

N° d'ordre : / Faculté / UMBB / 2015

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par :

**LEBAZ Abdelkarim
CHIBATI Nadjib**

Filière : Hydrocarbures

Option : Forage des puits

Thème

**Etude Numérique du comportement d'une boue à base d'huile durant
le forage conventionnel du puits OKS#37 dans la région
de Haoud Berkaoui.**

Devant le jury :

HADJADJ Ahmed

MC (A)

UMBB

Encadreur

Année universitaire 2015 / 2016

Remerciements

*Louange et gratitude à Allah le Tout Miséricordieux
pour m'avoir donné la force, la santé et le courage pour achever ce travail.*

*Je tiens à remercier en premier lieu mon encadreur
Dr : HADJADJ Ahmed
pour son aide, ses précieux conseils, ses remarques, sa grande disponibilité
et sa générosité dans le partage de ses connaissances scientifiques.*

*J'adresse mes vifs remerciements à mes enseignants de l'université de Boumerdés
pour leurs sacrifices dans leur noble tâche de transmettre le savoir.*

*Mes remerciements vont également au personnel du chantier ENTP 184 pour leur
accueil et leur soutien durant mon séjour de stage.*

*J'adresse mes remerciements à tous ceux qui de près ou de loin,
même avec un sourire ont contribué à la finalisation de ce travail.*

*Enfin, je tiens à remercier les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail
et apporter leurs critiques et corrections.*

Introduction

Chapitre I : Revue de Littérature

I.	Escudier & al.	02
II.	Wang Zhongyirrg & Tang Songran	02
III.	Subramanian.R & al	02
IV.	Okafor M.N.	03
V.	Ramadan Ahmed	03
VI.	Terry Hemphil & Halliburton	04
VII.	Terry Hemphil & al	04
VIII.	Oney Erge & al	05
IX.	Olatunbosun Anifowoshe	06

Chapitre II : Généralités sur la région de Haoud Berkaoui

I.	Présentation de la région de Haoud Berkaoui	
	I.1 Situation géographique	07
	I.2 Situation géologique	08
II.	Etude du champ de Haoud Berkaoui	
	II.1 Caractéristiques du reservoir	09
	II.2 Aspect structurel	09
	II.3 Stratigraphie du champ de Haoud-Berkaoui	09
	II.4 Aperçu sur le forage	13

Chapitre III : Généralités sur les boues de forage.

I.	Introduction	15
II.	Historique	15
III.	Rôles des boues de forage	16
IV.	principales produits des boues de forage	
	IV.1 Les colloïdes argileux	18
	IV.2 Les colloïdes organiques	19
	IV.3 Les fluidifiants et défloculants	20
	IV.4 Les additifs minéraux	20
	IV.5 Les produits organiques spéciaux	20

SOMMAIRE

IV.6 Les alourdissants	21
IV.7 Les colmatants	21
V. Types et compositions des boues	
V.1 Les boues à base d'eau	22
V.2 Les boues à base d'huile	23
V.3 Les fluides de forage gazeux	24
VI. Caractéristiques des boues de forage	
VI.1 Caractéristiques physiques	25
VI.2 Caractéristiques électrochimiques	29
VI.3 Caractéristiques rhéologiques	30

Chapitre IV : Rhéologie et régime d'écoulement des fluides de forage

I. Introduction	34
II. Contrainte et vitesse de cisaillement	
II.1 Contrainte de cisaillement	34
II.2 Déformation et vitesse de cisaillement	35
III. Types de fluides	
III.1 Les fluides Newtoniens	36
III.2 Les fluides non newtoniens	36
IV. modes de comportement d'écoulement	
IV.1 Modèle de Bingham	39
IV.2 Modèle d'Ostwald (modèle à la loi de puissance)	39
IV.3. Modèle de Herschel-Bulkley	40
IV.4 Modèle de Cross	41
V. Régimes d'écoulement des boues	
V.1 Régime permanent	44
V.2 Régime transitoire	45

Chapitre V : Lois régissent l'écoulement dans un espace annulaire concentrique et cylindrique.

Partie I : Les lois régissent l'écoulement des boues de forage

I.1 Equation de continuité	46
I.2 Equation de la conservation de quantité de Mouvement en 2D	47
I.3 Equation de l'énergie	51
I.4 Equation de transfert de masse	52

Partie II : Solution numérique de l'équation de Navier Stokes

II.1 Écoulement d'un fluide newtonien dans un espace annulaire avec le cylindre Intérieur en rotation	53
II.2 Procédure numérique de la résolution de l'équation	56

Chapitre VI : Cas pratique : Application sur un écoulement d'une boue de forage

Partie I : Présentation du puits OKS#37

I.1 Fiche technique et localisation du puits	63
I.2 Programmes du puits	
I.2.1 Programme des outils	64
I.2.2 Programme de la boue	65
I.3 Choix de la garniture de forage (BHA)	66
I.4 Programme prévisionnel de forage	69

Partie II : Modélisation d'un fluide AVA durant la phase 16" sur le champ de Houad Berkaoui.

II.1 Matériel et procédures expérimentales	70
II.2 Etude Comportement rhéologique de la boue [$\tau = f(\dot{\gamma})$], [$\mu = f(\dot{\gamma})$] et détermination de modèle rhéologique	
II.2.1 Résultats de rhéomètre Fann 35A	72
II.2.2 Approche suivant les modèles connus	73
II.2.3 Résultats de rhéomètre Physica MCR 301	76
II.2.4 Schématisation et interprétation des graphes [$\tau = f(\dot{\gamma})$], [$\mu = f(\dot{\gamma})$]	78

Partie III : Simulation de la boue avec le logiciel Drillbench

III.1 Définition de logiciel	82
III.2 Etude de changement des pertes de charges en fonction de débit	83
III.3 Etude de changement des pertes de charges en fonction de la vitesse de rotation RPM	84
III.4 Etude de changement des pertes de charges dans la phase 8 ^{1/2} "	85
III.5 Etude de changement des pertes de charges en fonction de débit pour les différents modèles rhéologique	87

Conclusion

Bibliographies

Annexes

Liste Des Figures

➤ Figure n°01 : Situation géographique de Haoud Berkaoui	07
➤ Figure n°02 : Situation géologique de Haoud Berkaoui	08
➤ Figure n°03 : Coupe stratigraphique du champ de Haoud Berkaoui	12
➤ Figure n°04 : Circuit de la boue de forage	14
➤ Figure n°05 : Densimètre à boue	26
➤ Figure n°06 : Un élutriomètre	27
➤ Figure n°07 : Filtrat-presse HP	28
➤ Figure n°08 : Un Viscosimètre Marsh	30
➤ Figure n°09 : un viscosimètre Fann	31
➤ Figure n°10 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines	34
➤ Figure n°11 : Déformation et vitesse de cisaillement	35
➤ Figure n°12 : Rhéogramme des fluides	37
➤ Figure n°13 : Cycle des fluides thixotropes	38
➤ Figure n°14 : Viscosité en fonction de taux de cisaillement de différents paramètres 'C' et 'm'	41
➤ Figure n°15 : Expérience de Reynolds	43
➤ Figure n°16 : Régimes d'écoulements	44
➤ Figure n°17: Composante de contrainte exerçant sur une surface dS suivant l'axe X	48
➤ Figure n°18 : La géométrie de notre système en 2D	53
➤ Figure n°19 : Distribution des volumes de contrôle avec un maillage décalé	57
➤ Figure n°20 : Volume de contrôle typique	58
➤ Figure n°21 : Localisation du puits OKS#37	64
➤ Figure n°22 : Programme prévisionnel de forage du puits OKS#37	69
➤ Figure n°23 : Rhéomètre Physica MCR 30	71
➤ Figure n°24 : Graphe $\tau = f(\dot{\gamma})$ des résultats de MCR 301	78
➤ Figure n°25 : Zoom sur la zone à faible taux de cisaillement	78
➤ Figure n°26 : Graphe $\tau = f(\dot{\gamma})$ pour les différents modèles rhéologiques	79

Liste Des Figures

- **Figure n°27 : Graphe $\mu = f(\dot{\gamma})$ de viscosimètre Fann pour les différents modèles Rhéologiques80**
- **Figure n°28 : Graphe $\mu = f(\dot{\gamma})$ de rhéomètre MCR 301 pour la boue80**
- **Figure n°29 : Fenêtre de logiciel Drillbench82**
- **Figure n°30 : ECD/ESD en fonction des différents diamètres du trou pour un RPM constant RPM = 90 tr/min83**
- **Figure n°31 : ECD/ESD en fonction différents diamètres du trou pour un débit d'injection constant Q = 1500 l/min84**
- **Figure n°32 : ECD/ESD en fonction des débits d'injection pour différents RPM85**
- **Figure n°33 : ECD/ESD en fonction de RPM pour différents débits d'injection86**
- **Figure n°34 : ECD/ESD en fonction de débit d'injection pour les différents modèles rhéologique87**
- **Figure C1 : Fenêtre de travail de logiciel Mud War.**

- **Tableau n°01 : Modèles rhéologiques décrivant loi d'écoulement des fluides a contraintes critiques42**
- **Tableau n°02 : Modèles rhéologiques décrivant loi d'écoulement des fluides sans contraintes critiques42**
- **Tableau n°03 : Identification des équations par rapport à l'équation générale de transport56**
- **Tableau n°04 : Informations du puits OKS#3763**
- **Tableau n°05 : Programme des outils OKS#3764**
- **Tableau n°06 : Programme prévisionnel de la boue du puits OKS#3765**
- **Tableau n°07 : Programme BHA de la phase 26"66**
- **Tableau n°08 : Programme BHA de la phase 16"66**
- **Tableau n°09 : Programme BHA de la phase 12^{1/4}"67**
- **Tableau n°10 : Programme BHA de la phase 8^{1/2}67**
- **Tableau n°11 : Programme BHA de la phase 6"68**
- **Tableau n°12 : Composition de la boue utilisée70**
- **Tableau n°13 : Les résultats obtenus de la boue à partie viscosimètre Fann72**
- **Tableau n°14 : Les résultats obtenus suivant l'approche de modèle de Bingham73**
- **Tableau n°15 : Les résultats obtenus suivant l'approche de modèle d'Ostwald74**
- **Tableau n°16 : Les résultats obtenus suivant l'approche de modèle de Herschel Bulkley75**
- **Tableau n°17 : Résultats obtenus pour une vitesse de cisaillement ascendante76**
- **Tableau n°18 : Résultats obtenus pour une vitesse de cisaillement descendante77**
- **Tableau C : Cordonnées et réglages effectués sur le rhéomètre MCR 301 pour l'expérience.**

Introduction :

Le pétrole et le gaz reste la première source énergétique dans le monde, tel que le gaz représentant 21.3% et le pétrole 31.4% d'après l'AIE [27] (Agence internationale de l'énergie), l'utilisation de ces ressources sont derrière toutes les types d'industrie que ce soit en Amont ou en Aval (transformation pétrochimique et pharmaceutique).

La forte demande en énergie a poussé les compagnies pétrolières et les gouvernements des pays à aller exploré et exploité les hydrocarbures dans des zones très difficile (en mère), et en grandes profondeurs, allant jusqu'à 10000 m. Donc pour atteindre cet objectif il faut des moyens économiques et techniques très importants.

La finalité d'un forage est d'atteindre le réservoir des hydrocarbures avec un prix de revient minimal, plusieurs technologies ont été développés selon les besoin et les difficultés rencontrées pendant le forage, mais avec toutes les améliorations qui ont été faites, on rencontre toujours des problèmes lors de la réalisation des puits pétroliers à savoir l'instabilité des parois, les éruptions et les pertes de circulation, surtout dans les forages profonds.

Les fluides de forage est un élément important dans cette échiquier car, ils doivent avoir des propriétés permettant d'optimiser : le nettoyage du puits, maintien des déblais en suspension, refroidissement de l'outiletc. Ensuite la connaissance des paramètres rhéologiques et hydrauliques des fluides vont faciliter le passage de l'outil de forage à travers les différentes couches de la formation géologique et permettant d'assurer la stabilité des parois forés en exercent une pression hydrostatique et en empêchement les venues des fluides provenant des nappes souterraines traversés.

Notre présente étude se base sur la détermination du modèle rhéologique régissant la boue à base d'huile utilisé dans le forage de la phase 16'' à Haoud Berkaoui, ainsi que ces différents paramètres rhéologiques en utilisant deux (02) types de rhéomètres. Ensuite, on a fait une étude sur l'évolution des pertes de charges dans l'espace annulaire en fonction des différents paramètres de forage (vitesse de rotation, débit) et le modèle rhéologique à l'aide d'un logiciel de simulation appelé Drillbench.

Afin de réaliser notre objectif, notre mémoire est divisé travail comme suite :

Le **Premier chapitre** représente les principaux travaux qu'on a pu trouver lors de notre recherche bibliographique sur les paramètres qui affectent les pertes de charges dans l'annulaire.

Le **Deuxième chapitre** est dédié à la présentation géologique du champ d'Haoud Berkaoui.

INTRODUCTION

Le **Troisième chapitre** est dédié aux généralités sur les fluides de forage pour bien comprendre leurs rôles, leurs types, leurs compositions et leurs caractéristiques.

Le **Quatrième chapitre** est consacré à l'étude des modèles rhéologiques des fluides de forage ainsi que leurs régimes d'écoulements dans le but de comprendre c'est quoi la rhéologie et de quoi elle dépend.

Dans le **Cinquième chapitre** c'est la mise en place des équations d'écoulements des fluides de forage ainsi que la méthode de résolution numérique de ces équations complexe sont présentés.

Dans le **sixième chapitre** (partie pratique) : la première partie est consacrée à la résolution de notre modèle de fluide de forage, et la deuxième partie les simulations sont entreprises en utilisant le logiciel de simulation Drillbench pour visualiser le changement des pertes de charge dans le puits avec les différents paramètres de forage (vitesse de rotation et le débit) et le modèle rhéologique pour les multiples phases de forage.

De nombreux travaux sont apparus dans la littérature traitant des écoulements des fluides non-Newtoniens à travers les tiges et les espaces annulaires. On trouve ainsi des études concernant les pertes de charges dans l'annulaire et leur relation avec les paramètres de forage et les types des boues utilisés ainsi que leurs caractéristiques.

Dans ce qui suit on va présenter les principaux travaux qu'on a pu trouver lors de notre recherche bibliographique. Ainsi,

I. Escudier & al [18]

Ont effectué des calculs numériques utilisant une méthode des volumes finis pour l'écoulement laminaire entièrement développé d'un fluide pseudo-plastique en loi de puissance à travers un anneau excentrique avec la rotation du cylindre intérieur. On montre qu'en général, les valeurs des chutes de pressions pour les fluides en loi de puissance suivent les tendances observées par Escudier et al. (1999) pour les fluides newtoniens. Ils ont montré qu'un fluide en loi de puissance présente généralement une chute de pression plus faible par comparaison avec le fluide newtonien.

II. Wang Zhongyirrg & Tang Songran [19]

Ont trouvé que le débit de la boue est étroitement lié avec l'anomalie du trou (densité des cuttings et la perte de pression dans l'annulaire). Dans cet article ils ont traité l'effet d'écoulement annulaire et ils ont met en évidence les trois critères de l'effet de l'écoulement qui sont (l'érosion, l'injection et la pression dynamique), ils ont définit la règle de similitude d'effet annulaire et dérive les formules représentant les trois critères. Il recommande également l'indice d'évacuation de l'effet annulaire, et représente la façon de sélectionner les paramètres rhéologiques et le débit de circulation.

III. Subramanian.R & al [20]

Ont réalisés une étude expérimentale approfondie sur la chute de pression de friction pour les fluides de forage non-Newtonian, un écoulement dans un tube et en annulaire a été réalisé. A 350 pieds en circuit fermé composé de deux tubes et deux sections d'essai d'écoulement annulaire ont été utilisé dans le programme de test. Cinq boues différentes ont été testées, qui comprenaient : la boue de bentonite, MMH boue, la boue a polymère, Glycol boue et une boue d'huile végétale « Petrofree ».

Les données expérimentales obtenues ont été utilisés pour générer des courbes très utiles de « facteur de friction et nombre de Reynolds généralisé ». Pour chacun des systèmes de boue, les graphes offrent un moyen pratique et précis pour déterminer les facteurs de friction nécessaires

pour le calcul des chutes de pression dans la conduite et l'écoulement annulaire. En outre, une discussion comparative est présentée sur les données de chute de pression de frottement mesurées, prédite par des corrélations telles que la loi de puissance, Bingham plastique et modèle de Herschel Bulkley. L'importance de la rugosité des parois sur les calculs de chute de pression de frottement de l'écoulement turbulent est également étudiée.

