

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Minier

Mémoire pour l'obtention du diplôme
Master

**Etude de la variation de l'épaisseur de cake en fonction
de ses paramètres physiques lors de la circulation d'un
fluide forage bi-phasique**

Aboubaker ABDELAZIZ

Sous la direction de **Mr : Rezki AKKAL**

Présenté est soutenu le (03/07/2016)

Composition du Jury :

Président Mr :	L.CHANANE	MAA	ENP
Promoteur Mr :	R.AKKAL	MCA	ENP
Examinatrice Mme :	A.MERCHICHI	MAA	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Minier

Mémoire pour l'obtention du diplôme
Master

**Etude de la variation de l'épaisseur de cake en fonction
de ses paramètres physiques lors de la circulation d'un
fluide forage bi-phasique**

Aboubaker ABDELAZIZ

Sous la direction de **Mr : Rezki AKKAL**

Présenté est soutenu le (03/07/2016)

Composition du Jury :

Président Mr :	L.CHANANE	MAA	ENP
Promoteur Mr :	R.AKKAL	MCA	ENP
Examinatrice Mme :	A.MERCHICHI	MAA	ENP

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à La plus chère personne de ma vie «Ma Mère » pour son amour, soutien, encouragement, et sacrifices sans laquelle je n'aurais pas pu arriver à ce stade.

A mon Père, mes frères et sœurs et toutes les familles :

« ABDELAZIZ » et « LOUNIS »

A ma très chère tante Aicha, son mari "Kamel" et Leurs Enfants

Doua, Yassin et Sifou .

*A mes amis intimes **Souhil** et **Aymen** pour leurs soutiens et toute l'amitié depuis nos classes primaires et parce que nos plus belles conneries deviennent nos plus beaux souvenirs....*

A ma très chère amie Meriem qu'à était comme une étoile, pas toujours visible mais toujours Présent.

Au cercle fermé de mes amis de l'ENP : Midou, Raouf, Khirou, Mls, Roki, Anouar , P'ti et Hadj pour les bons moments qu'on a passé ensemble.

A tous ceux qui m'ont aidé à devenir ce que je suis.

« Tout le monde entend ce que tu dis. Tes amis écoutent ce que tu dis.

Tes meilleurs amis découvrent ce que tu ne dis pas. »

Boka

Remerciement

Je voudrais avant d'entamer la présentation de ce mémoire remercier DIEU tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage d'établir ce travail.

Nous dressons nos plus vifs remerciements à notre promoteur

***Dr. Rezki AKKAL** pour avoir dirigé ce travail, nous le remercions également, pour son aide effective et dont les conseils nous ont été très précieux.*

Je remercie très particulièrement Mr. Mohamed Khodja, Directeur de recherche pour son aide précieuse lors de l'étude expérimentale de notre travail, ainsi que toute l'équipe du Centre de Recherche et Développement Boumerdes (C.R.D.B).

*Nous remercions Mr. **L.Channane**, qui nous a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.*

*Nous tenons également à remercier Mme. **A.Merchichi** qui nous a honorée en acceptant d'examiner notre travail.*

Nous remercions tous les enseignants de département Génie Minier, ainsi que tous ceux de l'Ecole Nationale Polytechnique. Finalement, nos vifs remerciements vont à nos familles, nos amis, pour leurs soutiens et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à nos formations, depuis le cycle primaire.

المخلص

الهدف من عملنا هو دراسة تأثير التغير في المعايير مثل: نفاذية cake "كيك" مسامية cake معدل ترسب وكثافة الجسيمات على سمك cake. وذلك أثناء جريان سائل الحفر. على أساس نموذج رياضي يحاكي تدفق من السوائل على مرحلتين حول بئر نفطية.

وأظهرت النتائج أن سمك cake هو بدلالة خصائصه الفيزيائية (النفاذية والمسامية) كثافة الجسيمات ومعدل الترسيب. كلمة مفتاحية: حفر، آبار النفط، حفر السوائل، سمك الكيك cake، محاكاة، والكثافة، المسامية، تضرر البنية. سرعة الترسيب.

Abstract

The aim of our work is to study the effect of varying parameters such as the cake permeability, cake porosity, deposition rate and density of the particles during the drilling fluid circulation on the thickness of cake .Based on a mathematical model that simulates the flows of a fluid di-phasing around the oil well.

The results show that the cake thickness is a function of its properties Physical (its permeability and porosity) particles density and deposition rate.

Keyword: Drilling oil wells, drilling fluid, cake thickness, permeability, Damage formation, simulation, density, porosity, Speed of depot.

Résumé

Le but de notre travail est d'étudier l'effet de la variation des paramètres tels que la Perméabilités du cake , Porosité du cake vitesse du dépôt et densité des particules lors de la circulation du fluide de forage sur l'épaisseur de cake .En se basant sur un modèle mathématique qui simule l'écoulement d'un fluide bi-phasique autour d'un puits pétrolier.

Les résultats montrent que l'épaisseur de cake est une fonction de ses propriétés Physiques (sa Perméabilité et Porosité) densité des particules et leurs vitesse de dépôt.

Mot clé : Forage, puits pétrolier, Fluide de forage, Epaisseur de cake, Perméabilité, Endommagement de la formation, simulation, Densité, Porosité, Vitesse du dépôt

Nomenclature

Symboles généraux

K_i	Perméabilité initiale [m ²]	ϕ_c	Porosité du cake []
K_f	Perméabilité finale [m ²]	ϕ_f	Porosité de la boue [-]
k_c	Perméabilité du cake [m ²]	S_{or}	Saturation résiduelle en huile []
k_e	Taux d'érosion [-]	S_{wr}	Saturation résiduelle en eau []
k_d	Taux de déposition du cake [-]		
h	Epaisseur de la couche [m]		
ΔP	Pression différentielle [Pa]		
K_{air}	Perméabilité à l'air [m ²]		
r_w	Rayon du puits [m]		
r_e	Rayon d'invasion [m]		
h	Epaisseur de la couche [m]		
c_p	Volume du fluide [m ³]		
$\tau_c r$	Contrainte de cisaillement [Kg/ms ²]		
τ_c	Facteur de tortuosité du cake []		
τ_f	Facteur de tortuosité de la boue []		
ρ	Densité de filtrat [kg/m ³]		
ρ_p	Densité des particules [kg/m ³]		
k'	Coefficient de consistance [-]		
n'	Indice d'écoulement []		
μ	Viscosité [Pa.s]		
stv	Vitesse tangentielle [m/s]		
f	Coefficient de diffusion []		
g	Exposant de diffusion []		
c_f	Concentration initiale [kg/m ³]		
ϕ	Porosité de la formation []		

Table des matières

Résumé	
Table des Figures	
Liste des Tableaux	
Nomenclature	
1 Introduction Générale	10
I Partie Théorique	12
1 Généralités sur le forage et Fluides de forage	13
1 Introduction	13
2 Le forage	15
2.1 Définition d'un forage pétrolier	15
3 Les fluides de forage	15
3.1 Définition des fluides de forage	15
3.2 Rôle du fluide de forage	16
3.3 Propriétés des fluides de forage	17
3.3.1 Densité	17
3.3.2 Écoulement	17
3.3.3 Paramètres rhéologique	18
2 Endommagement de la formation	20
1 Introduction	20
2 Endommagement de la formation réservoir par les boues de forage	20
3 L'endommagement de la formation pendant le forage	21
4 Les mécanismes de l'endommagement	21
4.1 Mécanismes d'endommagement mécanique	22
4.2 Mécanismes d'endommagement chimiques	22
5 Evaluation de l'endommagement	22
5.1 Formation du cake	23
6 Mécanisme de formation de cake	24
6.1 Les facteurs (paramètres) influent la formation de cake	25
II Partie Expérimentale	27
3 Modelé mathématique et Simulation Numérique	28
1 Introduction	28

2	Modélisations de l'endommagement	29
3	Validations de Notre modèle mathématique par la simulation	30
4	Résultats et interprétations	31
1	Les fluides de forage et les échantillons utilisés	31
2	La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la densité des Particules	31
3	La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la porosité du cake ϕ_c .	32
4	La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la Vitesse (V) du dépôt des particules	34
5	La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la perméabilité du cake K_c	35
6	Conclusion	37
5	Conclusion générale	38
	Références bibliographiques	39
	Annexe A	41

Table des figures

1.1	Différentes phases pour l'extraction et l'acheminement des hydrocarbures	14
1.2	Schéma de circulation de la boue sur le site de forage (Schlumberger, 1997)	16
1.3	Schéma des régimes d'écoulement laminaire et turbulent	18
1.4	FANN35	19
2.1	Schéma du formation d'un cake imperméable	23
2.2	Localisation des Endommagements.	24
2.3	la formation du cake [[11]]	25
3.1	Projection de la simulation sur la pratique	30
4.1	La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la densité des Particules	32
4.2	La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la porosité du cake ϕ_c	33
4.3	a) cake poreux et perméable b) moins perméable et moins poreux [11] .	34
4.4	La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la Vitesse du dépôt (V)	35
4.5	La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la perméabilité du cake K_c	36
4.6	schéma représentatif de l'écoulement et de la formation d'un cake dans un forage horizontal	37

Liste des tableaux

1.1	Densités des composants communs de la boue	17
3.1	Données des paramètres utilisées lors de la simulation	29
4.1	la densité des Particules des Fluides de forages utilisés	31
4.2	la porosité du cake ϕ_c	33
4.3	la Vitesse du dépôt (V)	34
4.4	Les valeurs de la perméabilité du cake K_c utilisées dans la simulation de l'épaisseur de cake	36

Introduction Générale

Lors des forages pétroliers, la traversée des formations argileuses n'est pas une opération facile étant donné les problèmes qui se posent à l'endommagement de la formation réservoir, et dont la résolution est étroitement liée à la compréhension des interactions fluide de forage-Formation réservoir.

