. *SPE Journal*, 11(2), 193–198. doi:10.2118/88819-PA.
31. Wang, H., Lacroix, M., Masséi, N., & Dupont, J.-P. (2000). Transport des particules en milieu poreux : détermination des paramètres hydrodispersifs et du coefficient de dépôt. *Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 331(2), 97–104. doi:10.1016/S1251-8050(00)01388-4.
32. Wong, R.C.K., & Mettananda, D.C.a. (2009) Permeability Reduction in Qishn Sandstone Specimens due to Particle Suspension Injection. *Transport in Porous Media*, 81(1), 105–122.
33. Zamani, A., & Maini, B. (2009). Flow of dispersed particles through porous media Deep bed filtration. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 69(1-2), 71–88. doi:10.1016/j.petrol.2009.06.016