IV. Okafor M.N. [21]

Il a montré que les contraintes de cisaillement et les pertes de pression par frottement qui existent dans un système de circulation pourraient être prédites par le biais de modèles de rhéologie. Cet article présente la comparaison expérimentale d'un modèle relativement nouveau de rhéologie appelé Robertson-Stiff et Modèle Ostwald-de Wall (loi de puissance) et Bingham plastiques.

Les modèles ont été utilisés pour prédire contrainte de cisaillement et les pertes de charge par friction dans des expériences de laboratoires utilisant des fluides de forage à base d'eau et d'argile pour les flux à travers les tiges et les anneaux. Deux types de fluides de forage de l'argile dans l'eau ont été utilisées ; une avec une contrainte de faible rendement et l'autre avec une contrainte de rendement élevé.

Les résultats de la recherche ont montré que le modèle de Robertson-Stiff prédit le meilleur ajustement des données rhéologiques pour les deux types de fluides de forage utilisés. Cependant, pour des vitesses de fluide supérieures à 2 ft/sec (0,61 m/sec), les pertes de pression par frottement prédites par le modèle de Robertson Staff différent de celui de modèle de la loi de puissance de moins de trois pour cent.

V. Ramadan Ahmed [22]

Dans cet article, l'auteur présente les résultats d'études sur le terrain et l'analyse théorique menée sur l'effet de la rotation des tiges sur l'hydraulique des puits de forage. Les mesures sur le terrain pendant le fonctionnement réel de forage ont été obtenues à partir de quatre puits différents. Les paramètres clés de forage tels que le débit, la vitesse de rotation des tiges, le taux de pénétration, l'ECD et la densité de retour, ont été enregistrés en fonction de la profondeur mesurée.

Les mesures sur le terrain publiées ont été analysées systématiquement en utilisant des techniques d'analyse dimensionnelle. Après la corrélation des différents groupes adimensionnels, un nouveau modèle semi-empirique a été développé. Le modèle a été rigoureusement testé pour sa précision. Les prédictions du modèle ont été comparées avec les nouvelles mesures et les prévisions d'un modèle existant sur le terrain. Les prédictions du modèle

montrent un bon accord avec les mesures sur le terrain. Les nouvelles expositions du modèle sensiblement d'une meilleure précision que celle existante.

Le modèle développé dans cette enquête est pertinente pour gérer l'ECD dans des trous minces, des puits d'eau profonde et il est étendue pour atteindre les puits de forage très profonds présentant des pertes de pression excessive. Dans les applications en eaux profondes, la gestion du l'ECD devient critique en raison de la fenêtre de fonctionnement étroit entre les pores et la rupture des gradients de pression.

VI. Terry Hemphil & Halliburton [23]

Il est connu depuis un certain temps que la position de la tige de forage (dans le centre annulaire ou hors centre) a un effet significatif sur la chute de pression calculée. Pourtant, les vitesses de rotation et l'excentricité des tiges de forage sont négligés dans les calculs de chute de pression et supposons que les tiges sont toujours au centre de l'anneau. Il est connu que le déplacement de la tige de forage à partir du centre du trou à une position excentrique peut réduire la pression annulaire de circulation pouvant aller jusqu'à 30%, et ces pressions réduites peuvent être considérablement augmentée en utilisant des vitesses accrues de rotation des tiges de forage.

L'auteur dans cette publication a utilisé les informations d'un champ d'empreintes digitales pour la validation de cette approche purement théorique, où les changements de pression annulaires avec des vitesses de rotation des tiges et la vitesse de fluide ont été mesurés à l'aide des outils de pression de fond.

Les niveaux de densité de circulation équivalente (ECD) ont été calculés à partir des variations de chute de pression en utilisant l'équation standard. Par conséquent, ce type de validation est tout à fait différent de ce qui a été utilisé précédemment, pour lequel seulement un certain succès a été obtenu dans l'appariement des données.

Les résultats présentés ici montrent que les petites plages de valeurs de l'excentricité des tiges peuvent provoquer des changements dans la chute de pression mesurée pour ce qui suit :

- ✓ Puits vertical ou légèrement dévié (un jeu de plage)
- ✓ Puits déviés

En utilisant les petites plages de l'excentricité des tiges présentées dans cette étude, les ingénieurs de forage peuvent mieux calculer les effets hydrauliques de rotation des tiges dans une situation de forage donnée où aucune donnée expérimentale n'est disponible.

VII. Terry Hemphil & al [24]

Au cours des dernières années, les changements dans le ECD causés par la compressibilité du fluide, rhéologie fluide de fond, excentricité des tiges, et le taux de pénétration ont été largement

étudiés. En revanche, le travail sur la modélisation des effets de rotation des tiges sur chute de pression et l'ECD ont reçu relativement peu d'attention. Les premières études ont examiné la relation entre la perte de pression en circulation, en particulier dans les forages étroits (slimhole) et à très haute vitesses de rotation des tiges. Plus récemment, les effets prévus de la rotation sur l'ECD dans des géométries de puits de forage concentriques et excentriques ont été étudiés et l'amélioration du modèle a été faite.

Ces approches techniques sont résumées dans le présent document. L'effet de la vitesse de rotation des tiges sur l'ECD prévu pour différentes combinaisons de tiges sont présentés et discutés. Les effets calculés de la rotation des tiges de forage sur la chute de pression et l'ECD sont comparées à mesures réelles sur le champ à l'aide des jauges de pression annulaires de fond de puits.

D'après les résultats décrits dans ce document, le lecteur peut évaluer la précision des méthodes de calcul actuelles. Les changements dans l'ECD avec la rotation des tiges peuvent maintenant être mieux prédits, et c'est particulièrement important pour les puits dont la fenêtre sécurité du forage est étroite. En fin de compte ce qui conduit à l'achèvement de forage et la complétion sans risque et avec plus d'efficacité.

VIII. Oney Erge & al [25]

L'auteur dans cette publication a fait une étude expérimentale suivie par une modélisation complète de l'écoulement. Les expériences ont été menées sur un anneau horizontal avec tiges en compression, compte tenu de l'influence de rotation sur les pertes de pression par frottement pour un fluide en modèle de Herschel Bulkley. L'écoulement à travers différentes configurations avec et sans rotation des tiges a été étudiée.

Il a observé que l'augmentation de l'excentricité et de la vitesse de rotation provoque une transition à partir d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent. Les résultats suggèrent une réduction des pertes de pression avec une conduite excentrique. En outre, les configurations ont montré une réduction supplémentaire des pertes de pression frictionnelle quand la compression augmente.

IX. Olatunbosun Anifowoshe [26]

L'écoulement annulaire des fluides non-newtoniens reste un phénomène important dans les opérations de forage, mais l'estimation précise de la perte de pression par frottement avec la rotation du tube de forage pose encore un grand défi. Comme les pertes de pression de frottement annulaires augmentent l'ECD, il devient impératif d'estimer avec précision la perte de pression annulaire pour maintenir l'ECD au-dessus de la pression des pores et en dessous du gradient de fracture en particulier dans le forage où la pression des pores et des fractures sont si proches.

Dans cette étude, l'auteur a utilisé Sept définitions de différents diamètres équivalents sont utilisés pour estimer les pertes de charge par frottement dans un annulaire, des analyses théoriques obtenus à partir de littérature ont été effectuées sur des données expérimentales pour déterminer l'effet de ces définitions sur l'hydraulique de puits de forage.

Le rapport de la perte de pression avec la rotation de la conduite à la perte de pression sans rotation du tube a été développé pour chaque définition de diamètre équivalent en utilisant technique d'analyse dimensionnelle. Ces modèles hydrauliques combinés à la méthode conventionnel d'estimation de la perte de pression par friction ont été testées avec les mesures expérimentales afin de déterminer le modèle avec une définition d'un diamètre équivalent qui prédit le mieux les pertes de charge par friction pour les fluides de loi de puissance.

I. Présentation de la région de Haoud Berkaoui

I.1 Situation géographique :

La région de Haoud Berkaoui représente une des 10 (dix) principales zones productrices d'hydrocarbures du Sahara algérien. Elle se situe à environ 800 Km au sud-est de la capitale Alger, à 100 km au nord-ouest de Hassi Massaoud et à 30 km d'Ouargla. Elle s'étend du sud-est de Ghardaïa jusqu'au champ extrême Boukhzana près de la route de Touggourt.



Figure n°01 : Situation géographique de Haoud Berkaoui

I.2 Situation géologique :

La région de Haoud Berkaoui fait partie du bassin de Oued-Mya, ce dernier se situe dans la partie nord du Sahara Algérien, il se localise exactement dans la province centrale.

Ce bassin a la configuration d'une dépression allongée d'orientation nord-est/sud-ouest acquise au cours du paléozoïque. Il est limitée, au nord par la zone haute de Djamâa –Touggourt, constituée de terrains d'âge cambrien ; Au nord-ouest le môle de Talemzane (Hassi R'mel) ; À l'est, par la dorsale d'El-Agreb El-Gassi qui se prolonge jusqu'à Massaoud au nord et au sud par la dépression de Mouydir.

La région de Haoud- Berkaoui se situe au nord de la dépression d'Oued-Mya (Bloc 438) (Fig. I-2). Cette structure se trouve dans la partie la plus subsidence orientée nord-est/sud-ouest, elle est séparée du bourrelet d'Erg Djouad par un sillon dont l'amplitude varie de 200 à 400 Km, sa largeur varie de 25 à 30 Km au sud-ouest et de 08 à 10 Km au nord-est.

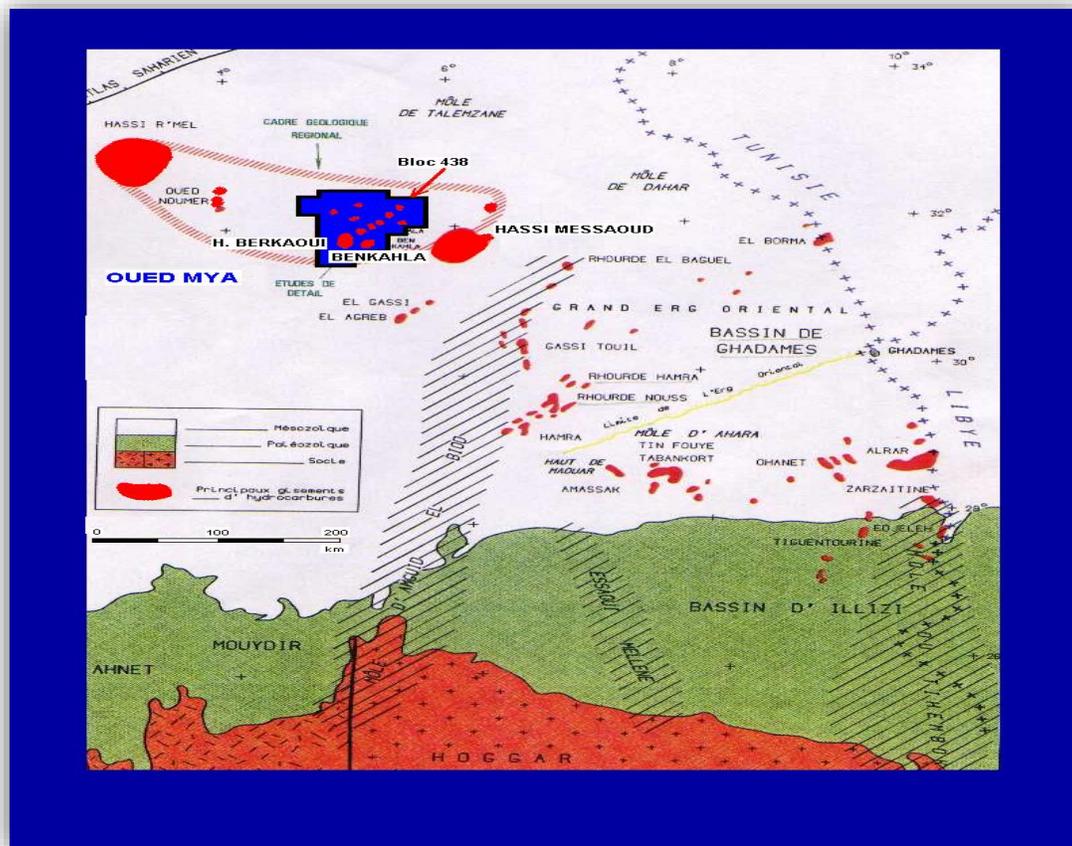


Figure n°02 : Situation géologique de Haoud Berkaoui

II. Etude de champ de Haoud Berkaoui :

II.1 Caractéristiques du réservoir :

On distingue deux blocs au niveau du gisement de Haoud- Berkaoui, divisés par deux failles majeures d'orientation sud- ouest /nord- est (bloc des OKN a l'Est et bloc des OKJ à l'Ouest).

Le trias argilo-gréseux a présenté des indices importants d'hydrocarbures. Il est composé de T2, T1 et la série inférieure (SI) dont deux (O2) sont productifs (T1 et SI), le troisième niveau (T2) est généralement compact. Les caractéristiques pétrophysiques de ce champ sont mentionnés dans le tableau précédent.

II.2 Aspect structurel :

La structure de Haoud- Berkaoui constitue la plus grande structure du bassin d'Oued- Mya. Elle a été soumise à plusieurs accidents structuraux créant un ensemble de failles dont les principales sont des failles normales subméridiennes de même direction qui définissent un hors central.

Le top du trias argilo-gréseux se situe à une profondeur moyenne de 3300 à 3500m. La structure est un anticlinal orienté nord-sud d'environ 22km de long et 15km de large, avec un relief vertical de l'ordre de 300 m au- dessus du contact huile/ eau.

II.3 Stratigraphie du champ de Haoud-Berkaoui : (voir figure n°03)

II.3.1 Cénozoïque :

Il est généralement représenté par les dépôts détritiques du Moi-Pliocène sur une épaisseur de 0 à 50 m environ. Il est constitué d'alternance de grès roux et beige, ciment calcaire et calcaire gréseux roux avec passées de sable blanc et de grès peu consolidés.

Cette formation repose en discordance alpine sur le Mésozoïque.

II.3.2 Mésozoïque : Il se compose de :

- **Crétacé :** il est sur toute l'étendue du bassin. Sa partie inférieure comporte des grès et des argiles continentales, alors que sa partie supérieure est composée essentiellement de carbonates et des sédiments argileux marins. Sa subdivision du bas vers le haut est comme suit :
 - **Néocomien :** c'est un ensemble Argileux, carbonaté par endroit avec quelques intercalations d'argile. Son épaisseur est de l'ordre de 180 m ;
 - **Barrémien :** il est constitué de grès brun rouge, fins à moyens, qui passe à du sable fin à grossier avec des intercalations d'Argile et de calcaire. Son épaisseur est de 350m ;

- **Aptien** : c'est une série carbonatée et dolomitique issue d'un dépôt marin sur une grande étendue. Elle est constituée d'une couche d'épaisseur comprise entre 20 à 30 m qui est facilement identifiée lors du forage et sur les logs de diagraphie ;
 - **Albien** : c'est un ensemble de grès et d'argile de 400 à 470 m d'épaisseur, comportant quelques intercalations dolomitiques ;
 - **Cénomaniens** : c'est une alternance de grès et d'argile dolomitique accompagnée d'une présence d'anhydrite. Son épaisseur moyenne est de 130m ;
 - **Turonien** : il est constitué d'un dépôt marin carbonaté légèrement dolomitique dont la partie supérieure est un calcaire avec de fines passées argileuses à la partie inférieure. Son épaisseur moyenne est de 80m ;
 - **Sénonien** : Il est composé de :
 - Sénonien lagunaire à la base constituée essentiellement d'anhydrite et de carbonate dont l'épaisseur est de 400 m environ ;
 - Sénonien carbonaté au sommet caractérisé par une dominance de carbonate, et dont l'épaisseur moyenne est de 160m.
- **Jurassique** : il comprend du bas au haut :
- **Lias salifère** : c'est une formation de 80m d'épaisseur, formée de sels massifs avec des fines passées d'argile ;
 - **Lias anhydritique** : c'est une alternance à dominance anhydritique. Son épaisseur est de 260m environ ;
- **Dogger** : il comprend :
- **Dogger lagunaire** : il est constitué de marne et d'argile grise avec des intercalations d'anhydrite blanche. Son épaisseur est de 110m environ ;
 - **Dogger argileux** : il est constitué d'argile grise, tendre à plastique parfois siliceuse. Son épaisseur est de l'ordre de 205m.
- **Malm** : il est constitué d'argile rouge, tendre à plastique parfois sableuses à passées de dolomie beige cristalline dure. Son épaisseur peut atteindre les 200m.
- **Trias** : il est représenté par :
- **Le trias argilo-gréseux** : il renferme les principaux réservoirs de la région. Il est constitué du bas vers le haut de :

- **Série inférieure** : elle représente le principal réservoir de la région avec une épaisseur de 50m, constituée par des roches gréseuses intercalées par des roches argileuses ;

- **Série éruptive (andésites)** : c'est une série volcanique avec une épaisseur variable constituée par des roches éruptives ;

- **Trias argilo- gréseux T1** : cette formation représente le réservoir secondaire de la région dont l'épaisseur varie de 15 à 34 m. Il est constitué de :

- Argile brun- rouge à grise, dolomitique et silteuse par endroit
- Grés fins gris à brun- rouge à ciment d'argile et carbonate
- Argile brun- rouge légèrement dolomitique.