Lors de la circulation du fluide de forage à travers la roche réservoir, il y aura une formation d'un cake sur les parois d'un puits pétrolier. L'ampleur de ce cake dépend étroitement des propriétés rhéologiques de ce fluide de forage, les conditions in-situ de température et de pression du gisement, des propriétés de la roche elle-même (porosité et perméabilité) et également les propriétés du cake lui-même telles que la perméabilité du cake, sa porosité, la densité des particules formant ce cake et la vitesse de déposition de ces particules sur les parois de puits.

Le contrôle donc de ces paramètres va donc jouer un rôle primordial dans la technique des fluides de forage. Toute variation importante de ces caractéristiques va influencer négativement sur la composition du fluide de forage et de ces propriétés, sur le cake et ses propriétés et par la suite sur l'endommagement de la formation.

Notre objectif est d'étudier à travers la variation d'épaisseur du cake en fonction de ses paramètres physiques.

Dans le premier chapitre 1, Une Présentation de quelques définitions relatives aux forages et fluides de forages utilisées par les pétroliers au sujet du forage et des fluides de forage. Les différentes méthodes de forage .Types et paramètres de fluide des forage (Perméabilité, viscosité ... etc), Rôles du fluide de forage.la formation du cake... etc.

Dans un deuxième chapitre 2, l'impact des fluides de forage à travers avec l'étude des processus d'endommagement des roches réservoirs et la formation du cake .Présentation des différents mécanismes propres à tous les paramètres .

Le chapitre 3, est consacré au modèle mathématique et la simulation Numérique des différentes études . D'où l'introduction de notre modèle mathématique déjà validée dans notre Projet fin d'étude Soutenu précédemment sur « Impact sur l'invasion du fluide bi-phasique sur la formation réservoir » et nous avons investiguée l'influence des différents paramètres physiques du cake formé lors de la circulation du fluide de forage à travers la roche réservoir sur la formation du cake lui même et par la suite sur l'endommagement. Ces paramètres physiques sont représentés par la densité et la vitesse du dépôt des particules formant le cake, sa porosité et sa perméabilité.

Dans le quatrième chapitre, nous allons introduire les résultats de la simulation de notre modèle mathématique avec le programmes de simulation Matlab,- après une série des tests -, et les interpréter pour tirer une conclusion sur la variation de l'épaisseur de cake en fonction de ses paramètres physiques tels que (la perméabilité et la Porosité du cake), densité des particules et la vitesse de dépôt.

Par ailleurs, **L'ANNEXE A (5)** donne le principe des méthodes mathématiques de modélisations, Il comprend aussi les détails du modèle utilisé pour la prédiction de l'épaisseur de cake ainsi que le Programme Matlab.

Partie Théorique

Chapitre 1

Généralités sur le forage et Fluides de forage

1 Introduction

L'exploration pétrolière ou gazière, que se soit en mer (offshore) ou sur terre (onshore), elle nécessite un processus de forage adéquat afin d'atteindre les réservoirs d'hydrocarbures et extraire la matière.

L'acheminement des hydrocarbures impose de connecter leurs réservoirs à la surface à l'aide des canaux reliés à des systèmes de pompage. La production des hydrocarbures passe par le fonctionnement d'un processus de forage dont le plus répandu dans l'industrie pétrolière est le forage rotary (rotatif).

La progression du forage requiert la circulation continue et en boucle fermée d'un fluide dont l'un des objectifs consiste à évacuer les déblais générés vers la surface. La nécessité de rechercher des gisements d'hydrocarbures dans des milieux de plus en plus profonds conduit à forer des puits qui s'étalent sur plusieurs kilomètres. Cela rend graduel le forage durant lequel plusieurs phases, séparées par la remontée à la surface de la garniture, sont nécessaires. Ces étapes ont pour but de favoriser la maintenance du processus et d'effectuer le tubage et la cimentation de la partie forée. Lorsque les poches contenant les hydrocarbures sont atteintes, les oléoducs ou les gazoducs sont installés afin d'acheminer le pétrole ou le gaz vers la surface.[1]

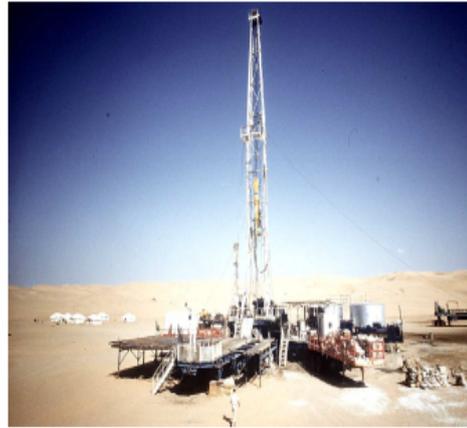
*Installation offshore**Installation onshore**Transport par pipeline**Système de pompage*

Figure 1.1: Différentes phases pour l'extraction et l'acheminement des hydrocarbures

La réussite d'un puits de pétrole et de son coût dépend largement des propriétés du fluide de forage. Le coût du fluide de forage lui-même est relativement faible, mais le choix du fluide adéquat et l'entretien de ses propriétés lors d'un forage profond influent sur les coûts totaux du puits. Par exemple, le nombre de jours de forage requis pour forer la totalité de la profondeur dépend du taux de pénétration de l'outil, et de la prévention des retards qui est due à la perte de la circulation, tube de forage coincé, ...etc. qui sont tous influencés par les propriétés du fluide de forage. En outre, le fluide de forage influe sur l'évaluation de la formation et de la productivité du puits.

Il en résulte que le choix d'un fluide de forage approprié et le contrôle quotidien de ses propriétés sont la préoccupation non seulement de l'ingénieur de la boue, mais aussi du superviseur de forage, l'ingénieur de forage et l'ingénieur de production. Le personnel de forage et de production n'a pas besoin d'une connaissance détaillée des fluides de forage, mais ils doivent comprendre les principes de base régissant leur comportement, et la relation de ces principes au forage et à la performance de production. [2]

2 Le forage

On appelle forage l'ensemble des opérations permettant le creusement de trous généralement verticaux. L'utilisation principale des forages est la reconnaissance et l'exploitation des gisements de pétrole ou de gaz naturel. Les autres utilisations, qui sont nombreuses, [3] comprennent notamment :

- les forages géologiques ou géophysiques pour la reconnaissance des gisements de minerais.
- les forages destinés à la recherche des nappes d'eau profondes, au drainage du gaz ou de l'eau dans les exploitations minières.
- les forages permettant l'injection de gaz dans des formations poreuses et perméables, pour réaliser des stockages souterrains.
- Les forages réalisés dans des dômes de sel, agrandis ensuite par injection d'eau douce et permettant le stockage de gaz liquéfiés comme le propane.

2.1 Définition d'un forage pétrolier

On appelle "forage pétrolier", l'ensemble des opérations permettant d'atteindre les roches poreuses et perméables du sous-sol, susceptibles de contenir des hydrocarbures liquides ou gazeux. L'implantation d'un forage pétrolier est décidée à la suite des études géologiques et géophysiques. Ceci nous permet de nous faire une idée de la constitution de sous-sol et des possibilités de gisements, sans pour autant préciser la présence d'hydrocarbures. L'opération de forage peut alors confirmer les hypothèses faites et mettre en évidence la nature des fluides contenus dans les roches. [4]

3 Les fluides de forage

3.1 Définition des fluides de forage

Le fluide de forage, appelé aussi boue de forage, est un système composé des différents constituants liquides (eau, huile) et/ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, tensioactifs, déblais, ciments, ...) Le fluide de forage a été déjà présenté en 1933 lors du premier Congrès Mondial du Pétrole, où il a fait l'objet de cinq communications [2, 5].

Le premier traité sur les fluides de forage a été publié en 1936 par Evans et Reid. En 1979, l'American Petroleum Institute (API) définit le fluide de forage comme étant un fluide en circulation continue durant toute la durée du forage, aussi bien dans le sondage qu'en

surface.

Le fluide est préparé dans des bacs à boues, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où il remonte dans l'annulaire, chargé des déblais formés au front de taille. A la sortie du puits, il subit différents traitements, tamisage, dilution, ajout de produits, de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physicochimiques à leurs valeurs initiales. Il est ensuite réutilisé.[6] (figure :1.2)

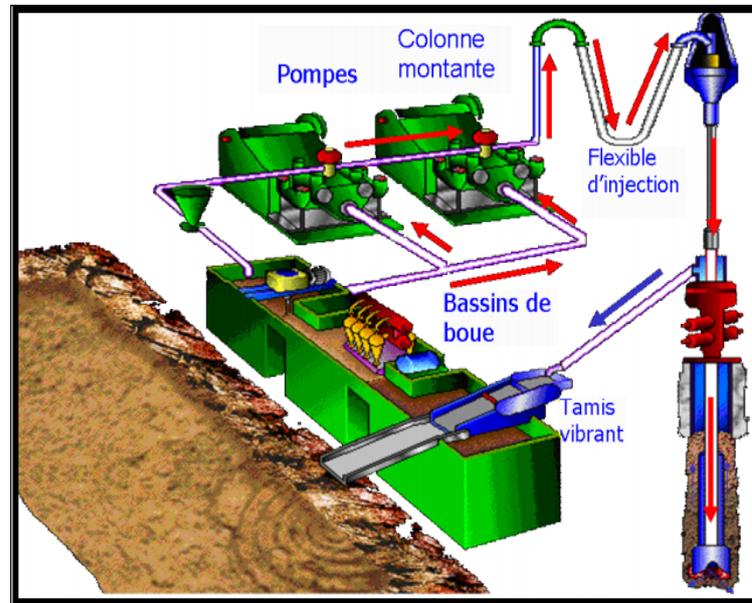


Figure 1.2: Schéma de circulation de la boue sur le site de forage (Schlumberger, 1997)

3.2 Rôle du fluide de forage

De nombreuses exigences sont placées sur le fluide de forage. Historiquement, le premier but du fluide de forage était le nettoyage du puits, mais maintenant les applications diversifiées pour les fluides de forage rendent la tâche de certaines fonctions difficile. Lors du forage rotary, les boues de forage doivent avoir des propriétés leur permettant d'optimiser les fonctions suivantes [2] :

1. Maintien des déblais en suspension.
2. Sédimentation des déblais fins en surface.
3. Prévention du cavage et des resserrments des parois du puits.
4. Dépôt d'un cake imperméable.
5. Prévention des venues d'eau, de gaz, ou d'huile.
6. Entraînement de l'outil.
7. Apport de renseignements sur le sondage.
8. Augmentation de la vitesse d'avancement.
9. Refroidissement et lubrification de l'outil et du train de sonde.

10. Contamination des formations productrices.
11. Corrosion et usure du matériel.
12. Toxicité et sécurité.
13. Diminution du poids apparent du matériel de sondage.

3.3 Propriétés des fluides de forage

Tout comme la formulation des boues, le contrôle et la caractérisation des boues de forage sont réalisées selon des normes précises éditées par l'API (API 13A, 2004). Les tests relatifs à l'étude de leurs caractéristiques sont généralement basés sur quatre paramètres : la densité, l'écoulement, la filtration et les paramètres rhéologiques.[2]

3.3.1 Densité

La densité est définie comme étant le rapport de "le poids par unité de volume" sur la masse volumique d'un corps référence(l'eau, air). La pression exercée par une colonne de boue statique dépend à la fois de la densité et de la profondeur. Les densités de quelques composants de la boue sont données dans le tableau 1.1 :

Substances	gramme/ cm^3	Lb/gal	Lb/ft3	Kg/ m^3
Eau	1.0	8.33	62.4	1000
Huile	0.8	6.66	50	800
Barytine	4.1	34.2	256	4100
Argile	2.5	2.8	156	2500
Sel	2.2	18.3	137	2200

Tableau 1.1: Densités des composants communs de la boue

3.3.2 Écoulement

Les propriétés de l'écoulement de la boue de forage jouent un rôle majeur dans la réussite du forage. Ces propriétés sont principalement les responsables du déplacement des déblais de forage.

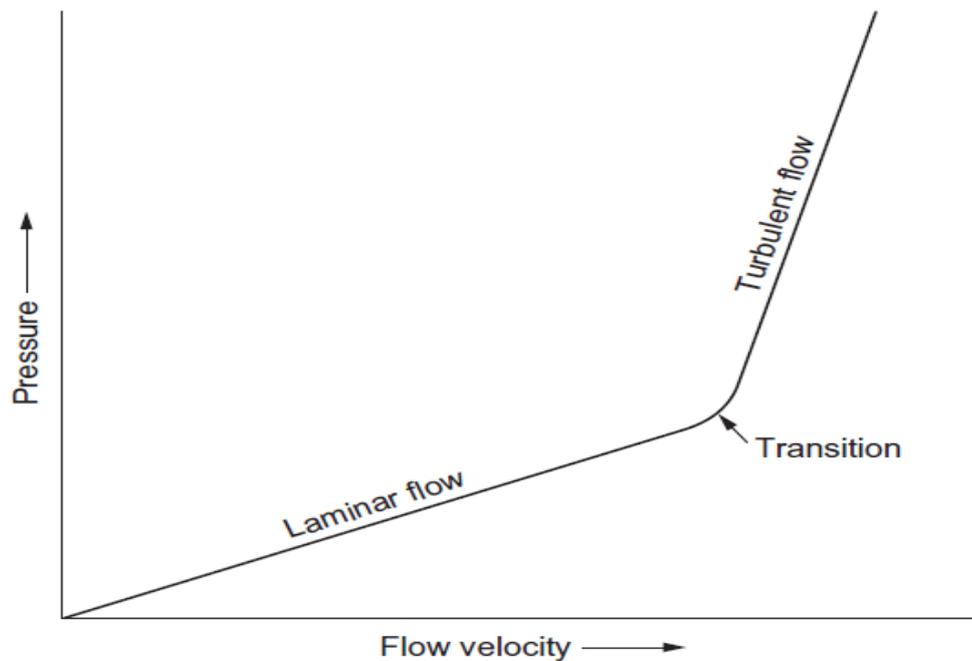


Figure 1.3: Schéma des régimes d'écoulement laminaire et turbulent

Mais aussi influent sur le progrès de forage dans de nombreuses autres façons. Par exemple, une performance insuffisante peut conduire à des problèmes aussi graves que le comblement du trou avec des déblais de forage, la réduction du taux de pénétration, l'élargissement du trou, le coinçage des tiges, la perte de la circulation, et même une éruption.

Le comportement de l'écoulement des fluides est régi par des régimes d'écoulements et la relation entre la pression et la vitesse.

Il existe deux régimes d'écoulement, à savoir l'écoulement laminaire, qui prévaut à faibles vitesses d'écoulement et est fonction des propriétés de viscosité du fluide, et un écoulement turbulent, qui est régi par les propriétés d'inertie du fluide et est indirectement influencé par la viscosité. Comme il est représenté sur la figure 1.3, la vitesse d'écoulement augmente avec la pression, elle augmente beaucoup plus rapidement lorsque l'écoulement est turbulent que lorsqu'il est laminaire.

3.3.3 Paramètres rhéologique

Le terme " rhéologie " signifie l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière. Cette définition a été acceptée lorsque la société américaine de rhéologie a été fondée en 1929 . Elle est apparue pour palier l'impuissance de la théorie de l'élasticité et de la mécanique des fluides à décrire les propriétés de matériaux intermédiaires entre solide et liquide. [7]. Le comportement rhéologique des boues de forage est un facteur capital pour savoir par quelle loi rhéologique cette boue est régie. Les caractéristiques les

plus recherchées par l'étude rhéologique sont :

3.3.3.1 La viscosité plastique (VP) Principalement, elle dépend de la teneur en solides contenus dans la boue, c-à-d. l'augmentation de viscosité plastique ne pourra être combattue que par l'élimination des solides. Par ailleurs, elle est liée aussi à la taille des particules, et à leur forme.[2]

$$VP = \frac{L_{600}}{2} \quad (cp) \quad (1.1)$$

$$VP = L_{600} - L_{300} \quad (cp) \quad (1.2)$$

L600 et L300 sont les lectures respectives à 600 rpm et 300 rpm sur le rhéomètre FANN35.(Fig :1.4)



Figure 1.4: FANN35

3.3.3.2 La contrainte seuil ou "Yield Value"(YP)(Point de rendement) La contrainte seuil, plus connue sous le nom de Yield value ou Yield point, est la mesure dynamique de résistance initiale à franchir pour que le fluide s'écoule. Cette résistance est due aux forces électrostatiques attractives localisées sur ou près de la surface de particules. La contrainte seuil dépend des types des solides présents, de leurs charges de surface respectives, de la concentration de ces solides, du type et la concentration des autres ions ou des sels qui peuvent être présents.[2]

$$YP = L_{300} - VP \quad (lb/100ft^2) \quad (1.3)$$

Chapitre 2

Endommagement de la formation

1 Introduction

En contact avec des formations poreuses et perméables, l'infiltration du fluide de forage à travers le fond et les parois de puits peut avoir plusieurs conséquences. Le plus important c'est l'endommagement de la formation réservoir, Il s'agit d'un problème qui peut survenir durant les différentes phases de l'exploitation d'un gisement de pétrole ou de gaz, allant du forage jusqu'à la production. L'endommagement de la couche réservoir est défini comme étant la réduction de la perméabilité et son impact sur la réduction de la capacité de production du puits. [8]

2 Endommagement de la formation réservoir par les boues de forage

Les puits du pétrole et du gaz sont exploités et forés en utilisant des fluides de forage à base d'huile, eau ou gaz. L'introduction des solides et des polymères de la boue à la fois dans la formation, interfèrent avec les fluides qui saturent les pores. La réaction entre les particules fines de la formation et la saumure du réservoir avec le filtrat du fluide a un grand effet sur l'endommagement de la formation réservoir.[8]

La formation peut être endommagée de différentes façons :

Physiquement

- L'invasion des solides de la boue bloquant les canaux des pores.
- Le rétrécissement des capillaires dû à l'adsorption des polymères envahis.
- Waterblock, émulsion bloc et de gaz bloc.

Chimiquement

la formation peut être endommagée par : [9]

- La réaction entre le filtrat et le contenu des pores et/ou de la matrice.
- Le gonflement ou la dispersion des argiles.
- La précipitation par réaction entre le filtrat de la boue et le contenu des pores ainsi que la solution de sels et les minéraux de la matrice.

Bactéries

La formation peut être endommagée par des colonies de bactéries et de leurs précipités, bloquant ainsi les canaux des pores.