- **Trias argilo- gréseux T2** : cette formation représente les indices de présence d'huile mais vue sa compaction, elle n'est exploitée que dans quelques puits. Elle est constituée par des grés fins cimentés par du sel.

- **Le trias argilo-salifère** : c'est une excellente couverture aux différents réservoirs triasiques, elle est constituée de deux ensembles qui sont respectivement de bas en haut :

- **Le trias argileux** : c'est la couche couverture des réservoirs triasiques, son épaisseur est de l'ordre de 120m. Elle est constituée essentiellement d'argile ;
- **Le trias salifère** : c'est une alternance de sel, d'anhydrite et d'argile. Son épaisseur est de l'ordre de 450m.

II.3.1 Paléozoïque :

Le gothlandien a été le premier et le seul horizon paléozoïque reconnu entièrement sous la discordance triasique. Il constitue la roche mère principale du bassin triasique dont l'épaisseur est de 20m. Il est représenté essentiellement par des argiles indurées et sorteuses à noir, quelquefois plastiques, avec des intercalations de grés fin blanc à gris beige. La zone carbonatée radioactive apparaît à partir de 3653m.

Age	Prof Moyenne		Etages	Stratigr.	Lithologie	Epaisseur	
	Mio-Pliocène						
TERTIAIRE	65		S. Carbonaté		Calcaire dolomique	0 à 700 m	
	SENONIEN		S. Anhydritique		Anhydrite dolomie et argile		
			S. Salifère		sel massif		
CRETACE	SUP	752	Turonien Cenomanien		calcaire crayeux argile grise, anhydri. blanche, dol. marnes	300 à 900 m	
	INFERRIEUR	976	Albien		Gres fin à moy. à intercal d'arg. brun-rou et sable gr. à la base		
		1426	Aptien		Dolomie et marne		10 à 30 m
		1445	Barremien		Sable fin à très grossier passée de dolomie, calc et marne.		600 à 700 m
			Neocomien		Grès fin à moyen, passée d'argile et de lignite.		
	JURASSIQUE	SUP	1969	MALM			Argile silteuse à intercal. de dolomie, de calcaire et marne.	700 à 900m
MOY		2200	Dogger argil. Dogger Lag.		Argile indurée. Anhyd. et dolomie	120 à 300 m	
LIAS		2450	(Anhydritique Massive)		Anhydrite massive, blanche intcl. de dolomie et argile.		
			Sel massif I		sel massif hyalin		
			Horizon "B"		Argile dolomitique		
			Sel + Anhydr s2		sel massif p. arg. plastique		
			Sel Massif III		Sel massif incolore à rose		
TRIAS ARGILO-GRESEUX		3290	Argiles Sup.		Arg. plastique salifère calcaire dolomitique		
			Argilo-sal. S4		sel incolore		
			argile inf.		Argile silteuse		
	T2 T1			Grès fin argilo-silteux Grès Argileux	100 à 250m		
	Andesites Serie Infer.			Andesite altérée Grès fin à moyen			
DEVONIEN inf	3460	Devonien Inf.		Argiles noires. grès fin à moyen	100 à 130 m		
SILURIEN	3580	Silurien radioa.		Argiles noires radioactives, fossili-	60 à 65 m		
ORDOVICIE	DALLE DE MKRATA			Grès quartite et Argiles	12 A 25 m		
	ARGILES MICRO-CONGLOMERAT			Argiles noires, micro-conglomé	90 à 100 m		
	GRES D'OUED SARET			Argiles noires, passées Grès	50 à 70 m		
	ARGILES D'AZEL			Argiles noires, passées Grès	40 à 50 m		
	GRES D'OUARGLA			Argiles noire, passées Grès	120 à 140 m		
	QUARTZITES DE HAMRA			Quartzite et grès quartzite fissurés	90 à 110 m		
	GRES D'EL ATCHANE			Grès fin, intercalations argileuses	49 m		
	ARGILES D'EL GASSI			Argiles noires silteuses, grés-argileux	>10 m		

Figure n°03 : Coupe stratigraphique du champ de Haoud Berkaoui

II.4. Aperçu sur le forage :

Tous les puits à HBK sont forés verticalement, sauf quelques puits qui ont subi des faibles déviations. Les différentes phases de forage d'un puits dans le champ sont indiquées ci-dessous.

- **Phase de démarrage (26")** : à environ + 260 m
- **Phase de forage 17"^{1/2} ou 16"** : à environ ± 770 m
- **Phase de forage 12"^{1/4}** : à environ ± 2600 m
- **Phase de forage 8"^{1/2}** : fond à ± 3450 m
- **Phase 6"** : c'est la phase la plus intéressante qui traverse le réservoir

L'objectif principal de la phase 6" est la Série Inférieure du Trias. Les Grès du réservoir T1 constituent un objectif secondaire dans le cas où le tubage 7" est posé dans le T2.

La boue de cette phase est alourdie avec du Carbonate de Calcium (CaCo₃), produit acidifiable qui n'endommage pas le réservoir. La densité requise est généralement :

- **d = 0.90 à 1.20** si les Grès du T1 sont couverts par le tubage 7"
- **d = 1.40 à 1.50** si les Grès du T1 sont en découvert 6".

Cote d'arrêt : 50m dans le Silurien (à environ ± 5550 m).

Le problème anticipé au cours de forage de cette phase est le risque de venue de gaz des grès du T1 s'ils sont en découvert.

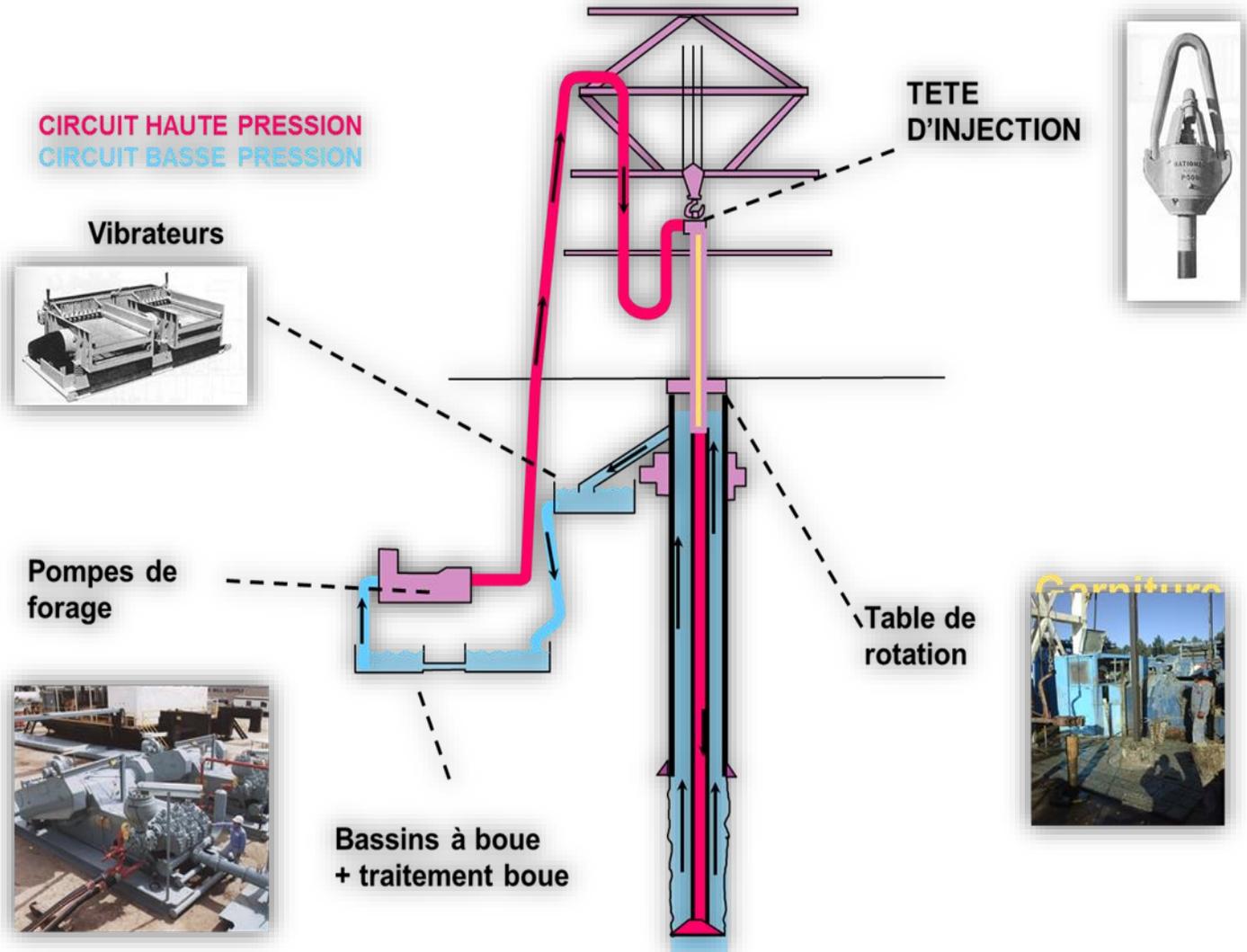


Figure n°04 : Circuit de la boue de forage

I. Introduction

Les boues de forage sont d'importance primordial et indispensable pour la réalisation d'un forage ce qui nécessite une bonne connaissance des paramètres et les caractéristiques des différentes boues ainsi que d'apporter aux boues toutes les soins nécessaires à leur fabrication, leur control et à leur entretien en cours d'utilisation.

Le technicien de la boue de forage (le boueux) doit maitriser les propriétés et les fonctions de la boue pour avoir une boue qui répond aux exigences de forage et de plier aux problèmes qu'on peut rencontrer dans le puits afin qu'on puisse atteindre l'objectif dans les meilleurs conditions.

II. Historique [4]

Notre recherche bibliographique nous a permet de statuer que c'est sur le champ de SPINDLETOP près de BEAUMONT (TEXAS) [4] que la boue fut utiliser pour la première fois par le capitaine Lucas .Historiquement, les fluides de forage ont évolues d'un simple mélange d'eau et d'argile appelé 'boue' vers des systèmes de plus en plus complexes composés de l'eau ou de l'huile avec une multitude d'additifs répondant aux caractéristiques requises et aux problèmes rencontrés.

On peut diviser l'historique de la boue en quatre périodes :

- Avant 1901 : période artisanale : les fluides de forage étaient constitués essentiellement de l'eau et l'on n'attachait aucune importance à ces fluides.
- De 1901 au 1928 : période empirique : jusqu'à cette période qu'on a commencé a donné l'importance à la mesure de la densité et à partir de 1920 on utilisait le sulfate de baryum pour alourdir et s'opposer aux éruptions de l'huile et de gaz.
- De 1928 au 1955 : période expérimentale. de nombreux chercheurs se penchent sur l'étude expérimentale des fluides et les progrès deviennent très vite sensibles. La première société de service de boue se crée aux États-Unis.
- A partir de 1955 : période technique : c'est la période technique et scientifique, actuellement il existe plusieurs sociétés spécialisées dans l'étude et la commercialisation des produits de boue et de nos jours il y a l'apparence de plusieurs types de boues qui répond aux exigences de forage (boue à base d'huile, boue a polymères ...)

III. Rôles des boues de forage

III.1. Nettoyage du puits :

C'est la fonction principale, elle permet de débarrasser le puits des particules des formations forées qui se présentent sous forme de débris de roche appelé « cuttings » ou « déblais » ; ceci contribue à un meilleur avancement de forage et le prolongement de la vie de l'outil.

III.2 Maintien des déblais en suspension :

Le fluide de forage doit non seulement débarrasser le puits des déblais de forage durant la période de circulation mais elle doit également les maintenir en suspension pendant les arrêts de circulation pour éviter la sédimentation autour de la BHA ce qui entraîne des problèmes de coincement.

III.3 Sédimentation des déblais fins en surface :

Après leur passage de la boue sur les toiles des vibrateurs le fluide de forage ne conserve en suspension que les particules les plus fines et les plus denses qui doivent être éliminées par la décantation de ces derniers tout au moins partiellement.

III.4 Maintien des parois du trou :

Une boue de qualité doit être susceptible de disposer un cake sur les parois des trous, pour les consolider et réduire le filtrat dans les formations poreuses et perméables. Ce cake permet de prévenir la formation des caves d'une part (causées par les éboulements et par la dissolution des sels dans les formations ou dispersion des argiles) ; et d'autre part les resserrements causés par une insuffisance de la pression hydrostatique de la boue qui ne peut pas équilibrer la pression géodynamique des formations.

III.5 Lubrification et refroidissement de l'outil et train de sonde :

Le contact de la garniture de forage avec les parois du puits génère une très grande chaleur en plus de gradient géothermique. Donc la boue doit réduire efficacement l'échauffement de la garniture et de l'outil.

III.6 Maintien en place les fluides des formations traversés :

La boue de forage permet de maintenir en place les fluides des formations traversés (eau douce, salée..., poche de gaz) par l'action sur la densité on peut varier la pression hydrostatique au fond du puits et contrôler les venues des fluides à pression élevée en exerçant en tous points du trou une contre pression proportionnelle à la densité et à la profondeur de point en usage

$$P_h = \frac{H \cdot d}{10} \quad [\dots \text{Eq} 1.1]$$

P_h : pression hydrostatique (bar)

H : profondeur (m)

D : densité

III.7 Allègement de la garniture de forage :

Grace à la poussée d'Archimède lorsqu'un corps est émergé totalement ou partiellement dans un fluide, la perte apparente de poids est égale au poids de liquide déplacé.

$$P_l = P_r - V \cdot \rho \quad [\dots \text{Eq} 1.2]$$

P_l : poids d'un corps dans un fluide (kg)

P_r poids de corps dans l'air (kg)

V : volume de corps (m^3)

ρ : masse volumique de fluide (m^3/kg)

III.8 Apport des renseignements sur le sondage :

La boue permet d'obtenir des renseignements permanents sur l'évolution des formations et les fluides rencontrés, ces renseignements sont de plusieurs natures :

-Les cuttings remontés par la circulation de la boue permettent de faire une analyse géologique en surface afin d'avoir des informations sur les terrains traversés.

-L'évolution des caractéristiques physique et/ou chimiques de la boue donne des informations sur les fluides de formation.

-La détection des gaz ou autres fluides permet en effectuant des mesures sur de préciser l'évolution de la concentration en hydrocarbures

III.9 Entraînement de l'outil (turbine, MWD....) :

Dans le turboforage l'énergie hydraulique est transformée en énergie mécanique au niveau des moteurs de fond pour donner un mouvement rotatif à l'outil car ce dernier est directement vissé au rotor de la turbine.

III.10 Augmentation de la vitesse d'avancement :

Au même titre que le poids sur l'outil, la vitesse de rotation et le débit du fluide, le choix du type et les caractéristiques de la boue conditionne la vitesse d'avancement instantané, la durée de vie des outils, le temps de manœuvre ce que veut dire les performances de forage.

Un filtrat élevé augmente la vitesse d'avancement. Les très faibles viscosités sont aussi un facteur favorisant la pénétration de l'outil.