3 L'endommagement de la formation pendant le forage

Par l'invasion des solides et des particules de boue : [9]

- Bouchage des pores
- Mouvement des particules
- Invasion de filtrat de boue
- Gonflement, floculation, la dispersion et la migration d'argile.
- Les effets d'interaction fluide-fluide aboutissant à la formation d'émulsion eau /bourbier , ou l'échelle biologique
- Modification de la structure des pores de la roche réservoir par action du forage.

4 Les mécanismes de l'endommagement

L'endommagement est causé par différents phénomènes à savoir :

- Effets mécaniques : tels que la mobilité des fines, invasion des solides, formations émulsion-nées, etc...
- Effets chimiques : gonflement des argiles, défloculation des argiles, précipitation des solides, boues acidifiants, adsorption chimique, l'altération de la mobilité de l'outil de forage .

4.1 Mécanismes d'endommagement mécanique

Les mécanismes d'endommagement mécanique sont directs sans interactions chimiques entre les équipements et le fluide utilisé pour achever les travaux de forage, de complétion ou de stimulation d'un forage. Parmi ces effets on peut citer :

- Migration des fines
- Entraînement des solides externes
- Problèmes de piégeage et de blockage
- Glazing/Mashing
- Contraintes géo-mécaniques

4.2 Mécanismes d'endommagement chimiques

Cet endommagement est lié soit à l'interaction entre les fluides externes et la formation, soit à l'interaction entre les fluides de la formation et ceux externes. Parmi ces effets, on peut citer :

- Gonflement des argiles
- Dispersion des argiles
- Adsorption chimique
- Dissolution de la formation
- Formation d'émulsions
- Altération de la mouillabilité

5 Evaluation de l'endommagement

L'endommagement de la formation peut être évité par une bonne compréhension des conditions de forage en ayant des informations sur les données du champ, en prenant et en analysant des échantillons de fluide de forage et des carottes et en effectuant des mesures des propriétés suivantes :

- Mouillabilité ;
- Pression capillaire ;
- Saturation en fluides irréductible ;
- Perméabilité relative ;
- Composition de la formation et en particulier la teneur en argile ;
- Distribution et taille des pores ;
- Invasion de fluides (tests sur la perméabilité retournée) ;
- Tests de filtration ...

5.1 Formation du cake

La filtration dans les formations perméables d'une partie de la phase liquide de la boue crée un film sur les parois du sondage, ce film est appelé cake.

Le dépôt du cake permet de consolider et réduire la perméabilité des parois du puits .

La composition, l'épaisseur et la perméabilité du mud cake dépendent surtout de la nature de la boue. L'épaisseur du mud cake varie en général entre (3 mm à 2.54 cm).

Ce mud cake a une perméabilité faible et c'est lui qui conditionne en partie la filtration, petit à petit la filtration va diminuer puis stopper. 2.1

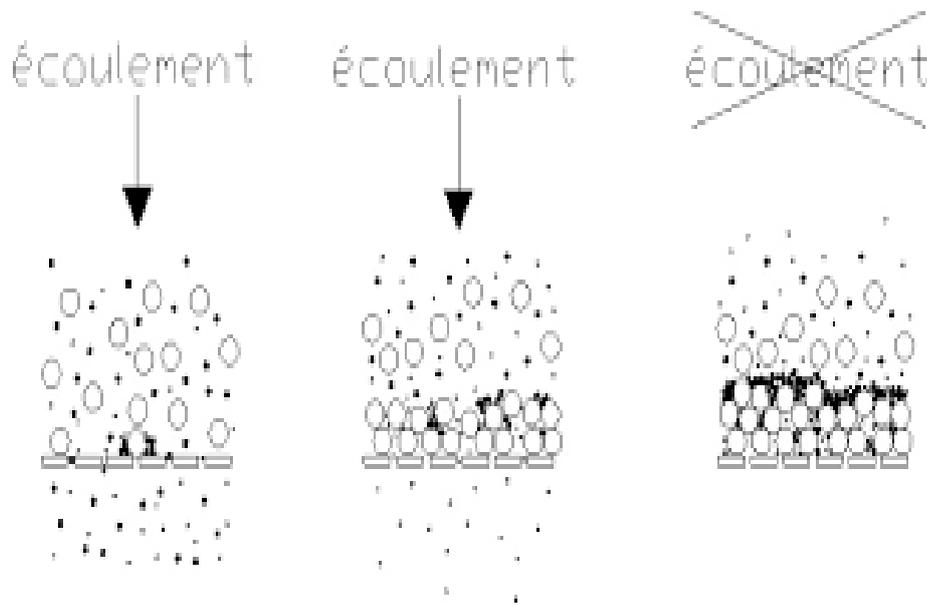


Figure 2.1: Schéma du formation d'un cake imperméable

Aux abords du puits :

Cake externe : (zone 1 [2.2]) Le cake externe est formé de particules solides minérales ou organiques déposées lors du forage sur la paroi du trou (pour consolider les parois du puits et réduire l'infiltration de la boue dans la formation).

Son élimination se fait mécaniquement par grattage ou chimiquement par lavage aux solvants ou aux acides.

Le cake interne (zone 2 [2.2]) : Le cake interne est constitué par de fines particules solides provenant de la boue, du ciment et des fluides de complétions, se localise dans une très mince couronne aux abords immédiats du puits et bloque les pores, rendant le milieu peu perméable.

La zone envahie (zone 3 [2.2]) : Au-delà du cake interne se trouve la zone envahie par les filtrats de la boue et du ciment, qui vont modifier l'environnement naturel du milieu poreux. [10]

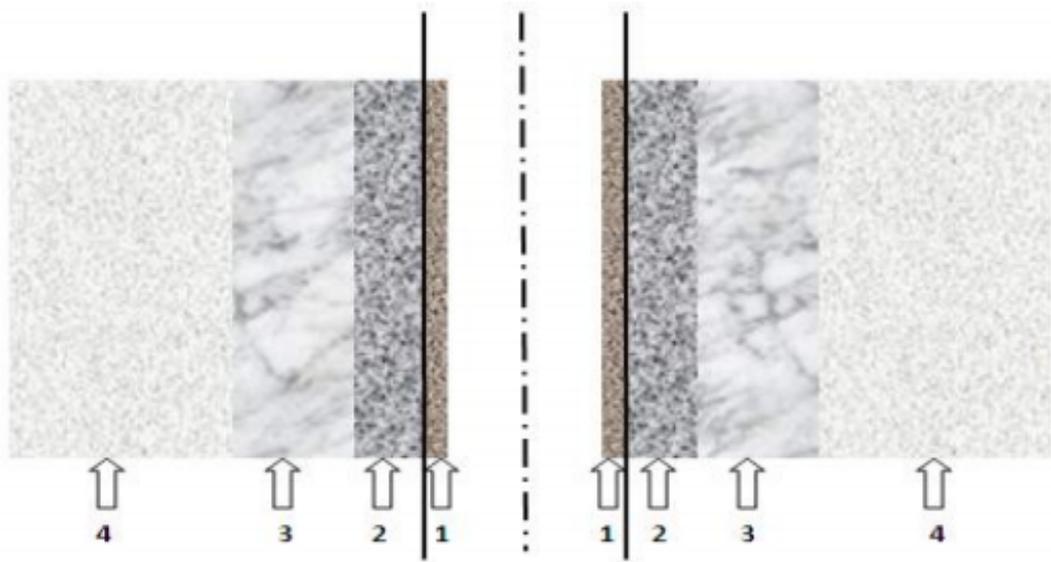


Figure 2.2: Localisation des Endommagements.

6 Mécanisme de formation de cake

Ce mécanisme intervient quand la dimension des particules mobilisées est beaucoup plus grande que celle des pores .les particules s'accablent alors pour former un cake, Ce mécanisme de capture est associé à une diminution de la perméabilité de la formation réservoir.

Les particules mobilisées sont rapidement interceptées par le milieu poreux.

Pour traduire ces mécanismes nous avons établi des programmes pour simuler les mis-au point des modèles mathématiques qui permettent, à partir des courbes de variation de la Perméabilité, de caractériser le type de dépôt rencontré et à l'aide d'un coefficient de relâche noté f_r , de quantifier le nombre de particules entraînées.

Ce coefficient f_r (Equation :2.1) est égal à l'inverse du temps qu'il faut pour atteindre la perméabilité la plus faible. En comparant les résultats, Nous avons constaté qu'au cours de la percolation convergente, le dépôt se fait par colmatage simple des pores, alors qu'en percolation divergente, il se fait par colmatage graduel.[11]

$$f_r = 1/T_f \quad (2.1)$$

Où T_f : le temps qu'il faut pour atteindre la perméabilité la plus faible.

La notion de **colmatage graduel** est utilisé lors d'une sédimentation de particules fine dans un puits ,les différentes particules minérales transportées par la boue de forage se sédimentent dans un gradient de dimension intérieur aux pores du cake empêchant l'écoulement fig :2.3

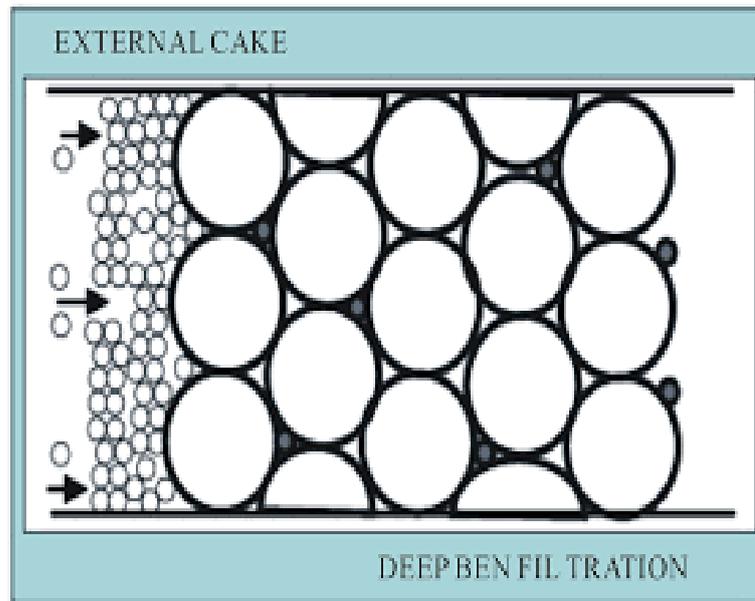


Figure 2.3: la formation du cake [[11]]

6.1 Les facteurs (paramètres) influent la formation de cake

Porosité du cake ϕ_c

La porosité du cake ϕ_c (Eq :2.2) est l'ensemble des vides (pores) d'un film de filtrat, ces vides sont remplis par des boues de forage (liquide ou gaz). C'est une grandeur physique qui conditionne les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat.

La porosité du cake est aussi une valeur numérique définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total d'un cake poreux.[12]

$$\phi_c = \frac{V_{pores}}{V_{total}} \quad (2.2)$$

V_{pores} le volume des pores du cake .

V_{total} le volume total du film de filtrat c'est-à-dire la somme du volume de solide et du volume des pores du cake .

Perméabilité de cake

La perméabilité du cake k_c correspond à son aptitude à se laisser traverser par le fluide de forage référence sous l'effet de la pression hydrostatique δP .

La perméabilité du cake k_c s'exprime généralement en Darcy (D). ou (m^2) dans le système international SI.

Un darcy correspond à la perméabilité d'un corps continu et isotrope au travers duquel

un fluide de viscosité équivalente à celle de l'eau à $20^{\circ}C$ s'écoule à une vitesse de $1cm^3s^{-1}$ lorsqu'il est soumis à une pression de 1 atm, ce qui correspond à la dimension d'une surface.[13]

La viscosité du fluide de forage

La viscosité du fluide de forage μ en *Pa.s* dans le SI ,peut être définie comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. La viscosité dynamique correspond à la contrainte de cisaillement qui accompagne l'existence d'un gradient de vitesse d'écoulement dans la matière, d'où l'origine du qualificatif de dynamique.

Lorsque la viscosité du fluide augmente, la capacité de ce dernier à s'écouler diminue. Pour un liquide, la viscosité tend généralement à diminuer lorsque la température augmente. On pourrait croire que la viscosité d'un fluide s'accroît avec sa densité mais ce n'est pas nécessairement le cas .[14]

Densité des particules

La densité des particules solides est le rapport de la masse volumique du corps à la masse volumique d'un corps pris comme référence.

Pour les solides, le corps de référence est l'eau pure à $4^{\circ}C$.

La densité est une grandeur sans dimension et sa valeur s'exprime sans unité de mesure.[15]

la Vitesse du dépôt (V)

La vitesse de dépôt des particules est déterminée à partir de l'épaisseur maximale e_{max} du cake et le temps de dépôt t .

Les mesures d'épaisseur sont effectuées avec une haute précision .En divisant d par t , on obtient la vitesse (V). Ceci sous-entend que la vitesse de croissance est constante durant tout le dépôt.

Lorsque la vitesse du dépôt des particules -formation du le cake- est égale a la vitesse d'érosion du cake on aura une tendance de stabilité au niveau du formation du cake (Epaisseur de cake).

Partie Expérimentale

Chapitre 3

Modèle mathématique et Simulation Numérique

1 Introduction

Au sujet de la modélisation de l'endommagement, de nombreux travaux sur la simulation de la filtration et de l'endommagement des réservoirs pétroliers ont été traités au cours de la dernière décennie compte tenu de l'importance et de la complexité des problèmes rencontrés dans l'exploitation pétrolière.

La prévision de la variation d'épaisseur du cake par modélisation nécessite la combinaison d'un modèle mathématique avec des données expérimentales réalisés au laboratoire de CRD. Cet épaisseur de cake à une influence considérable sur l'endommagement de la formation réservoir qui nécessite d'être bien étudié.

Le but essentiel de ce travail est d'investiguer l'influence des différents paramètres physique du cake formé lors de la circulation du fluide de forage à travers la roche réservoir sur la formation du cake lui même et par la suite sur l'endommagement. Ces paramètres physiques sont représentés par la densité des particules formant le cake, sa porosité et sa perméabilité. L'étude de ces paramètres est basé sur un modèle mathématique développé qui tient en compte l'épaisseur du cake, le débit d'écoulement et la variation de la concentration du filtrat de fluide en espace et en temps.

2 Modélisations de l'endommagement

Le modèle utilisé suppose l'utilisation des deux phases liquides , un flux du filtrat de fluide, un débit de circulation constant, des conditions isothermes, un déplacement de deux fluides non-miscibles et des pressions hydrostatiques dues à la colonne de boue et celles du réservoir.

Les paramètres utilisés dans le modèle mathématique sont donnés dans le tableau 3.1

Paramètre du modèles	Unité en SI	Désignation du paramètre
r_w	Rayon du puits	0.025(m)
r_e	Rayon d'invasion	0.038 (m)
ϕ_c	Porosité du cake	<i>Variante</i>
ϕ_f	Porosité de la formation	80 (%)
h	Epaisseur de la couche	9 (m)
k_d	Taux de déposition	1.1
V_p	volume du fluide	$560(kg/m^3)$
k_f	Perméabilité de la formation	5.92154×10^{-12}
k_c	Perméabilité du cake	<i>Variante</i>
k_e	Taux d'érosion	3×10^{-4} (s/m)
$\tau_c r$	Contrainte de cisaillement	$0.5 (kg/ms^2)$
μ	Viscosité	$1 \times 10^{-3} Pa.s$
n'	Ind d'écoulement	0.319
k'	Coefficient de consistance	0.8
stv	Vitesse tangentielle	1.25 (m/s)
δP	Pression différentielle	$33.44 \times 10^5 (Pa)$
ρ_p	densité des particules	<i>Variante</i>
ρ	Densité du filtrat	$1000 (kg/m^3)$
τ_c	Facteur de tortuosité du cake	1
τ_f	Facteur de tortuosité du fluide de forage	1
f	Coefficient de diffusion	51.7
g	Exposant de Diffusion	1.25
c_f	Concentration Initiale	$0.25(kg/m^3)$
S_{0r}	Saturation résiduelle en huile	0.3
s_{wr}	Saturation résiduelle en eau	0.25

Tableau 3.1: Données des paramètres utilisées lors de la simulation

Afin de pouvoir simuler la formation du cake sur la surface du plug, nous avons utilisé les valeurs des paramètres suivant : la densité des particules formant le cake, la perméabilité du cake, la vitesse de dépôt des particules sur la surface des plugs. Les valeurs de ces paramètres sont données dans le tableau 4.2 , tableau 4.3, tableau 4.4 et le tableau 4.1

3 Validations de Notre modèle mathématique par la simulation

Le modèle mathématique utilisé est validé en se basant sur des résultats expérimentaux obtenu lors des essais d'endommagement effectués au sein du laboratoire CRD. Comme le montre grossièrement la Figure 3.1, nous pouvons remarquer que la courbe du modèle se superpose aux points expérimentaux du débit d'injection du fluide de forage à travers la formation réservoir lors des essais de colmatage.

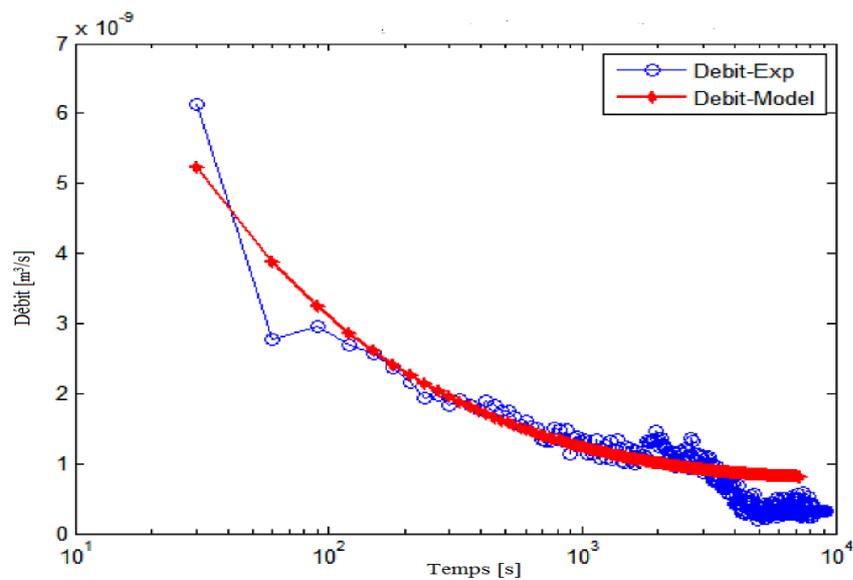


Figure 3.1: Projection de la simulation sur la pratique

Chapitre 4

Résultats et interprétations

1 Les fluides de forage et les échantillons utilisés

L'objectif de notre étude consiste à fixer tous les paramètres liés au fluide de forage et les propriétés pétrophysiques de la roche réservoir en jouant uniquement sur les propriétés physiques du cake formé lors de la circulation du fluide de forage à travers la roche

2 La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la densité des Particules

La densité des particules formant le cake durant la circulation du fluide de forage à travers la roche réservoir à un effet important sur l'épaisseur de cake ainsi que l'invasion du filtrat de fluide et les particules fines dans la formation réservoir. La Figure 4.1, montre l'évolution de l'épaisseur du cake durant le temps d'injection du fluide de forage dans la roche. La densité des Particules sont bien détaillé dans le tableau 4.1.