III.11 La boue ne doit pas être corrosive ou toxique ou contaminante pour formation productrices

- **Corrosif** : la boue peut accélérer l'usure de matériels de sondage si elle recèle des matériaux corrosifs, elle peut avoir aussi une action corrosive électrolytique qui devra être minimisée en ajustant son équilibre chimique.
- **Toxique** : La boue de forage ne devra pas présenter de danger pour la santé de personnels et elle ne devra n'ont plus créé un risque d'incendie et de présenter un danger pour l'environnement.
- **Contaminants pour les formations productrices** : Afin d'éviter le colmatage ou l'endommagement des formations productrices il est indispensable de choisir un type de boue ayant la composition et les caractéristiques les mieux adaptés à la nature de la formation et les fluides qu'elles contiennent.

IV. Principaux produits des boues de forage :

Un très grand nombre de produits sont employés dans les fluides de forage. Certains ont un rôle particulier, d'autres ont un rôle multiple.

Les principaux produits employés dans les boues vont être examinés.

IV.1. Les colloïdes argileux

IV.1.1. Les bentonites :

Les bentonites sont des argiles sodiques du type montmorillonite qui présentent la propriété de se disperser dans l'eau douce en absorbant de grandes quantités d'eau. Les bentonites sont employées pour augmenter la viscosité et les gels des boues douces et diminuer leur filtrat. En milieu salé (plus de 35 g/l de Na Cl), les bentonites sont inefficaces et ne servent alors que de support colloïdal.

- Bentonite standard a un rendement $> 16 m^3$ /tonne
- Super Bentonite a un rendement $> 30 m^3$ /tonne

IV.1.2. Les attapulgites :

Les attapulgites sont des argiles du type Sépiolite qui présentent la propriété de gonfler et de rester en suspension en milieu salé. Cette propriété est employée pour augmenter la viscosité et les gels des boues salées (> 35 g/l de Na Cl). Cependant, ces argiles ne présentent aucune capacité à réduire le filtrat.

IV.2. Colloïdes organiques :

IV.2.1. L'amidon :

Les amidons pour boues de forage sont extraits des pommes de terre, du riz, du maïs, du blé et traités spécialement pour gonfler rapidement même dans l'eau froide et non alcaline.

L'amidon est ajouté dans les boues douces ou salées pour réduire le filtrat. Son emploi exige cependant que l'une de ces trois conditions soit satisfaite :

- ✓ pH > 12
- ✓ présence anti-ferment
- ✓ salinité supérieure à 200/250 g/l.

Un bon amidon doit réduire le filtrat sans trop augmenter la viscosité de la boue et il doit résister à une température de $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

IV.2.2. Les CMC :

La C.M.C., abréviation de carboxyméthylcellulose, est un colloïde organique infermentescible à longue chaîne. Ils sont classés en trois catégories en fonction de la viscosité qui donnent à la boue de forage

- ✓ Basse viscosité
- ✓ Moyenne viscosité
- ✓ Haute viscosité.

Les C.M.C. ne doivent pas être utilisées dans les zones acidifiables.

IV.3. Les fluidifiants et défloculants :

IV.3.1. Les tanins : Les plus utilisés sont les tanins de Quebracho extrait des courses des arbres en Venezuela et les tanins de châtaignier.

Le PH de tanins non traité est de 4.

IV.3.2. Les lignosulfonates : sont extraits des pâtes à papiers par traitement (à l'aide de l'acide sulfurique de métal lourd).

IV.3.3. Les lignines : Ils sont extraits de bois, ils sont utilisés en association avec les lignosulfonates et augmentent les propriétés de ce dernier.

IV.4. Les additifs minéraux :

IV.4.1. La soude caustique (Na OH) : Il est employé essentiellement pour accroître le rendement des argiles et augmenter le PH et accroître le rendement des produits organiques.

IV.4.2. Le carbonate de soude ($\text{Na}_2 \text{CO}_3$) : Il est employé pour accroître le rendement des argiles

IV.4.3. Le bicarbonate de soude (Na HCO_3) : Il est utilisé lors de reforage de ciment pour précipiter les chaux libérées par le ciment.

IV.4.4. Le gypse ($\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) : Ils sont employés pour fabriquer des boues au gypse lors du forage de gypse et d'anhydrite.

IV.4.5. La chaux éteinte (Ca(OH)_2) : Elle est employée pour augmenter la viscosité d'une suspension d'argile préalablement hydratée dans l'eau, et aussi employée comme fluidifiant dans certaines boues salées saturées.

IV.4.6. Le sel (Na Cl) : Il est employé pour fabriquer des boues salées saturées, lorsqu'on doit forer des zones salifères.

IV.4.7. Le chlorure de calcium (Ca Cl_2) :

Il est utilisé lorsqu'on désire confectionner des boues contenant une concentration en calcium avec un filtrat plus élevée que celle que peut fournir le gypse. Il est utilisé pour certaines boues à émulsion inverse.

IV.5. Les produits organiques spéciaux :

IV.5.1. Les anti-ferments : Ces produits sont utilisés pour empêcher la fermentation des colloïdes organiques (amidon, gommes...), on utilise les dérivés phénoliques.

IV.5.2. Les anti-mousses : Ces produits favorisent le dégazage des boues de forage comme les stéarates d'alumine, les alcools supérieurs et les tensioactifs.

IV.5.3. Les agents de décoincement : Les coincements se produisent au niveau des zones perméables, l'injection d'un bouchon d'huile avec un tensioactif cationique, dans les

boues à l'eau permet à celui-ci de s'infiltrer entre le cake et le métal et de décoincer la garniture.

IV.5.4. Les produits A.F : (antifriction) sont en fait des lubrifiants permanents. Citons le graphite en poudre, les billes de verre, l'asphalte ...

IV.5.5. Les produits E.P : (extrême pression) : sont en fait des « anti-grippants » et des anticorrosion.

IV.5.6. Les anti-bourrages : Ces additifs empêchent les argiles forés de se coller sur le métal des outils, ce qui évite le bourrage, on peut citer : les glycols miscibles.

IV.6. Les alourdissants

IV.6.1. La baryte ou sulfate de baryum ($Ba SO_4$) : $d= 4.2 - 4.3$

C'est l'alourdissant le plus couramment utilisé, une barytine de qualité ne doit pas contenir des argiles ou de sels et sa granulométrie doit être convenable pour ne pas sédimenter ni augmenter la viscosité.

IV.6.2. Carbonate de calcium ($Ca CO_3$) : $d=2.7$

C'est un alourdissant utilisé principalement dans les fluides de complétion, il est aussi employé comme alourdissant primaire pour les boues à l'huile.

IV.6.3. La Galène ou sulfure de plomb (Pbs) : $d=7.8$

Alourdissant employé pour avoir une densité exceptionnel mais on doit alourdir d'abord avec ($Ba SO_4$).

IV.7. Les colmatants :

Les produits colmatants naturels ou synthétiques sont en nombre considérables, ils sont classés de la façon suivante :

- ✓ Colmatants granulaires
- ✓ Colmatants fibreux
- ✓ Colmatants lamellaires
- ✓ Colmatants gonflants
- ✓ Colmatants a prise.

V. Type et composition des boues de forage :

Les types des fluides utilisés dans le forage sont évolués suite aux problèmes techniques et économiques rencontrés durant la réalisation du puits.

Plusieurs classification des fluides de forage peuvent être adoptées, il est cependant habituel de présenter les fluides en fonction de la nature de leur phases continues. Nous allons donc rencontrer :

- Les boues à base d'eau
- Les boues à base d'huile.
- Les fluides de forage gazeux.

V.1. Les boues à base d'eau :

Ces fluides sont souvent désignés par « Water-Based Muds ». Ils sont dans la plupart des cas constitués par des suspensions de Bentonites dans l'eau, dont les caractéristiques rhéologiques de filtrat sont souvent ajustés par des polymères. La nature des électrolytes et leur concentration dans la formulation de la boue à l'eau sont choisies en prenant en compte les caractéristiques de la formation.

Ces boues sont constituées de 3 éléments distincts :

V.1.1. L'eau de fabrication : Peut-être

- Une eau douce,
- Une eau salée (7 à 35g/l)
- Une eau salée saturée (358g/l de Na Cl avec densité de la saumure est de 1.20 kg/l)
- L'eau de mer dans le cas d'un forage Offshore.

Une eau dur (c'est une eau qui contient beaucoup de sels, calcium, sodium, magnésium..) et cette eau peut diminuer le rendement d'une argile et la solution c'est d'adoucir cette eau en utilisant le Na OH.

V.1.2. Les argiles :

Sont utilisés dans les boues à base d'eau pour donner la viscosité et de réduire le filtrat, les argiles utilisés sont :

La bentonite dans le cas d'une eau douce ou salée et l'attapulgite dans le cas d'une eau salée saturée.

V.1.3. Les solides inertes :

Sont des produits insolubles dans l'eau et ils ne doivent agir que par effet de masse, ces produits sont la barytine, le Galène....

Ces boues contiennent d'autres produits spéciaux pour les traitements divers tels que :

- Les réducteurs de filtrat : CMC, PAC (cellulose poly anionique), résines
- Les inhibiteurs de gonflement d'argile (KCl, glycérol, silicates, divers polymères)...

V.2. Les boues à base d'huile :

L'origine d'utilisation de l'huile dans les fluides de forage remonte aux premiers forages effectués à Oklahoma City (1934-1937) [5] au cours desquels on a constaté une amélioration des performances de forage après l'ajout de l'huile brute.

Les fluides à base d'huile sont des fluides dans la phase continue est une huile minérale (pétrole brut, fuel, gasoil) et la dispersé est de l'eau. On distingue des boues à l'huile contenant 5 à 15% d'eau au maximum et les boues à émulsion inverse peuvent contenir jusqu'à 50% d'eau (présent les mêmes caractéristiques que les boues à base d'huile), pour ces 2 types de boues l'émulsion formée est toujours l'eau dans l'huile et stabilisé en utilisant des polymères.

Tout comme les boues à base d'eau les boues à base d'huile sont constituées par trois éléments distincts :

- ✓ **L'huile** : qui peut être une huile raffinée ou du brut et l'eau d'émulsion qui peut être douce, salée ou salée saturée.
- ✓ **Les savons et les argiles organophiles** : qui donne la viscosité à la boue et réduisent le filtrat.
- ✓ **Les solides inertes** : sont les mêmes les boues à base d'eau (la barytine, carbonate de calcium, galène...).

On trouve aussi dans ces boues les réducteurs de filtrat (composé asphalténique et polymères) et d'autres additifs spéciaux pour les différents traitements de la boue suivant les problèmes rencontrés.

V.2.1. Domaine d'utilisation :

A cause de leur prix élevé (environ 400 dollars/m³) et leurs compositions complexes et leur nuisance pour l'environnement, on les utilise que dans les cas suivants :

- Forage des argiles gonflantes
- Forage des couches salifères
- Forage des puits profonds causant des problèmes de hautes températures.
- Reprise des puits et entretien des puits productifs
- Forage et carottage des réservoirs

NB : [27]

En Algérie (Hassi Massaoud) à cause de la géologie complexe des champs et les problèmes rencontrés lors de forage on utilise souvent les boues à base d'huile à part la première phase (ou on utilise les boues bentonitiques).

V.2.2. Avantages des boues à base d'huile :

- Le control facile des caractéristiques en absence des venues d'eau ou de brut.
- L'insensibilité aux contaminations.
- Cake très mince.
- La possibilité de forer a une densité proche de 1.
- La réduction des frottements de la garniture avec les parois
- L'augmentation de la durée de vie des outils a molettes
- Diminution de risques de collage par pression différentielle
- La meilleure récupération des carottes
- L'augmentation de la productivité
- L'endommagement moindre de la formation.

V.2.3. Inconvénients :

- Une boue très polluante pour l'environnement
- Sensibilité à l'eau et à certains bruts
- Risque de sédimentation des alourdissants
- Risque d'incendie
- La détérioration des caoutchoucs non spécifiques aux hydrocarbures
- La difficulté pour déceler la présence de l'huile dans les déblais
- Certaines méthodes de diagraphie instantanées et différées ne sont applicables
- Prix de revient élevé
- Difficulté de la détection des venues de gaz dans ces boues et leurs control

V.3. Les fluides de forage gazeux :

Les fluides de forage gazeux sont les fluides dont la phase continue est de gaz mélangé avec de l'eau en proportions variables provenant de la formation traversée ou ajouté intentionnellement. Le gaz peut être de l'air ou de gaz naturel et peut appartenir une mousse ou un brouillard.

Ces fluides sont utilisés dans le cas de forage en « underbalance drilling » et ils nécessitent des équipements spéciaux dans le circuit.

On distingue les fluides gazeux suivants :

V.3.1. Forage à l'air :

Il a commencé en 1940 [4], l'air est le fluide de forage qui possède la plus basse densité et le prix de revient est moins élevé mais le forage est difficile lors d'une venue importante de l'eau. Il apporte une solution à des problèmes compliqués parfois impossible à résoudre avec les méthodes de forage conventionnelle.

V.3.1. Forage à la mousse :

Ce sont des dispersions de volume de gaz relativement important dans un liquide relativement faible, elles sont utilisées comme fluide de forage lorsque les terrains traversés sont fracturés ou lorsque le forage à l'air est impossible parce que la pression nécessaire ne peut être fournie sur le chantier. Leur avantage se résume par sa faible pression hydrostatique au fond et son excellent pouvoir de remonter les déblais

V.3.2. Forage à la boue aérée :

Utilisé afin d'éviter les pertes de circulation et avoir un fluide de forage plus léger. Ces avantages sont une bonne tenue des parois grâce à un cake contrôlé, une tendance aux pertes de circulation fortement réduite et une vitesse d'avancement plus grande, une assez bonne capacité de refroidissement de train de sonde.

VI. Caractéristiques des boues de forage :

Tout comme la formulation des boues, le contrôle et la caractérisation des boues de forage sont réalisés selon des normes précises édités par l'API [7]. Ces caractéristiques peuvent être classées en trois (03) catégories : physiques, électrochimiques, rhéologiques.

VI.1. Caractéristiques physiques :

VI.1.1. Densité :

La densité est le rapport de la masse volumique d'un corps sur la masse volumique d'un corps de référence dans les conditions qui doivent être spécifiés pour les deux corps (l'eau à 4°C pour les liquides et les solides et l'air pour les gaz). Elle s'exprime avec un nombre sans dimension.

La masse volumique est le rapport de la masse d'un corps sur son volume dans des conditions définies de la température et de la pression.

La densité joue un rôle très important car elle est directement liée à la pression hydrostatique exercé par la boue au fond du puits donc elle doit être suffisamment élevé pour contrebalancer la pression exercé par les fluides de formation et il ne doit pas être trop élevé pour ne pas fracturer la formation.

$$P_h = \frac{H d}{10} \quad [\dots \text{Eq 1.3}]$$

P_h : pression hydrostatique en (bar)

H : profondeur en (m)

d : densité de la boue.

On mesure la densité sur le chantier avec un "densimètre" présenté ci-dessous :

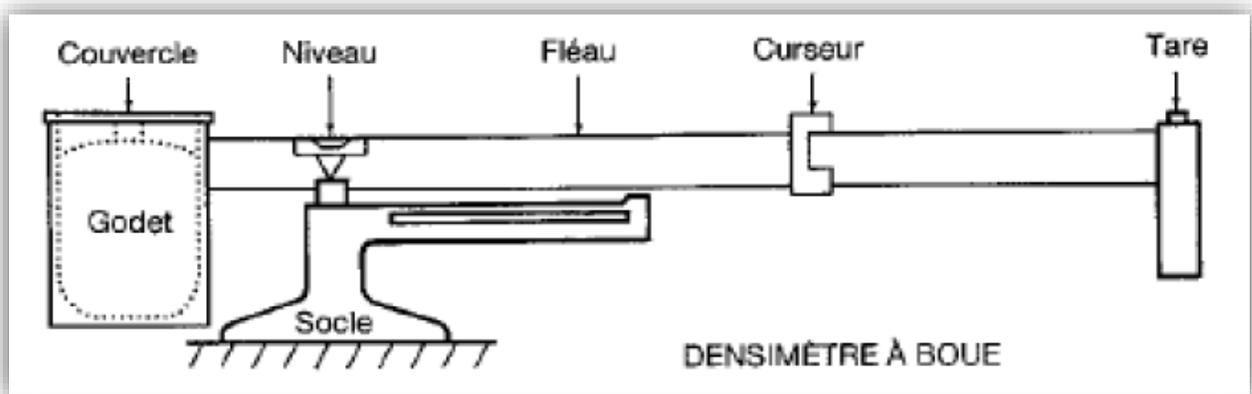


Figure n°05 : Densimètre à boue

On distingue aussi « la densité équivalente de circulation (ECD) » qui est la résultante des pertes de charges de circulation dans l'annulaire plus la densité de la boue, elle présente la densité réelle pendant le forage.

$$ECD = \frac{\text{Perte de charge dans l'annulaire (bar)} \times 10}{\text{Profondeur vertical}} + \text{densité de la boue} \quad [\dots \text{Eq 1.4}]$$

VI.1.2. Concentration en sable :

On appelle les sables les particules qui ne passent pas sur les tamis de 200 mesh (particules de diamètre supérieur à **74 μm**), les particules ayant un diamètre inférieur à **74 μm** appelés silt.

Il est recommandé de tenir la teneur en sable inférieure à 1% en volume par des dessablages car l'augmentation de la teneur en sable rend la boue abrasif pour le matériel tubulaire et aussi augmente la densité de la boue. On mesure la teneur en sable par un « élutriomètre ».

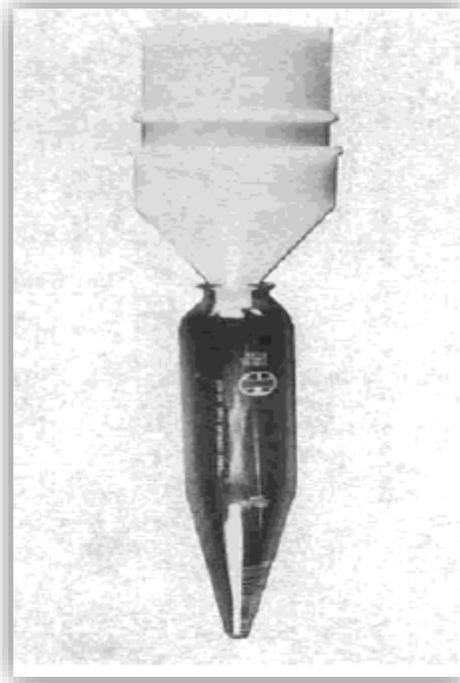


Figure n°06 : Un élutriomètre

VI.1.3. Filtrat et cake :

Lorsque la boue se trouve en contact avec des parois plus ou moins perméables du puits ; la partie liquide de la boue s'infiltré dans la formation en déposant sur les parois la partie solide qu'on appelle cake. Il est important de connaître les caractéristiques de filtration car les hauts filtrats peuvent déliter les formations délicates (argiles, marnes...), favorisent les éboulements et endommagent les réservoirs ; en plus un cake très épais réduit le diamètre du trou et peut engendrer des collages et même des coincements.

Dans le forage pétrolier, on connaît deux (02) types de filtration :

- ✓ **Filtration statique** : qui prend place lorsque le fluide est en statique dans ce cas le cake s'épaissit continuellement.
- ✓ **Filtration dynamique** : lorsque le fluide est en circulation l'épaisseur de cake est limitée par l'action érosive de la boue en mouvement. La vitesse de filtration en dynamique est donc plus uniforme qu'en statique cela signifie que l'invasion dans les conditions dynamiques sera plus importante.

Les propriétés de filtration sont souvent évaluées par Filtre-presse qui nous donne qu'un aperçu sur le phénomène même dans le cas d'utilisation d'un filtre presse HP/HT (le filtrat c'est le volume du liquide récupéré en 30 minutes).

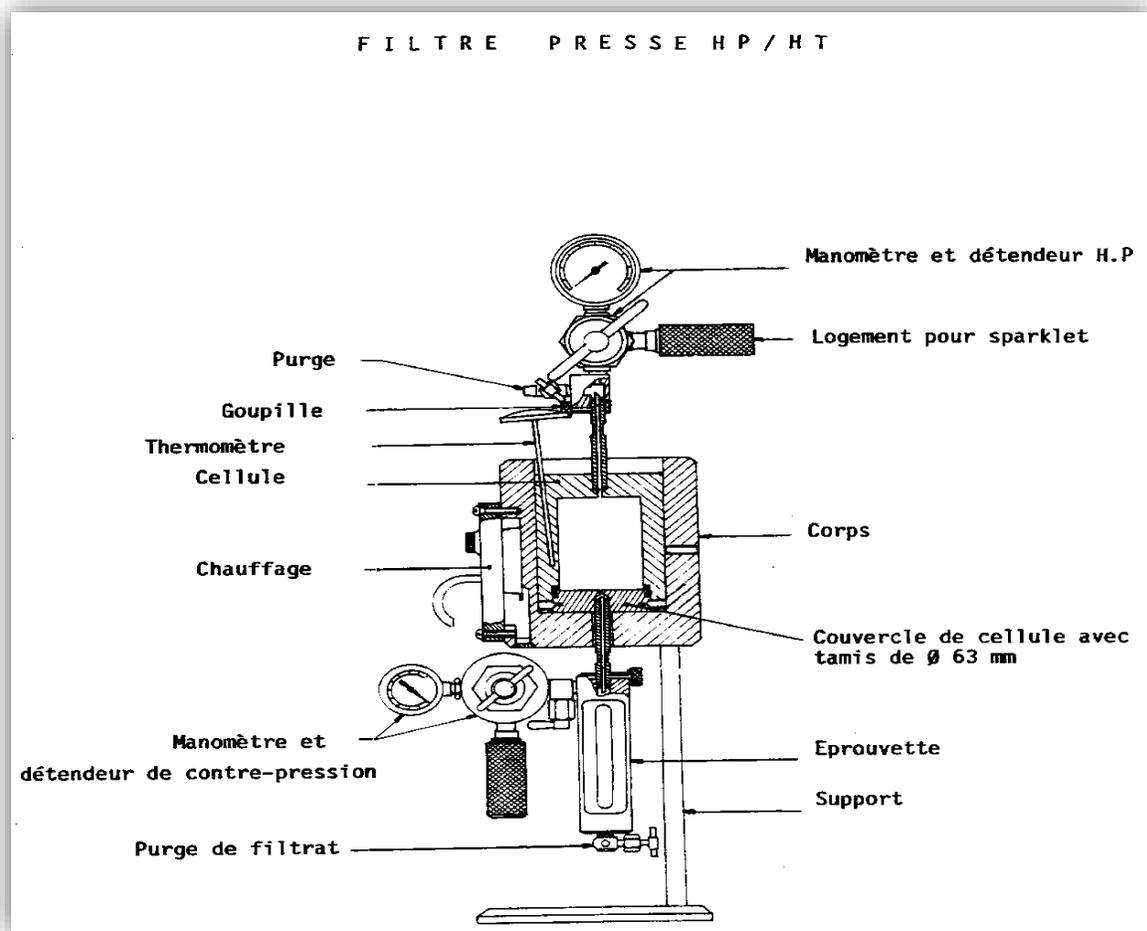


Figure n°07 : Filtrat-presse HP

VI.2. Caractéristiques électrochimiques

VI.2.1. Potentiel d'hydrogène (PH) :

L'acidité relative ou l'alcalinité d'un fluide est conventionnellement symbolisée « PH », elle est définie comme le négatif logarithmique décimal de la concentration des ions H^+ . Il est clair qu'il existe une inverse proportionnalité entre le PH et la concentration des ions d'hydrogène car l'augmentation en concentration de dix unités rapporte une diminution en PH d'une seule unité ($PH = \log \frac{1}{H^+}$)

L'utilité de Ph réside dans le control de l'efficacité de certaines boues (une boue bentonitiques à titre d'exemple doit avoir un PH de 8 à 9).

La mesure de PH est habituellement effectuée par un papier PH suivant un changement de couleur par suite d'émulsion en se référant à la couleur standard ou par utilisation d'un PH mètre à électrodes composite qui nous donnent une lecture directe.

VI.2.2. Alcalinité :

L'alcalinité détermine la concentration en ions OH^- , HCO_3^- et CO_3^{2-} par la mesure de la quantité d'acides nécessaire pour réduire le PH.

Dans l'Engineering de boue de forage, l'alcalinité de phénolphtaléine (P) est considérée comme étant le volume de H_2SO_4 à 0.02N nécessaire pour titrer un millimètre de filtrat (Pf) ou de boue (Pm) pour ramener le PH a 8.3

L'alcalinité de filtrat par le méthylorange mesure la quantité d'acide nécessaire pour ramener le PH à 4.3

VI.2.3. Capacité d'échange cationique :

L'essai de bleu de méthyle sert à indiquer la quantité d'argile active dans un système boue ; l'essai mesure la capacité totale d'échange cationique des argiles. Autrement, la phase argileuse peut être caractéristique et quelques estimations peuvent être déduites concernant la stabilité du puits.

VI.2.4. Conductivité électrique :

La résistivité de l'eau de fabrication de la boue doit être mesurée et contrôlée pour permettre l'évaluation régulière des caractéristiques de formation envers les enregistrements électriques.

Un test de stabilité électrique est utilisé comme indication de stabilité des émulsions (eau dans l'huile). L'opération consiste à immerger une sonde adoptée dans l'échantillon en question en imposant un courant électrique et en mesurant la conductivité du milieu par la suite.

VI.3. Caractéristiques rhéologiques (ils seront abordés avec plus de détails dans le chapitre suivant)

La rhéologie est la science qui étudie la déformation des corps en fonction des contraintes qui les provoque, la boue de forage sera ainsi définie par certains nombres de paramètres : viscosité, yield value, gels...

IV.3.1. Viscosité :

La viscosité définit la résistance à l'écoulement des substances, dans le domaine pétrolier ce terme est défini par la viscosité des fluides de forage. On distingue quatre types de viscosité :

✓ Viscosité Marsh :

Elle est utilisée comme indication relative au changement d'un fluide de forage. Elle est surtout utilisée pour évaluer rapidement les contaminations éventuelles qui peuvent modifier d'une manière importante les caractéristiques des fluides de forage, son principe est de mesurer le temps d'écoulement d'un volume déterminé de la boue à travers un alésage calibré d'un entonnoir dit « viscosimètre Marsh »



Figure n°08 : Un Viscosimètre Marsh

✓ **Viscosité effective :**

La viscosité d'un fluide non Newtonien est en fonction de la vitesse de cisaillement, sa viscosité effective (μ_e) est la viscosité sous les conditions spécifiques de la température et de la pression et de la vitesse de cisaillement.

✓ **Viscosité Fann :**

Le Fann est un appareil qui permet de déterminer le rhéogramme d'un fluide de forage, sa loi d'écoulement est représentée par la fonction :

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \quad [\dots \text{Eq 1.5}]$$

τ : tension de cisaillement (Pa)

$\dot{\gamma}$: taux de cisaillement (s^{-1})

• **Principe de viscosimètre Fann :**

C'est un appareil à cylindres coaxiaux, le cylindre intérieur est le rotor peut tourner à vitesse 3, 6, 100, 200, 300, 600 (tr/mn). Le cylindre extérieur est le stator.

L'espace entre les deux cylindres sera rempli de la boue et on détermine en fonction de temps de cisaillement (déduit de la vitesse de rotation), la tension de cisaillement déduite de la lecture de la graduation sur le viscosimètre.



Figure n°09 : un viscosimètre Fann

A partir des lectures sur le viscosimètre Fann avec les différentes vitesses on peut déterminer les caractéristiques suivantes :

✓ **La viscosité plastique :**

Elle est usuellement décrite comme la résistance à l'écoulement causé par les frictions (frottements mécaniques) et c'est une caractéristique qui est directement liée à la quantité des solides dans la boue : LGS (Low Gravity Solid).

$$\mu_p = \text{Lecture}_{600} - \text{Lecture}_{300} \quad [\dots \text{Eq 1.6}]$$

μ_p : viscosité plastique (Cp)

Lecture ₆₀₀ et **Lecture** ₃₀₀ : Lecture à la vitesse de rotation de viscosimètre Fann

✓ **La viscosité apparente :**

On la refaire généralement à la viscosité effective du fluide, c'est le rapport de la contrainte par la vitesse de cisaillement correspondante :

$$\mu_a = \frac{L_{600}}{2} \quad [\dots \text{Eq 1.7}]$$

μ_a : viscosité apparente [Cp] ou [Pa.s]

IV.3.2. Contrainte seuil (Yield Value) :

Les solides présents dans la boue de forage influencent un paramètre autre que la viscosité plastique qui est la contrainte seuil (exprimée en Pa ou en lb/100 ft²).

$$YP = L_{300} - \mu_p \quad [\dots \text{Eq 1.8}]$$

La contrainte seuil représente la résistance initial à vaincre pour que le fluide commence à s'écoule, cette résistance est due aux forces électrostatiques, attractive localisé à la surface des particules.

IV.3.3. Gels et thixotropie :

Une boue de forage laissée au repos édifie progressivement une structure qui augmente sa rigidité et qui peut être réduite par agitation. On appelle la thixotropie le fait que ce phénomène soit non instantané et réversible.

Le caractère thixotropie d'une boue est évalué en mesurant le « gel 0 » et le « gel 10 ». Le gel 0 représente la résistance du gel aussitôt après agitation de la boue (10sec). Ils sont mesurés à l'aide du viscosimètre Fann à une vitesse de 3tr/min et exprimé en lb/ft². Le gel 10 représente la résistance de gel après repos de la boue de 10 min.

Le gel 0 varie pratiquement comme la viscosité plastique et le gel 10 comme la contrainte seuil.

I. Introduction :

La rhéologie est une discipline qui traite les écoulements et les déformations des matériaux sous l'action de contraintes. La rhéologie a été développée pour décrire les propriétés des matériaux au comportement mal défini et intermédiaire entre celui de solide élastique parfait et celui de fluide newtonien. Le chapitre qui suit vise à définir les principaux paramètres rhéologiques ainsi que les différents types d'écoulement des fluides.

II. Contrainte et vitesse de cisaillement

II.1. Contrainte de cisaillement :

La contrainte de cisaillement (notée τ) est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparaît à l'interface de ces deux couches des forces de frottements qui s'exercent tangemment à la surface de la couche : elles sont appelées forces de cisaillement.

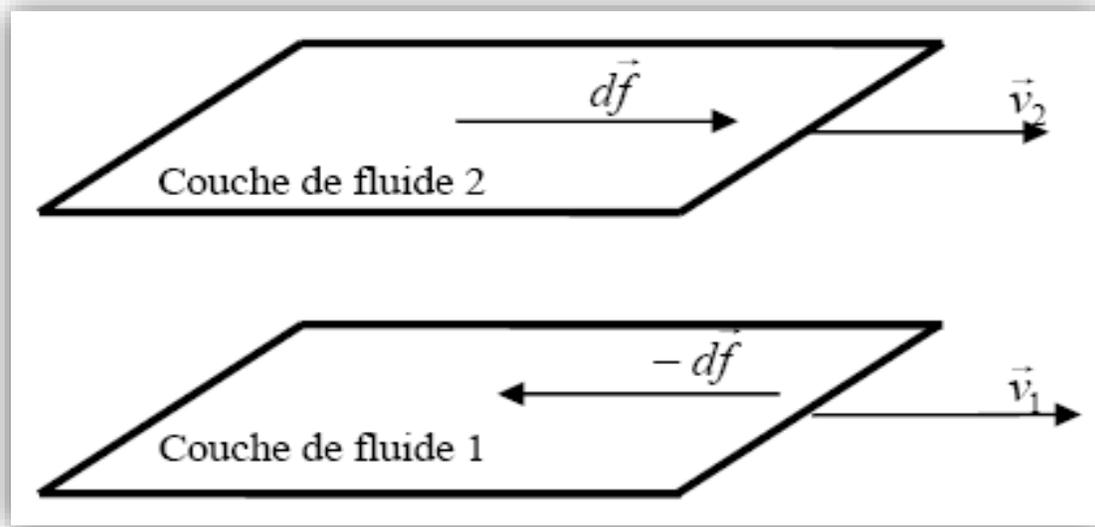


Figure n°10 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines

En supposant que la couche (1) est animée d'une vitesse V_1 supérieure à la vitesse V_2 de la couche (2), la couche (1) exerce sur la couche (2) une force de cisaillement dF parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche (2). La couche (2) exerce pour sa part sur la couche (1), une force de cisaillement $-dF$ tendant à la freiner. En rapportant ces forces de cisaillement à l'unité de surface, on définit la contrainte de cisaillement τ .