Les Fluides de forage	densité de particules
Fluide 1	250
Fluide 2	550
Fluide 3	780

Tableau 4.1: la densité des Particules des Fluides de forages utilisés

Nous avons obtenus ces courbes montrons La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la densité des Particules.

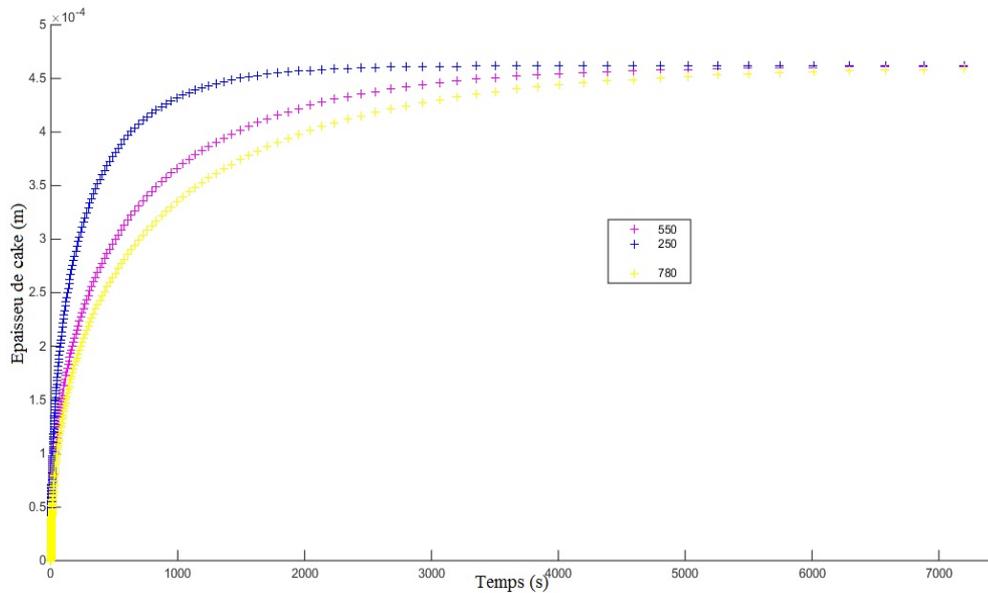


Figure 4.1: La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la densité des Particules

A travers la Figure 4.1, nous remarquons que l'épaisseur du cake augmente d'une manière non linéaire durant les premières heures de formation du cake puis se stabilise autour d'une valeur de 4.5×10^{-4} cm représentée par un palier. Ceci est expliqué par le fait que l'épaisseur de cake augmente rapidement durant les premières phases d'injection du fluide de forage dans un puits pétrolier ensuite cette épaisseur devient stable lorsque l'équilibre entre les forces d'injections et les forces d'érosions dues à l'outil de forage est atteint.

Nous remarquons également que l'épaisseur du cake formé augmente rapidement durant les premières phase d'injection lorsque la densité des particules est faible. Cette épaisseur est devenue identique pour le reste du temps quelque soit la densité des particules formant le cake. Ce phénomène est expliqué par le fait que durant les premières phases de formation du cake les particules les plus denses forment la squelette du cake laissant le filtrat et particules fines envahissant la formation conduisant ainsi à une épaisseur de cake moins épaisse, alors que les particules moins denses forment un cake de faible perméabilité ce qui conduit à une épaisseur de cake plus importante.

3 La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la porosité du cake ϕ_c

La porosité du cake à son tour influe considérablement sur son épaisseur ainsi que sur l'invasion du filtrat de fluide et les particules fines qui les compose. Dans cette section, nous allons examiner l'effet de la porosité du cake sur son épaisseur au cours du temps.

Fluide de Forage	porosité du cake (%)
Fluide 1	10
Fluide 2	50
Fluide 3	90

Tableau 4.2: la porosité du cake ϕ_c

Les résultats de la simulation avec Matlab donne les courbes exprimant La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la porosité du cake ϕ_c

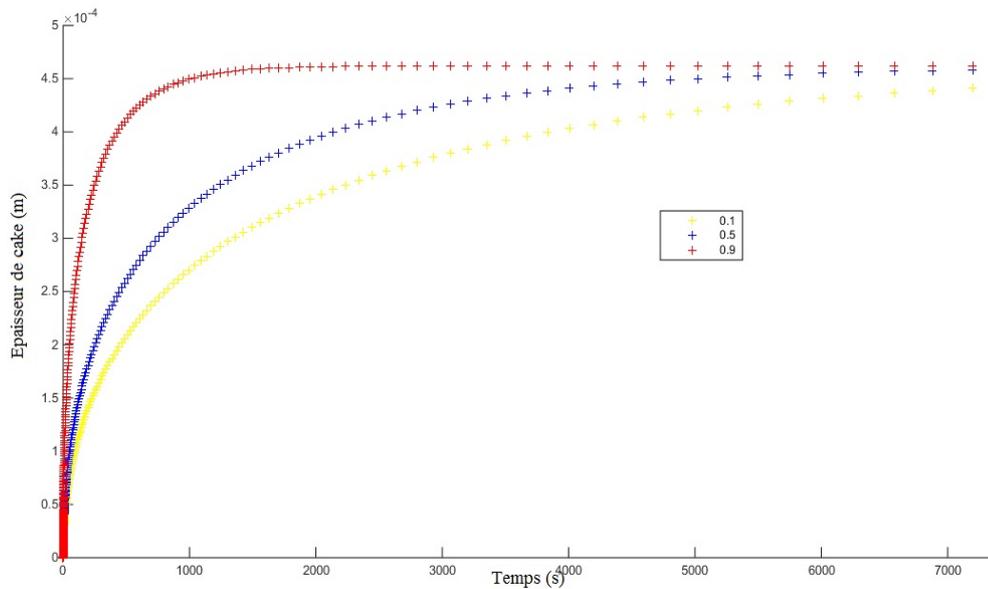


Figure 4.2: La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la porosité du cake ϕ_c

Comme le montre la Figure 4.2, l'épaisseur de cake augmente d'une façon non linéaire durant les premières phase d'injection du fluide de forage ensuite se stabilise autour d'une valeur de 4.5×10^{-4} m. Ceci peut être expliqué par le fait qu'avant l'équilibre entre les forces conduisant à la formation du cake et les forces d'érosion enlevant une partie du cake, il y a un dépôt continu du cake. Une fois que cet équilibre est atteint, le cake sera stable ce qui est représenté par un palier.

Il est à remarquer également que plus la porosité du cake est importante plus le cake prend rapidement de l'épaisseur max du cake. Il est reconnu qu'une grande porosité conduit au dépôt des particules fines entre les grosses particules formant la squelette du cake réduisant ainsi sa perméabilité et sa porosité ce qui conduit à l'augmentation de son épaisseur.

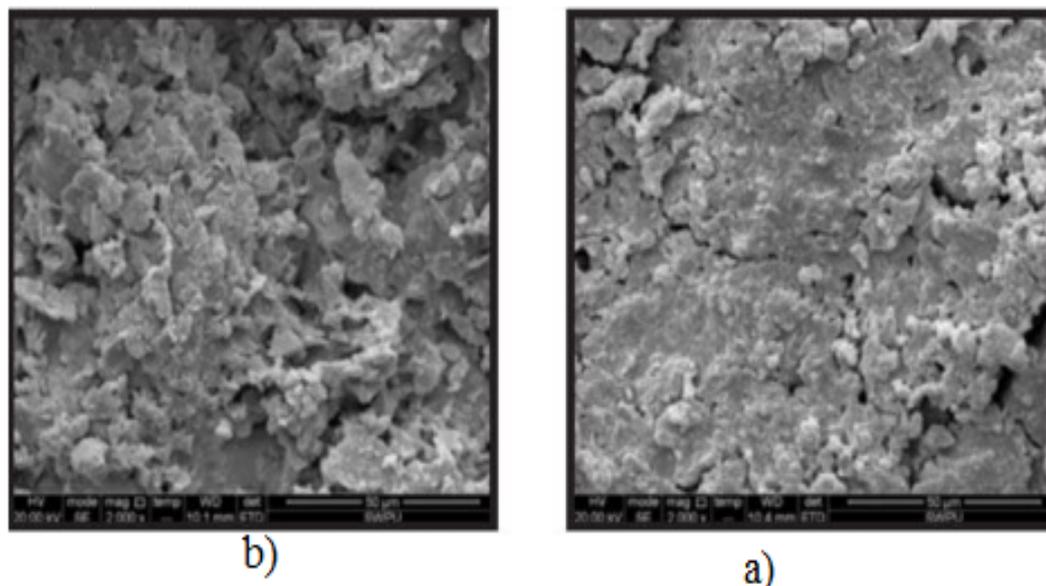


Figure 4.3: a) cake poreux et perméable b) moins perméable et moins poreux [11]

4 La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la Vitesse (V) du dépôt des particules

La vitesse de dépôt des particules solides à la surface de la roche est un facteur important qu'on doit tenir en compte afin de minimiser l'invasion du filtrat de fluide et les particules fines dans la formation. Dans ce qui suit, nous allons étudier l'effet de la vitesse de dépôt des particules formant le cake sur son épaisseur au cours du temps de l'injection du fluide de forage.