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad [\dots\text{Eq 2.1}]$$

τ : représente une force par unité de surface [N/m^2] ou [Pa]

dS : C'est la surface élémentaire

II.2. Déformation et vitesse de cisaillement :

La vitesse maximal de l'écoulement est situé à la limite supérieur et décroît à travers l'entrefer d'épaisseur 'e' jusqu'à la vitesse minimale $V_{\min} = 0$ m/s, la limite inférieur correspondant au contact avec la plaque fixe.

La vitesse de cisaillement notée $\dot{\gamma}$ caractérise la variation de la vitesse (dV) entre l'épaisseur des couches limites (de) et s'exprime sous les forme suivante.

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dV}{de} \quad (\text{s}^{-1}) \quad [\dots\text{Eq 2.2}]$$

La valeur $\dot{\gamma}$ dépend non seulement de la vitesse de déplacement de la plaque mobile dV mais aussi de l'épaisseur 'e' cisailée. Si 'e' est faible, il est possible d'obtenir des $\dot{\gamma}$ élevées même avec des vitesses V relativement faible.

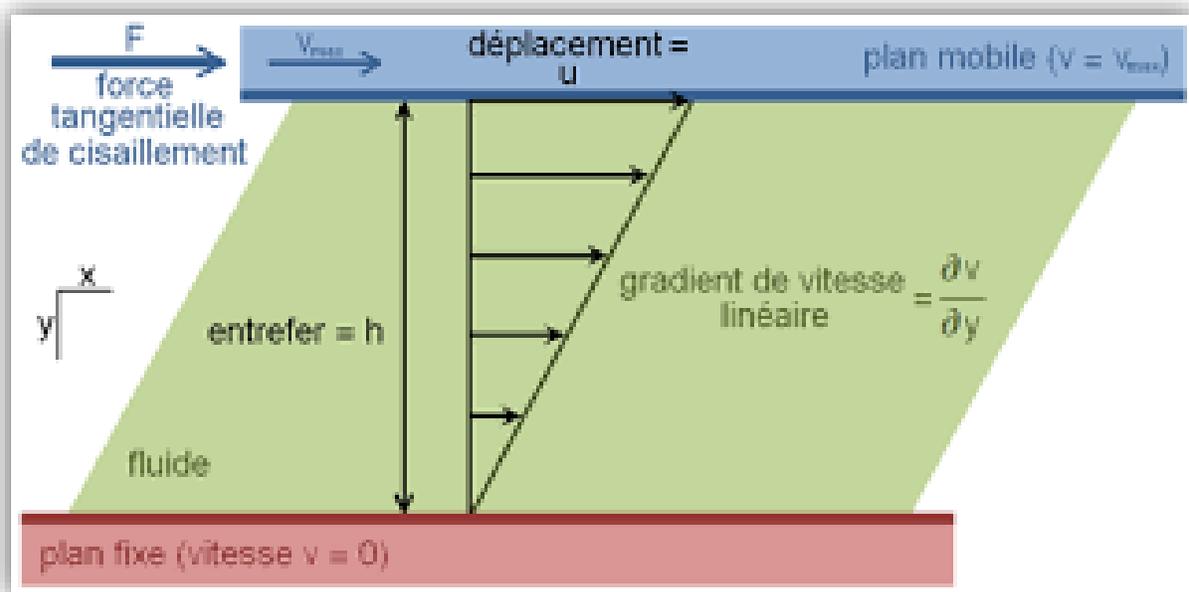


Figure n°11 : Déformation et vitesse de cisaillement

III. Types de fluides

III.1. Fluides Newtoniens :

Les fluides Newtoniens sont les fluides ayant une viscosité constante dépendante de la température mais indépendante de taux de cisaillement appliquée. On peut dire également les fluides Newtoniens ont une directe proportionnalité entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement dans l'écoulement laminaire.

$$\tau = \mu * \dot{\gamma} \quad \text{[...Eq 2.3]}$$

La constante de proportionnalité est ainsi égale à la viscosité du matériau. Parmi les fluides Newtoniens : l'eau, l'huile minérale et végétale, alcools...pour ces fluides la viscosité est influencée que par la température et la pression.

III.2. Fluides non Newtoniens :

Les matériaux que l'on peut définir simplement par leur viscosité a une température donnée sont appelés fluides non newtoniens. La viscosité de ces matières doit toujours être indiquée avec une température et un taux de cisaillement correspondant, le fait de modifier le taux de cisaillement modifier aussi la viscosité et cette dernière peut être dépendante de temps et de la durée de taux de cisaillement.

On distingue plusieurs types de fluides non Newtoniens, citons :

II.2.1. Fluides rhéofluidifiants :

La viscosité d'un fluide rhéofluidifiant diminue lorsque le taux de cisaillement augmente. La dépendance de la viscosité au taux de cisaillement peut varier considérablement d'un produit à un autre, la cause de rhéofluidification réside dans le fait qu'un taux de cisaillement plus élevé déforme et/ou réorganise les particules ce qui réduit la viscosité.

Exemple : Boue de forage, Yaourt.

II.2.2. Fluides rhéoépaississants (dilatant) :

La viscosité d'un fluide rhéoépaississant augmente au même temps que le taux de cisaillement, ce type de comportement se rencontre généralement parmi les suspensions très concentrées. Il manifeste aussi un comportement dilatant.

Exemple : sable humide, suspension d'amidon concentré.

II.2.3. Fluides plastiques :

Les fluides plastiques sont des fluides présentant un seuil de plasticité. Dans la pratique il faut appliquer une force importante avant que la matière à s'écouler, si la force appliquée est inférieure à la force correspondante au seuil de la plasticité, la matière stocke l'énergie de déformation ; dès que ce seuil de plasticité est dépassé le liquide peut s'écouler comme un fluide newtonien on dit alors que c'est un liquide plastique de Bingham ou bien il peut s'écouler comme un fluide rhéofluidifiant il s'agit d'un fluide viscoplastique.

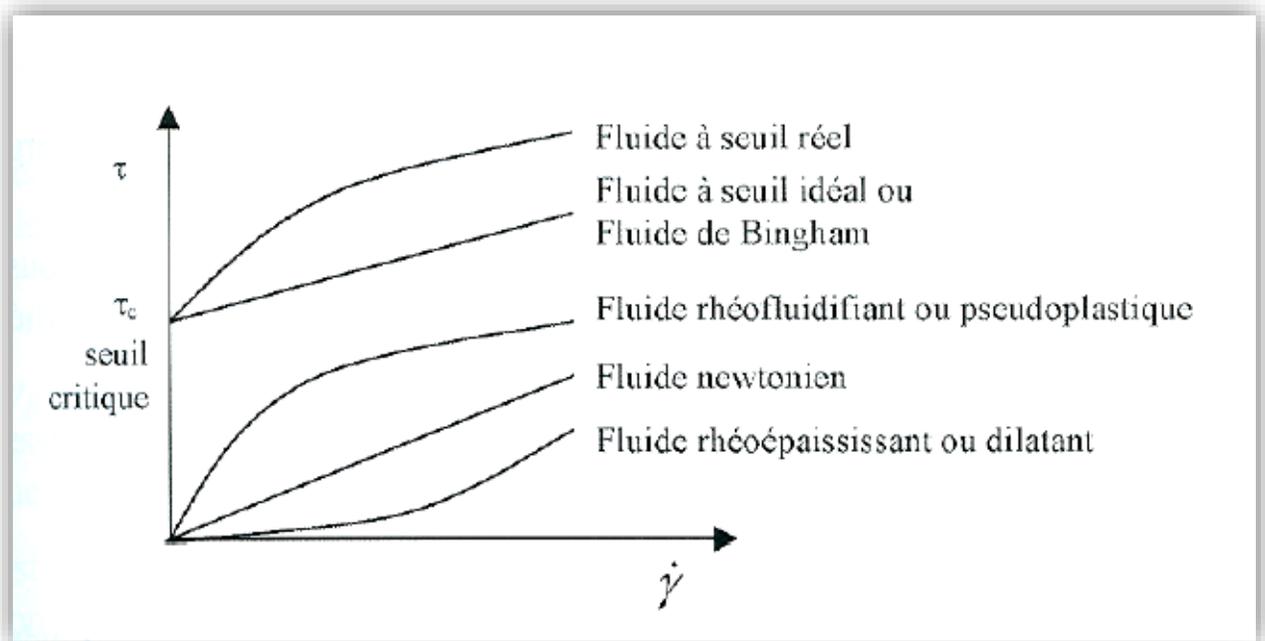


Figure n°12 : Rhéogramme des fluides

II.2.4. Fluides thixotropes :

On appelle fluide thixotrope les fluides dans la viscosité diminue non seulement lorsque le taux de cisaillement augmente mais également en fonction de temps avec un taux de cisaillement constant. Le comportement des fluides thixotropes est étudié généralement dans un test de bouclage, au cours de ce test le matériau est soumis à des taux de cisaillements croissants suivis des mêmes taux de cisaillements en ordre décroissant ; le comportement thixotropes dépend de temps et est caractérisé par la différence entre la viscosité ascendante, la viscosité descendante et les courbes de contraintes de cisaillements. Pour récupérer sa structure, la matière doit reposer

pendant un certain temps qui lui est spécifique. Ce comportement se manifeste dans les systèmes gélifiants.

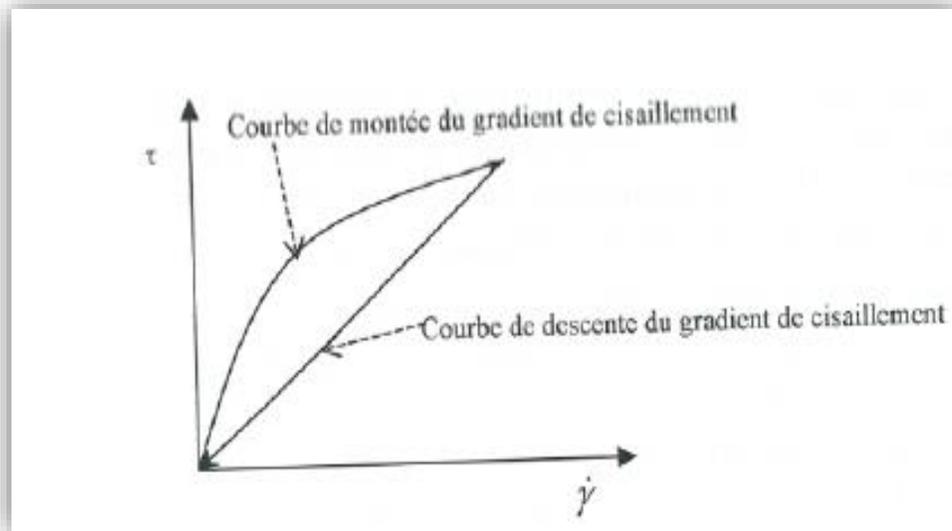


Figure n°13 : Cycle des fluides thixotropes

II.2.5. Fluides rhéopectiques :

Les fluides rhéopectiques sont des fluides thixotropes mais dont la structure n'est pas complètement récupérable seulement si il est soumis pour un faible taux de cisaillement, cela signifie qu'un fluide rhéopectique ne reconstruit pas sa structure au repos.

II.2.6. Fluides antithixotropes :

Les fluides antithixotropes sont des systèmes rhéoépaississant c'est-à-dire la viscosité augmente sous l'effet d'un taux de cisaillement, mais également en fonction d'un taux de cisaillement constant. Le comportement d'un fluide antithixotrope est étudié généralement dans un test de bouclage comme pour les fluides thixotropes.

IV. Modèles de comportement d'écoulement :

Il existe plusieurs modèles mathématiques pour décrire mathématiquement le comportement des fluides non newtoniens tel que les modèles d'Ostwald, Herschel-Bulkley, Steiger-Ory, Bingham, Ellis et Eyring.

Ces modèles mettent en relation la contrainte de cisaillement d'un fluide et son taux de cisaillement, ce qui permet là encore de calculer la viscosité apparente comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement.

La caractérisation de l'écoulement d'un matériau passe par l'étude de ses caractéristiques rhéologiques.

Le comportement du matériau s'exprime en général sous forme d'un rhéogramme (évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement). Grace au rhéogramme différents modèles empiriques peuvent caractériser les propriétés d'écoulement du matériau. Ils ont définis ci-dessous :

IV.1. Modèle de Bingham :

Il représente les fluides plastiques idéals dont la viscosité est constante et il se caractérise par une contrainte seuil :

$$\tau = \tau_c + \mu \dot{\gamma} \quad \text{[...Eq 2.4]}$$

Avec :

- τ : taux de cisaillement (Pa).
- τ_c : contrainte seuil (Pa)
- μ : viscosité (Pa.s)
- $\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement (s^{-1}).

IV.2. Modèle d'Ostwald (modèle à la loi de puissance) :

Le modèle de loi de puissance est facilement utilisé et idéal pour les fluides rhéofluidifiants, les fluides relativement mobiles tels que les gels faibles et des dispersions de faible viscosité. Ce modèle n'est rien de plus que le modèle newtonien avec un exposant ajouté sur le taux de cisaillement.

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad \text{[...Eq 2.5]}$$

Avec :

- ✓ k : indice de consistance : Ceci décrit la plage globale la viscosité dans la partie de la courbe de débit qui est modélisée. Aussi, si la région de la loi de puissance inclut un taux de cisaillement en s^{-1} , alors k est la viscosité ou la contrainte à ce point.

- ✓ **n** : L'exposant n est l'indice de comportement qui traite l'écart avec le fluide newtonien

$$n = \frac{\log \frac{\tau_2}{\tau_1}}{\log \frac{\dot{\gamma}_2}{\dot{\gamma}_1}} \quad \text{Avec} \quad k = \frac{\tau_2}{\dot{\gamma}_2^n} \quad [\dots \text{Eq 2.6}]$$

τ_2 : La lecture de tension de cisaillement au taux plus élevé de cisaillement,

τ_1 : La lecture de tension de cisaillement au taux inférieur de cisaillement,

$\dot{\gamma}_2$: la vitesse de cisaillement le plus élevé (tr/mn),

$\dot{\gamma}_1$: La vitesse de cisaillement inférieur (tr/mn),

On peut utiliser aussi les lectures 600 et 300 de cadran de rhéomètre Fann pour déterminer n et K tel que :

$$n = 3.31 \log \frac{L_{600}}{L_{300}} \quad \text{et} \quad K = \frac{L_{300}}{500^n} \quad [\dots \text{Eq 2.7}]$$

IV.3. Modèle de Herschel-Bulkley :

Les courbes rhéologiques font apparaître une partie concave sur la plage des faibles cisaillements pour les fortes concentrations en bentonite afin de pouvoir représenter l'évolution de cette concavité, le modèle de Herschel-Bulkley sera utilisé :

$$\tau = \tau_c + k \dot{\gamma}^n \quad [\dots \text{Eq 2.8}]$$

τ_c : contrainte d'Herschel (Pa)

k : consistance de la structure,

n : paramètre adimensionnel compris entre 0 et 1 et peut être considéré comme un indice de structure

Ce modèle peut représenter l'ensemble des modèles rhéologiques rencontrés :

- ✓ Newtonien : avec $\tau_c = 0$ et $n = 1$
- ✓ Modèle de Bingham : avec $n = 1$
- ✓ Modèle Herschel-Bulkley : avec $\tau_c = 0$

-Détermination de **n** et **k** avec un viscosimètre Fann :

$$n = \frac{\log \frac{\tau_2 - \tau_0}{\tau_1 - \tau_0}}{\log \frac{\dot{\gamma}_2}{\dot{\gamma}_1}} \quad \text{et} \quad k = \frac{\tau_1 - \tau_0}{\dot{\gamma}_1^n} \quad [\dots \text{Eq 2.9}]$$

τ_0 : gel 0 ou lecture 3 rpm

IV.4. Modèle de Cross :

Le modèle rhéologique de Cross est l'un des plus populaires en service aujourd'hui. Il peut être trouvé pratiquement dans le progiciel d'un rhéomètre, et il peut être utilisé pour extraire les nombres significatifs de l'ensemble de la viscosité et de la vitesse de cisaillement.

L'équation de Cross exprimant la viscosité en fonction de la fonction de cisaillement :

$$\mu = \mu_0 + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (C \dot{\gamma})^m} \quad [\dots \text{Eq 2.10}]$$

μ_0 : La viscosité au cisaillement 0

μ_∞ : La viscosité à l'infinie de cisaillement

m : Constante de Cross

C : La constante de temps de Cross (parfois c'est la consistance)

Il est facile de confondre entre les paramètres de modèle de Cross C et m avec les paramètres k et n de modèle de la puissance (Ostwald), ils ne sont pas identiques bien qu'ils décrivent tous la partie de rhéofluidifiant.