Afin de simuler l'épaisseur de cake pour différentes valeurs de vitesse de dépôt des particules formant le cake, nous avons utilisé les données mentionnées dans le tableau 4.3

Paramètre étudié	V_1	V_2	V_3
Vitesse du dépôt (V)	$2.6 \cdot 10^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$

Tableau 4.3: la Vitesse du dépôt (V)

L'évolution de l'épaisseur de cake au cours du temps d'injection du fluide de forage pour différentes valeurs de vitesses de dépôt est donnée dans la Figure 4.4.

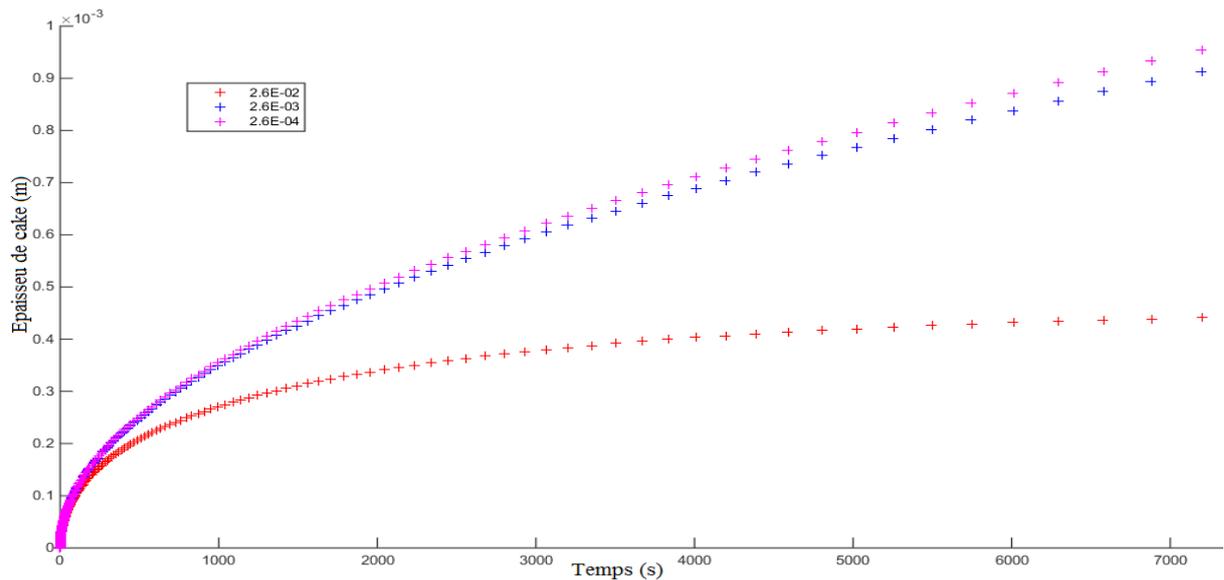


Figure 4.4: La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la Vitesse du dépôt (V)

A travers la Figure 4.4, l'épaisseur de cake augmente d'une manière non linéaire durant la première phase d'injection (≈ 1000 s), ensuite l'épaisseur de cake a tendance à se stabiliser surtout pour les fortes vitesses de dépôt ($v=2.6 \cdot 10^{-2}$) des particules. Une forte vitesse de dépôt des particules sur les parois d'un puits pétroliers conduit à une épaisseur de cake qui se stabilise rapidement vers une valeur proche de 3 mm expliquée par l'équilibre atteint entre les forces d'injection et celles d'érosion.

Il est à remarquer également que une forte vitesse de dépôt de particules sur la surface de la roche conduit à une faible épaisseur de cake comparée avec celles de moins faible. Ceci est expliqué par le fait qu'une forte vitesse de dépôt des particules provoque une invasion des particules fines et du filtrat, ce qui empêche la formation d'un cake épais, tandis qu'une faible vitesse de dépôt conduit à la formation continue du cake (épaisseur externe du cake sur les parois de la roche) avec un faible envahissement des particules fines et du filtrat dans la roche réservoir.

5 La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la perméabilité du cake K_c

La perméabilité du cake est un paramètre fondamental qui influe considérablement sur l'endommagement de la formation réservoir et par la suite sur la productivité d'un puits pétrolier. Dans ce qui suit, nous présentons l'effet de la perméabilité du cake sur son épaisseur au cours du temps d'injection du fluide de forage. Les valeurs de la perméabilité du cake K_c utilisées pour la simulation de la formation du cake au cours du temps sont données dans le tableau 4.4.

Paramètre étudié	Pérméabilité du cake (m^2)
k_c1	$88.25 \times 9.869233E-21$
k_c2	$22.25 \times 9.869233E-21$
k_c3	$125.25 \times 9.869233E-21$

Tableau 4.4: Les valeurs de la perméabilité du cake K_c utilisées dans la simulation de l'épaisseur de cake

La Figure 4.5 montre l'évolution de l'épaisseur du cake formée lors de l'injection du fluide de forage à travers la roche réservoir.

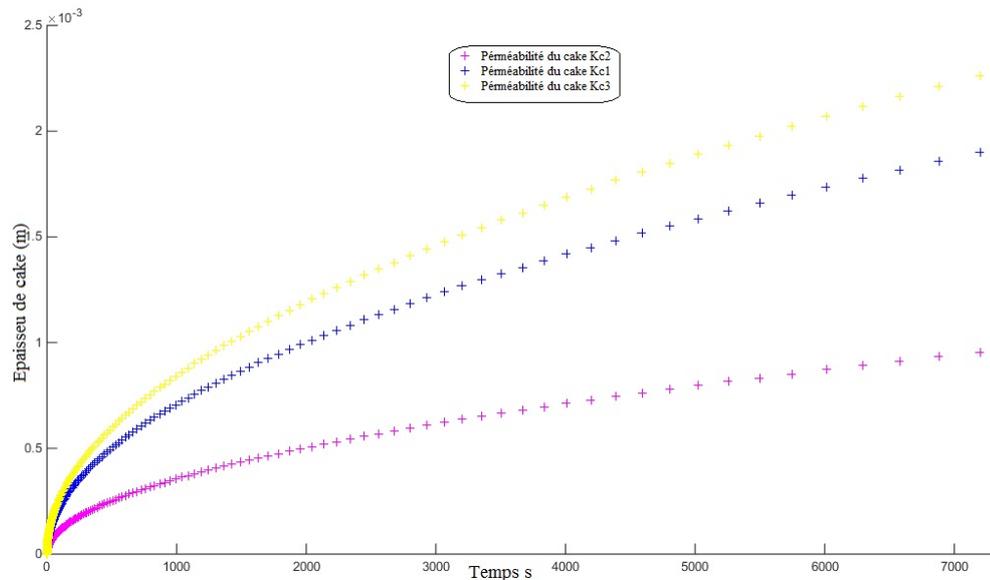


Figure 4.5: La variation de l'épaisseur de cake en fonction de la perméabilité du cake K_c

La Figure 4.5 montre que l'épaisseur de cake formé au cours de l'injection du fluide de forage augmente durant la première phase d'injection puis ce cake se stabilise. Cette stabilité marquée par un palier est plus prononcée pour la faible valeur de la perméabilité du cake (Figure 4.5), ceci est peut être expliqué par le fait qu'une faible perméabilité du cake empêche l'invasion du filtrat ainsi que les particules fines dans la formation réservoir ce qui provoque un dépôt continu des particules sur les parois du puits conduisant ainsi à l'équilibre rapide entre les forces formant le cake et celles érodant le cake.

Il est à noter également qu'une forte perméabilité du cake conduit à un cake épais. Il est reconnu qu'une forte perméabilité du cake conduit à une circulation aisée du filtrat de fluide ainsi que les particules formant le cake, ce qui provoque un dépôt continu du cake en ralentissant l'équilibre entre les forces formant le cake et celles qu'ils les détachent (l'érosion du cake)[13].

6 Conclusion

Durant le forage, l'infiltration est causée principalement par la circulation du fluide de forage. L'épaisseur du cake dépend de la différence entre sa vitesse de dépôt et sa vitesse d'érosion sous l'effet de la circulation du fluide à la surface du cake.

La vitesse de filtration du fluide diminue puis commence à se stabiliser lorsque l'épaisseur du cake tend à se stabiliser autour de la valeur de palier.

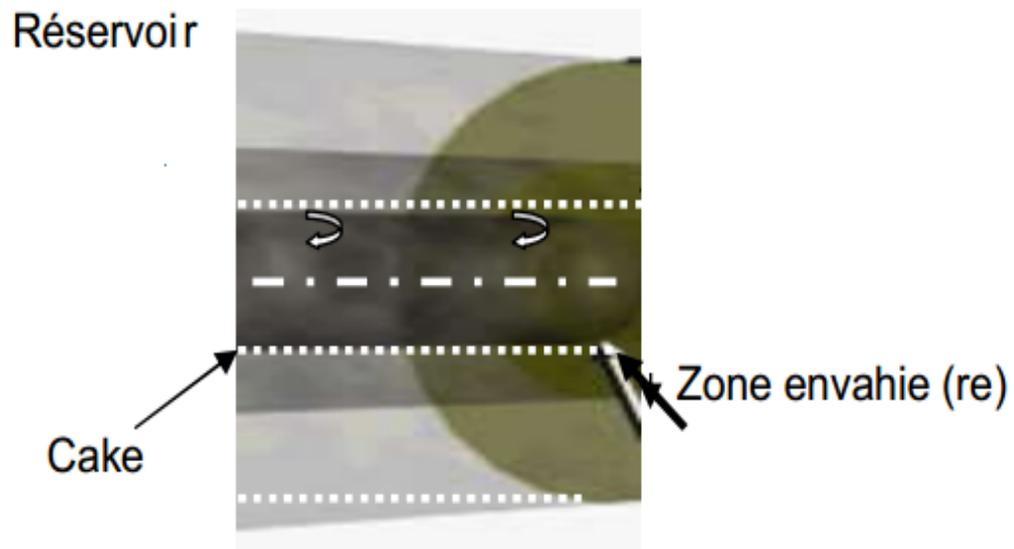


Figure 4.6: schéma représentatif de l'écoulement et de la formation d'un cake dans un forage horizontal

Conclusion générale

En conclusion, on peut dire que compte tenu de l'étendue du gisement et en raison du caractère géologique complexe du champ de Hassi Messaoud, de l'hétérogénéité du réservoir, du nombre d'événements géologiques non encore répertoriés, de la grande variabilité des valeurs de perméabilité et des imprégnations d'hydrocarbures dans les puits, la modélisation parfaite du réservoir du champ de Hassi Messaoud n'est actuellement toujours pas achevée.

Malgré une complexité importante de la géologie de la roche réservoir et la hétérogénéité des fluides utilisés, une prévision de l'endommagement sera faite pour analyser les problèmes de chute de production par un travail de modélisation.

Dans le but de prédire l'endommagement à partir de l'estimation du filtrat du fluide, nous avons utilisé un modèle mathématique linéaire qui simule l'écoulement du fluide de forage dans la roche réservoir. Ceci étant en relation étroite avec l'épaisseur du cake formé sur la face des plugs au cours du colmatage.

Sur la base des résultats obtenus, il a été établi que l'ampleur de cette épaisseur est étroitement liée aux propriétés physiques de cake tels que la **faible densité** des particules formant le cake, la **forte vitesse** de dépôt de ces particules, la grande porosité du cake et sa perméabilité majeure. Cette épaisseur se forme rapidement durant les premières phases d'injection du fluide de forage à travers la roche réservoir puis se stabilise lorsque l'équilibre entre les forces formant ce cake et celles l'érodant, puis se stabilise en formant un palier.

Il est à conclure également qu'une vitesse modérée de dépôts des particules sur la face de la roche conduit à une épaisseur de cake favorable permettant ainsi de diminuer l'endommagement de la formation réservoir

Références bibliographiques

- [1] James L Lummus and Jamal J Azar. Drilling fluids optimization : a practical field approach. 1986. [13](#)
- [2] H.C.H. Darley and George R. Gray. {CHAPTER} 1 - {INTRODUCTION} {TO} {DRILLING} {FLUIDS}. In H.C.H. Darley, , and George R. Gray, editors, *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (Fifth Edition)*, pages 1 – 37. Gulf Professional Publishing, Boston, fifth edition edition, 1988. [14](#), [15](#), [16](#), [17](#), [19](#)
- [3] Alexandre BRIGANT, Didier. LEBLOND. Forages. *Encyclopaedia Universalis*. [15](#)
- [4] Jean-Paul NGUYEN. *Le forage*, pages 1–12. TECHNIP, 1993. [15](#)
- [5] Johannes Karl Fink. *Reactive polymers fundamentals and applications : a concise guide to industrial polymers*. William Andrew, 2013. [15](#)
- [6] Landriot G. *Fluide de Forage*. 1968. [16](#)
- [7] Guy Couarraze and Jean-Louis Grossiord. Initiation à la rhéologie. 1983. [18](#)
- [8] Keyvan Maleki. *Modélisation numérique du couplage entre l'endommagement et la perméabilité des roches. Application à l'étude des ouvrages de stockage souterrain*. PhD thesis, Ecole des Ponts ParisTech, 2004. [20](#)
- [9] Anis Bounenni. *Etude expérimentale de l'effet de l'endommagement sur la perméabilité des roches*. PhD thesis, Ecole des Ponts ParisTech, 2002. [21](#)
- [10] Xinghui Liu, Faruk Civan, et al. Formation damage and skin factor due to filter cake formation and fines migration in the near-wellbore region. In *SPE Formation Damage Control Symposium*. Society of Petroleum Engineers, 1994. [23](#)
- [11] Paul G Marinos. *Engineering geology and the environment*, volume 2. CRC Press, 1997. [iii](#), [24](#), [25](#), [34](#)
- [12] Jean-François Daïan. Equilibre et transferts en milieux poreux. 2013. [25](#)
- [13] Jun Feng Wang and Wook Ryol Hwang. Permeability prediction of fibrous porous media in a bi-periodic domain. *Journal of composite materials*, 42(9) :909–929, 2008. [26](#), [36](#)

- [14] Etienne Guyon, Jean-Pierre Hulin, Luc Petit, and Pierre Gilles de Gennes. *Hydrodynamique physique*. EDP sciences Les Ulis, 2001. [26](#)
- [15] Jean Paul Mathieu, Pierre Fleury, and Alfred Kastler. *Dictionnaire de physique*. Masson, 1983. [26](#)
- [16] Civan.F. Incompressible cake filtration : Mechanism, parameters, and modeling. *AIChE Journal*, 44(11) :2379–2387, 1998. [41](#)
- [17] Parn-anurak.S and Engler.T.W. Modeling of fluid filtration and near-wellbore damage along a horizontal well. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 46(3) :149 – 160, 2005. [41](#)

Annexe A

Modèle de distribution du filtrat du fluide de forage

Afin d'évaluer l'ampleur de l'endommagement dans la formation réservoir, le paramètre fondamental permettant de donner des informations sur l'endommagement est le facteur de skin (s). Ce dernier dépend lui aussi de deux facteurs critiques, le rayon d'invasion (rayon d'endommagement) et la réduction de la perméabilité de la zone envahie. Pour estimer ces paramètres, la distribution du filtrat du fluide dans la formation doit être évaluée. La concentration du filtrat dans la roche dépend de la dispersivité de la formation, la porosité, la vitesse de filtration et le temps de contact fluide-roche.

Hypothèses du modèle de filtration

- ★ La vitesse de filtration du fluide est supposée uniforme le long de l'échantillon ;
- ★ Le milieu est supposé isotrope et homogène ;
- ★ Le fluide est incompressible ;
- ★ La porosité est homogène

Le modèle décrivant la distribution de la concentration du filtrat du fluide pour un système d'écoulement linéaire est donné par l'équation suivante [16, 17] :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{u(t)}{(1 - S_{or})\phi} \frac{\partial C}{\partial x}, \quad t > 0, 0 < x < L \quad (5.1)$$

Les conditions initiales à $t=0$

$$C(x, 0) = 0, 0 < x < L \quad (5.2)$$

Les conditions aux limites ($t>0$) sont :

$$C(0, t) = C_f \quad (5.3)$$

et

$$C(L, t) = 0 \quad (5.4)$$

Le coefficient de dispersion, D , est composé de deux paramètres : le coefficient de convection-dispersion (D_e) et le coefficient de diffusion moléculaire (D_m). Il est donné par la formule suivante :[5.5](#)

$$D = D_e + D_m \quad (5.5)$$

Le coefficient de diffusion moléculaire est supposé négligeable, tandis que le coefficient de convection-dispersion est significatif durant la filtration du fluide de forage. Une relation empirique donnant le coefficient de convection-dispersion a été proposée :[\(5.6\)](#)

$$D_e = f * u^g \quad (5.6)$$

Où f et g sont des paramètres empiriques.

Les valeurs moyennes de f et g sont **51.7** et **1.25** respectivement.

Programme Matlab Utilisé

```
    epaisseur de Cake
function [DXc] = Cake_Thickness(t,Xc)
K = 1.9738466e-14;
Kc = 1.33235e-17;
DELTAp = 33.44e+5;
MUf = 30*(1e-3);
L = 0.05;
Kd = 1.1;
Cp = 560;
PHIc = 0.4;
Ke = 3e-4;
TAUcr = 0.5;
RAUp = 2500;
a = 0.01;
Kprime = 0.8;
siv = 1.25;
Nprime = 0.319;
f = 51.7;
g = 1.25;
Q0=K*a*DELTAp/(MUf*L);
Q=Q0/(1+((K*Xc)/(Kc*L)));
D = f*((Q/a)^g)
TAUs = Kprime*((4*siv/D)^(-Nprime));
A = (Kd*Cp/((1-PHIc)*a*RAUp));
if( Xc==0 || TAUs<TAUcr)
B=0;
else
```

```
B = Ke*(TAUs-TAUcr)/((1-PHIc)*RAUp);  
end  
DXc = A*Q-B;  
end  
Débit d'écoulement  
t = 7200;  
K = 1.9738466e-14;  
Kc = 1.33235e-17;  
DELTAp = 33.44e+5;  
MUf = 30*(1e-3);  
L = 0.05;  
a = 0.01;  
Q0 = K*a*DELTAp/(MUf*L);  
[t, Xc] = ode45(@Cake_Thickness,[0 t],0);  
Q=zeros(length(Xc),1);  
for i=2:length(Xc)  
    Q(i)= Q0/(1+((K*Xc(i))/(Kc*L)))  
end  
figure(6)  
plot(t,Xc,'o')  
figure(5)  
plot(t,Q,'+')
```