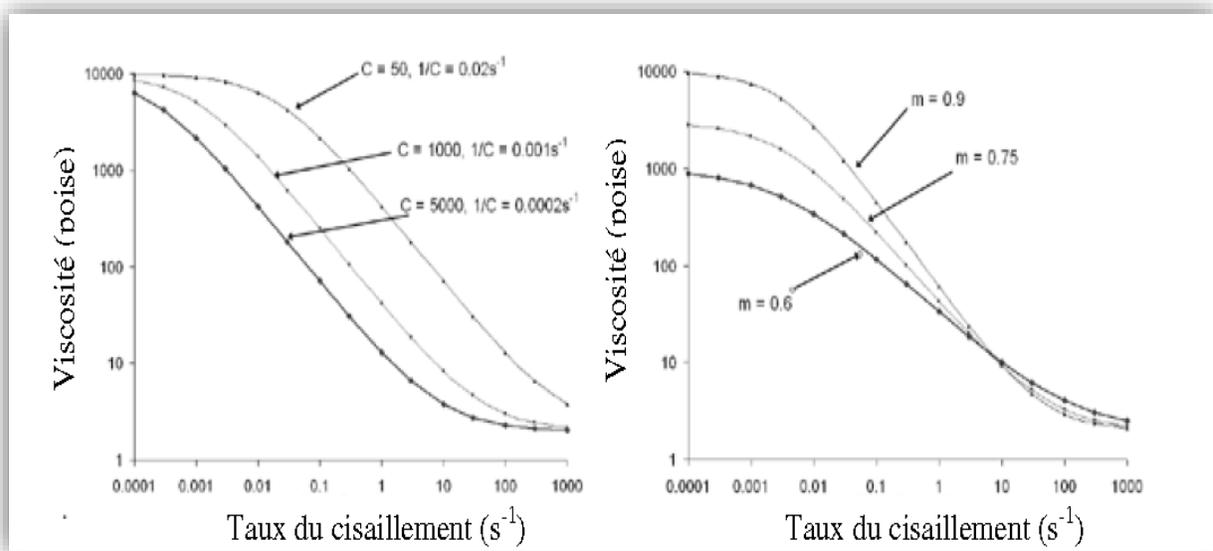


Figure n°14 : viscosité en fonction de taux de cisaillement de différents paramètres 'C' et 'm'

NB :

Il existe aussi plusieurs modèles qui décrivent les lois rhéologiques de comportement des fluides qui figurent dans le tableau suivant :

Modèle	Loi rhéologique
Bingham	$\tau = \tau_B + \mu_B \cdot \gamma$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_H + K \cdot \gamma^n$
Casson général	$\tau^n = \tau_C^n + (kc \cdot \gamma)^n$
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_C^{1/2} + (kc \cdot \gamma)^{1/2}$

Tableau n°01 : Modèles rhéologiques décrivant loi d'écoulement des fluides a contraintes critiques.

Modèle	Loi rhéologique
Ostwald de Waele	$\tau = k \cdot \gamma^n$
Ellis	$\tau = [\mu_0 / (1 + (\tau/\tau_{1/2})^{\alpha-1})] \cdot \gamma$
Sisko	$\tau = \mu_0 \cdot \gamma + k \cdot \gamma^n$
Reiner Phillipoff	$\tau = [\mu_\infty + ((\mu_0 - \mu_\infty) / (1 + (\tau/\tau_S)^2))] \cdot \gamma$
Prandtl-Eyring	$\tau = \tau_0 \text{sh}^{-1}(\tau_0 \cdot \gamma)$
Carreau	$\tau = [\mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \cdot (1 + (\lambda \gamma)^2)^{(n-1)/2}] \cdot \gamma$
Cross	$\tau = [\mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) / (1 + \gamma t_1)^p] \cdot \gamma$

Tableau n°02 : Modèles rhéologiques décrivant loi d'écoulement des fluides sans contraintes critiques.

V. Régimes d'écoulement des boues

En 1883, Reynolds réalisa une expérience de visualisation des écoulements en introduisant un filet de colorants au centre d'un tube où circule de l'eau à différents débits. Il a ainsi pu observer que pour :

- ✓ Des petits débits d'eau, le filet coloré traverse le tube d'une manière rectiligne et parallèle à l'axe de tube sans se mélanger avec l'eau. Dans ce cas on peut qualifier le régime d'écoulement de régime laminaire (écoulement laminaire).
- ✓ Pour des débits d'eau plus importants, après un parcours plus au moins rectiligne le colorant se mélange avec l'eau, on dit alors que le régime d'écoulement est intermédiaire (régime transitoire).
- ✓ Pour des grands débits d'eau, le colorant se mélange instantanément dès sa sortie dans un grand nombre de tourbillons, de plus en plus développés, on dit alors que le régime d'écoulement est un régime turbulent.

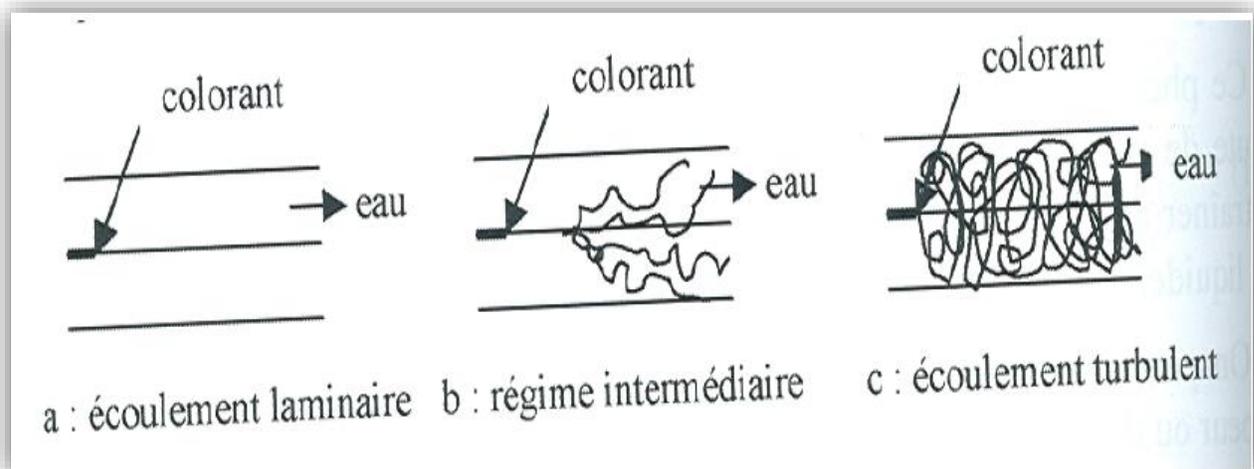


Figure n°15 : Expérience de Reynolds

Reynolds, dans ces expériences, a fait varier en plus de débit d'eau le diamètre du tube. En utilisant des divers liquides, il montre ainsi que le paramètre permettant de déterminer si l'écoulement est turbulent ou laminaire est un nombre sans dimension dans un système cohérent d'unités, appelé nombre de Reynolds (Re), avec :

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} \quad [\dots\text{Eq} 2.11]$$

- ρ : masse volumique du fluide (kg/m^3)
 v : vitesse du fluide (m/s)
 μ : viscosité du fluide (Pa.s)
 D : Diamètre de la conduite (m)

On peut subdiviser les régimes d'écoulement des fluides en deux grandes familles :

V.1. Régime permanent :

Dans ce régime l'écoulement est établi. Parmi ceci on classe :

- ✓ **Régime laminaire ($Re < 2100$) :**
 Dans lequel chaque lame de fluide se déplace l'une par rapport à l'autre parallèlement à la direction de l'écoulement avec une vitesse propre. Dans une conduite cylindrique la vitesse est maximale le long de l'axe du tube et nulle à la paroi.
- ✓ **Régime turbulent ($Re > 3000$) :**
 Caractérisé par formation de petits tourbillons répartis dans toute la masse du liquide.
- ✓ **Écoulement en bouchon ($Re < 100$) :**
 Le fluide se déplace le long du tube comme un bouchon sur un plan perpendiculaire à la direction de l'écoulement (la vitesse est constante).

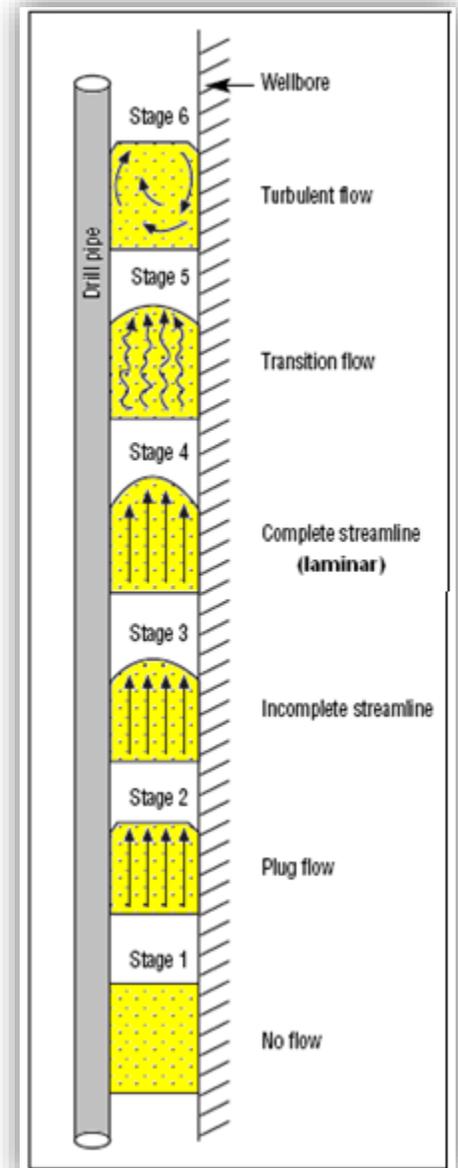


Figure n°16 : Régimes d'écoulements

V.2. Régime transitoire :

Les conditions d'écoulements viennent d'être modifiées et le régime définitif n'est pas encore établi.

Le régime est transitoire, par exemple, pendant la mise en vitesse du fluide lors de changement de débit, lors d'un changement de section...

NB :

La connaissance du régime d'écoulements est extrêmement importante dans le forage car il conditionne les calculs des pertes de charge et le nettoyage du fond du puits.

Introduction :

Dans ce chapitre on va étudier l'écoulement laminaire d'un fluide de forage dans un annulaire concentrique. Dans la première partie on va développer les équations qui régissent les phénomènes physiques d'un écoulement de fluide dans une cavité ou une canalisation, et dans la deuxième partie on va donner la solution numérique de l'équation de Navier stocks dans un cas bien déterminé pour un écoulement laminaire dans un annulaire concentrique. Cette équation sera la base de la partie pratique de simulation (Chapitre 6).

Partie I : Les lois régissant l'écoulement des boues de forage**I.1. Principe de Conservation de la masse (équation de continuité) [8] [9] :**

Afin d'obtenir une formulation plus générale nous considérons un volume arbitraire V de surface extérieure S perméable mais fixe dans l'écoulement. Par rapport à un repère cartésien la forme du volume V dépend des variables x, y, z . Celui-ci est indépendant de temps ; le volume V est immobile ou fixe dans l'espace. Il s'en suit que la masse du fluide à l'intérieure du volume V au temps t est donné par :

$$M_v(t) = \int_V \rho dV \quad [\dots \text{Eq 3.1}]$$

Soit une masse de fluide de volume V :

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0 \quad [\dots \text{Eq 3.2}]$$

Selon le théorème de transport de Reynolds et théorème de Gausse, on aura :

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \int_V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} \right] dV \quad [\dots \text{Eq 3.3}]$$

Le volume V : est choisi arbitrairement donc pour que cette équation soit satisfaite pour tout volume il faut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad [\dots \text{Eq 3.4}]$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + u_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = 0 \quad ; \quad \left(\frac{\partial \rho}{\partial x_i} = 0 \right) \quad \vec{u}(u,v,w)$$

$$\text{D'où : } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad [\dots \text{ Eqt 3.5}]$$

Pour un fluide incompressible nous avons : $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

Donc l'équation de continuité :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \text{div } \vec{u} \quad [\dots \text{ Eqt 3.6}]$$

$$\Rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

I.2. Principe de conservation de quantité de mouvement (équation de Navier Stokes) [8] [9]

I.2.1. Principe de conservation de quantité de mouvement :

En appliquons la deuxième loi de Newton :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \vec{a} = \frac{dm \vec{u}}{dt} \quad [\dots \text{ Eqt 3.7}]$$

Les forces qui peuvent agir sur un élément de fluide peuvent être classées en :

- Forces de volume (forces gravitationnelle)
- Forces de surface (forces de pression)
- Force de viscosité (les forces de frottement visqueux)

Si \vec{f} est la résultante des forces de volume par unité de masse alors la force agissant sur toute la masse :

$$\int_V \rho \vec{f} dV$$

Si \vec{p} est la résultante des forces de surface par unité de surface alors la force agissant sur toute la surface :

$$\int_S \vec{p} dS$$

La quantité de mouvement de la masse du fluide dont le volume ($m = \int_V \rho dV$) sera :

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{u} dV = \int_V \rho \vec{f} dV + \int_S \vec{p} dS \quad [\dots \text{Eq 3.8}]$$

Pour les forces de surface. En générale il y'a 9 composante de contrainte telle que : une composante normale et 2 composante tangentielle sur chaque plan

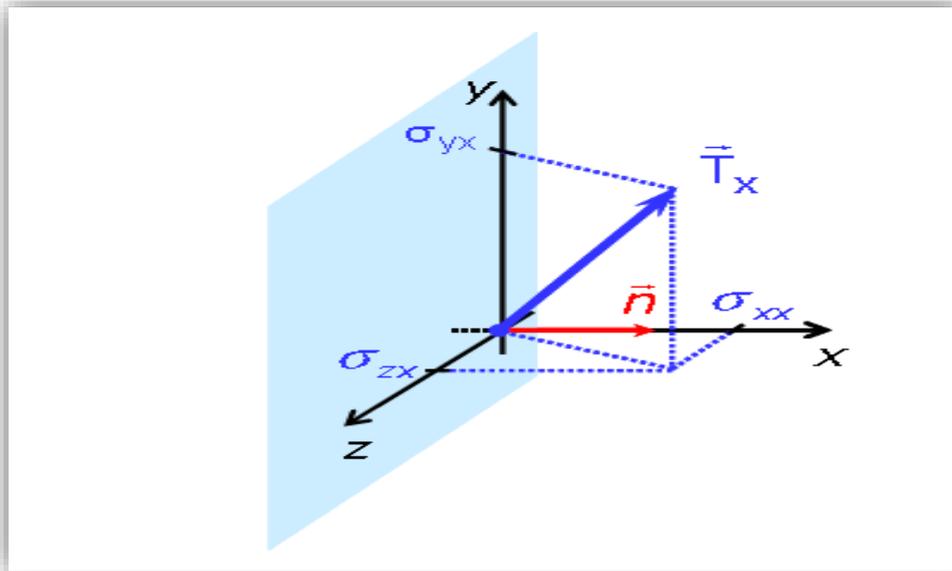


Figure n°17 : Composante de contrainte exerçant sur une surface dS suivant l'axe X

Les force de surface, peut s'écrire de la façon suivante pour les trois axes :

$$P_j = \sigma_{ij} * n_i \quad [\dots \text{Eq 3.9}]$$

Avec : $\left\{ \begin{array}{l} J : \text{la direction} \\ i : \text{le plan} \end{array} \right.$

$$P_j = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$$

D'où l'équation de quantité de mouvement devient :

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{u}_j dV = \int_V \rho f_j dV + \int_S \delta_{ij} * n_i dS \quad [\dots \text{Eq 3.10}]$$

Le terme de nombre de gauche, est transformé par le théorème de transport de Reynolds. Et l'intégrale de surface de nombre de droite est transformé en intégrale de volume en utilisant le théorème de Gauss. L'équation deviendra :

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_j u_k) \right] dV = \int_V \rho f_j dV + \int_V \frac{\partial \delta_{ij}}{\partial x_i} dV \quad [\dots \text{Eq 3.11}]$$

L'équation 3.10 deviendra après réarrangement et soustraction de l'équation de continuité sous la forme suivante :

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \delta_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad [\dots \text{Eq 3.12}]$$

Le nombre de gauche représente la variation de la quantité de mouvement :

- Le premier terme représente l'accélération locale
- Le deuxième terme représente l'accélération convective

Le nombre de droite représente les forces causant cette accélération :

- Le premier terme représente les forces de surface
- Le deuxième terme représente les forces de volume

1.2.2. Equation de Navier-Stokes :

On a le tenseur de contrainte :

$$\overline{\sigma} = \overline{\sigma}_s + \overline{\sigma}_\delta = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Avec :

$\overline{\sigma}_s$: Tenseur de contraintes normale

$\overline{\sigma}_\delta$: Tenseur de contraintes tangentielles (contrainte de viscosité)

$$\overline{\sigma}_s = -p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = -p \overline{\mathbf{I}}$$

Donc :

$$\overline{\overline{\sigma}}_{\delta} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} + p & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} + p & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} + p \end{bmatrix}$$

On utilisant les hypothèses de Newton :

- ✓ Les composantes tangentielles des contraintes visqueuses sont proportionnelles aux vitesses de déformation

$$\sigma_{yx} = \sigma_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\sigma_{yx} = \sigma_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\sigma_{yx} = \sigma_{xy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

- ✓ Les composantes normales des contraintes visqueuses sont :

$$\sigma_{xx} + p = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda \operatorname{div} \vec{u}$$

$$\sigma_{yy} + p = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda \operatorname{div} \vec{u}$$

$$\sigma_{yy} + p = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda \operatorname{div} \vec{u}$$

Avec :

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad \text{et} \quad \operatorname{div} \vec{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

D'où l'équation 3.10 devient l'équation de Navier- Stoks :

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = - \overrightarrow{\operatorname{grad}}(p) + \mu \Delta \vec{u} + (\lambda + \mu) \overrightarrow{\operatorname{grad}} \operatorname{div} \vec{u} + \rho \vec{f} \quad [\dots \text{Eqt 3.13}]$$

I.3. Equation de l'énergie [8] [9] :

Le travail d'une force sur un corps en mouvement est donné par le produit $\vec{u} \vec{F}$

En appliquant le premier principe de la thermodynamique on obtient :

Taux de changement de l'énergie dans un élément de fluide (A) = flux de chaleur dans l'élément (B) + travail appliqué sur l'élément de fluide par les forces volumiques et surfaciques (C)

On peut écrire :

$$C = [- (\frac{\partial}{\partial x}(u_p) + \frac{\partial}{\partial y}(v_p) + \frac{\partial}{\partial z}(w_p)) + \frac{\partial}{\partial x}(u \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(u \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(u \tau_{zx}) + \frac{\partial}{\partial x}(v \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(v \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(v \tau_{zy}) + \frac{\partial}{\partial x}(w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(w \tau_{zz})] dx dy dz + \rho F u dx dy dz \quad [\dots \text{Eq 3.14}]$$

La chaleur produite par l'élément de volume est donné $\rho q dx dy dz$:

$$[q_x - (q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx)] dy dz = - \frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz \quad [\dots \text{Eq 3.15}]$$

$$B = (\rho q - (\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z})) dx dy dz \quad [\dots \text{Eq 3.16}]$$

Avec : $q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}$; $q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}$; $q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$

Donc :

$$B = [\rho q + \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z})] dx dy dz$$

$$A = \rho \frac{\Delta}{\Delta t} (e + \frac{v^2}{2}) dx dy dz$$

D'où l'équation complète d'énergie qui devient :

$$\rho \frac{\Delta}{\Delta t} (e + \frac{v^2}{2}) = \rho q + \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) - \frac{\partial}{\partial x}(u_p) - \frac{\partial}{\partial y}(v_p) - \frac{\partial}{\partial z}(w_p) + \frac{\partial}{\partial x}(u \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(u \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(u \tau_{zx}) + \frac{\partial}{\partial x}(v \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(v \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(v \tau_{zy}) + \frac{\partial}{\partial x}(w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(w \tau_{zz}) + \rho F u \quad [\dots \text{Eq 3.17}]$$

L'équation de l'énergie simplifiée est donc :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad [\dots \text{Eq 3.18}]$$

I.4. Equation de transfert de masse [2] :

Dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles il faut introduire un nouvel effet qui est le mélange de plusieurs espèces. Soit c_1 le rapport de la masse d'une des espèces par rapport à l'ensemble des espèces $c_1 = \frac{\rho_1}{\sum \rho_i}$. Bien entendu la somme de toutes les concentrations vaut un : $\sum c_i = 1$. S'il n'y a aucun effet de mélange (c_1 distingue certains éléments fluides qui sont strictement identiques aux autres), on a simplement :

$$\frac{\partial \rho c_1}{\partial t} + \text{div} (\rho c_1 u) = 0 \quad [\dots \text{Eq 3.18}]$$

C'est-à-dire le transfert passif. Si maintenant on admet qu'il y a un effet de mélange c'est-à-dire que les particules ne suivent plus les lignes de courants, il faut ajouter un nouveau terme du flux j_1 (de diffusion) à l'équation de conservation ainsi qu'un terme de création volumique.

$$\frac{\partial \rho c_1}{\partial t} + \text{div} (\rho c_1 u + j_1) = w_1 \quad [\dots \text{Eq 3.19}]$$

Cette équation est la nouvelle équation de conservation on aura de même une telle équation de conservation pour chaque constituant du mélange.

Retenons que l'effet prépondérant est la loi de Fick écrite pour un mélange binaire :

$$j = -\rho D \text{div} c \quad [\dots \text{Eq 3.20}]$$

Avec D est le coefficient de diffusion. On peut en première approximation, si le mélange est très dilué de prendre D constant et ρ constant (le fluide porteur conserve alors toutes ces caractéristiques pures : ρ, μ, k, c_p, \dots identique malgré le mélange).

Application immédiate, l'équation d'évolution du constituant considéré est :

$$\frac{\partial \rho c}{\partial t} + \text{div} (\rho c_1 u + j_1) = w_1 \quad [\dots \text{Eq 3.21}]$$

$$\rho \frac{\partial c}{\partial t} - \text{div} (\rho D \text{div} c) = 0 \quad [\dots \text{Eq 3.22}]$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} - D \nabla^2 c = 0 \quad [\dots \text{Eq 3.23}]$$

Partie II : Solution numérique de l'équation de Navier Stokes en 2D**II.1. Écoulement d'un fluide newtonien dans un espace annulaire avec le cylindre intérieur en rotation [14] [15] :**

L'objectif de cette section est d'étudier le flux laminaire d'un fluide newtonien dans un espace annulaire avec la rotation de la conduite intérieure. Considérant l'équation de Navier-Stokes pour un écoulement laminaire d'un fluide newtonien en système des coordonnées cartésiennes en (2D). L'algorithme SIMPLE (Patankar-Spalding, 1972) est appliqué pour résoudre les équations.

II.1.1. Hypothèses :

- ✓ Écoulement laminaire.
- ✓ Isotherme et état d'équilibre.
- ✓ Direction de l'écoulement dans l'espace annulaire est le long de la direction axiale du puits de forage.
- ✓ Fluide incompressible.
- ✓ Domaine de l'écoulement est un espace annulaire concentrique.
- ✓ Train de tige à une vitesse angulaire constante.
- ✓ Pas de glissement à la paroi.

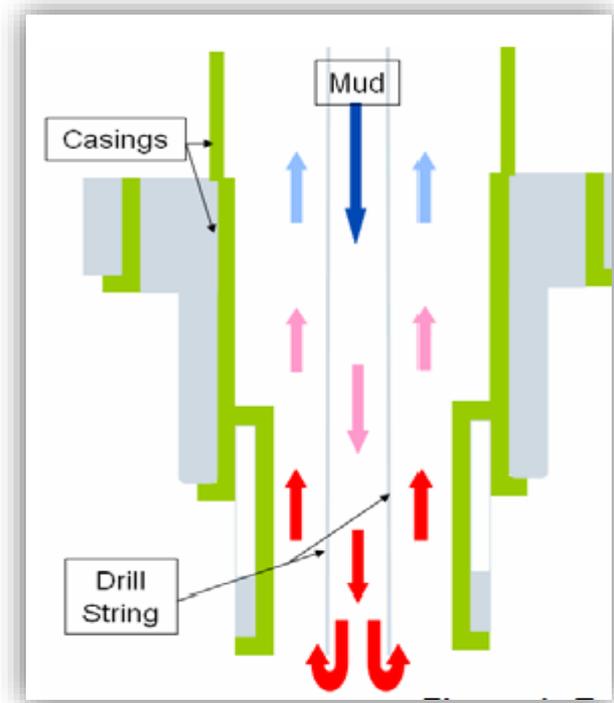


Figure n°18 : Géométrie de notre système en 2D

II.1.2. Mise en équation du problème :

ρg_i : représente la force de volume :

$$\rho g_x = 0 ; \rho g_y = -\rho g$$

Introduisons la pression motrice p^* proposé par Patankar ou :

$$p^* = p + \rho_0 g h \quad [\dots \text{Eq 3.24}]$$

En considérant la variation de la viscosité avec la température, Les projections de l'équation 3.13 s'écrivent en 2D suivant Ox , et Oy respectivement comme :

$$\text{Suivant } OX : \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_0 \left(\frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p^*}{\partial x} \quad [\dots \text{Eq 3.25}]$$

$$\text{Suivant } OY : \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \rho_0 \left(\frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial p^*}{\partial y} + \rho_0 g \beta (T_w - T_0)$$

[... Eq 3.26]

II.1.3. Adimensionnalisation des équations :

L'adimensionnalisation des équations consiste à réduire le nombre de paramètres d'étude. Pour cela, on introduit un ensemble de variables réduites. Ainsi, l'étude devient plus simple et les résultats obtenus peuvent être généralisés à tous les phénomènes similaires.

Introduisons les variables réduites suivantes :

$$X = \frac{x}{H}, \quad Y = \frac{y}{H}, \quad U = \frac{u}{V_0}, \quad \tau = \frac{t}{H/V_0}, \quad V = \frac{v}{V_0}, \quad p^* = \frac{p^*}{\rho V_0^2}, \quad \theta = \frac{T - T_0}{T_w - T_0}$$

Où :

- H : hauteur caractéristique ;
- H/V_0 : temps caractéristique ;
- ρV_0^2 : pression caractéristique ;
- ΔT : température caractéristique ;
- V_0 : vitesse caractéristique ;

Alors, les équations précédentes s'écrivent en fonction des variables réduites prédéfinies comme suite :

➤ Equation de conservation de la masse en 2D (équation de continuité) :

L'équation (3.6) devient alors :

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad [\dots \text{Eq 3.27}]$$

➤ Equation de conservation de la quantité de mouvement :

Suivant OX :
$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{\partial P^*}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial}{\partial X} \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial Y} \frac{\partial U}{\partial Y} \right] \quad [\dots \text{Eq 3.28}]$$

Suivant OY :
$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{\partial P^*}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial}{\partial X} \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial Y} \frac{\partial V}{\partial Y} \right] + \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \quad [\dots \text{Eq 3.29}]$$

Ou 'Gr' et 'Re' sont respectivement les nombres de Grashof et de Reynolds. Ils sont définis par les expressions suivantes :

$$\text{Gr} = \frac{g \beta (T_w - T_0) h^3}{\nu_0^2} \quad \text{Re} = \frac{V_0 h}{\nu_0}$$

Avec: **h** : Diamètre hydraulique

β : Coefficient d'expansion thermique a pression constante

Les équations (3.27 ; 3.28 et 3.29) forment le système d'équations qui régit notre problème. Remarquons que toutes ces équations sont de la forme des équations de transport qui s'écrivent sous la forme générale :

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} + U \frac{\partial \phi}{\partial X} + V \frac{\partial \phi}{\partial y} = \Gamma_\phi \left[\frac{\partial}{\partial X} \frac{\partial \phi}{\partial X} + \frac{\partial}{\partial Y} \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right] + S_\phi \quad [\dots \text{Eq 3.30}]$$

Où :

φ : est la variable dépendante

Γ_φ : est le coefficient de diffusion

S_φ : S est le terme source.

Après identification avec le système d'équation précédent, on peut établir le Tableau ci-dessous dans lequel on donne pour chaque équation le coefficient de diffusion et le terme source relatif à la variable indépendante φ.

Equations		ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
De continuité (Eq 3.27)		1	0	0
De Quantité de Mouvement	Selon x (Eq 3.28)	V	$\frac{1}{Re}$	S_v
	Selon y (Eq 3.29)	U	$\frac{1}{Re}$	S_u

Tableau n°03 : Identification des équations par rapport à l'équation générale de transport.

Les termes sources présentes dans le tableau précédent sont données par les expressions suivantes :

$$S_v = -\frac{\partial P^*}{\partial Y} + \frac{Gr}{Re^2} \theta \qquad S_u = -\frac{\partial P^*}{\partial Y}$$

II.1.3 : Conditions aux limites :

A $\tau = 0 \longrightarrow V = V_0 \longrightarrow P = P_{fond}$

Conditions sur les parois : Paroi extérieure est fixe et la paroi intérieure tourne avec une vitesse constante ω .

II.2. Procédure numérique de la résolution de l'équation [3] [14] [15] :

Ce genre d'équations est très difficile de les résoudre analytiquement, ou voire impossible. On cherche donc des méthodes basées sur l'approximation numérique. Celle-ci a pour but de définir une ou plusieurs suites convergentes (vers la solution analytique du système, qui ne converge pas d'ailleurs nécessairement vers un état d'équilibre) dont nous calculons les termes les uns après les autres par itérations successives. Le principe est d'approcher l'équation continue "E.D.P." déduite de la théorie par une équation algébrique de récurrence liant les termes de ces suites. Nous voyant ici l'utilité des conditions initiales et aux limites permettant de donner un "départ" à notre calcul. Or nous comprenons bien que cette solution ne puisse s'effectuer continuellement sur le domaine de calcul. Nous allons donc décomposer ce domaine en plusieurs mailles.

Actuellement, trois grandes méthodes numériques sont utilisées généralement pour la résolution des systèmes d'équations à dérivées partielles régissant les différents écoulements de transfert de chaleur, de masse etc., ce sont les méthodes des différences finies, des éléments finis et des volumes finis.

La méthode des volumes finis qui a été adoptée dans cette étude consiste à exprimer le bilan de la grandeur étudiée (masse, énergie, quantité de mouvement ...) sur un volume de contrôle. Ces volumes de contrôle sont généralement rectangulaires délimités par des lignes parallèles aux axes des coordonnées. Cependant, il est possible, actuellement, d'utiliser des volumes de diverses formes. L'un des principaux avantages de cette méthode est d'assurer une conservation intégrale exacte des grandeurs quelle que soit la taille du maillage et c'est pour cette raison qu'elle est très largement utilisée pour la résolution des phénomènes gouvernés par des équations à dérivées partielles.

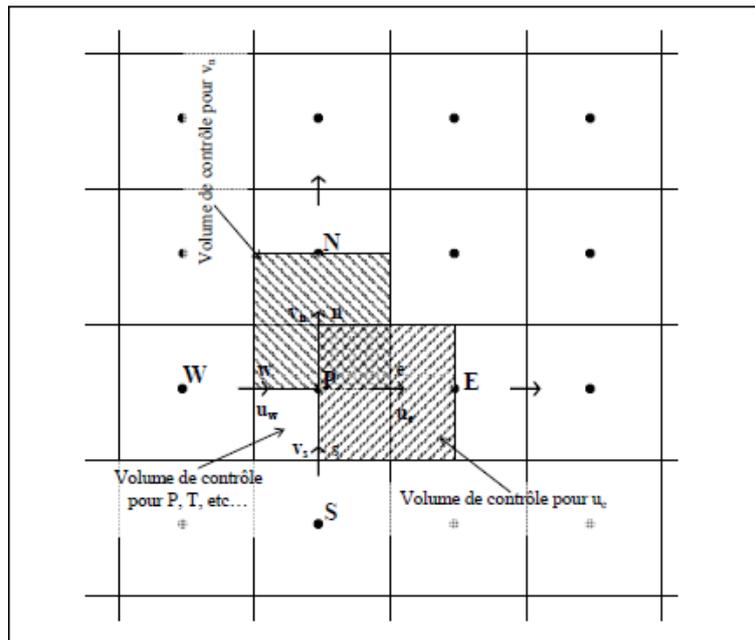


Figure n°19 : Distribution des volumes de contrôle avec un maillage décalé

II.2.2. Discrétisation de la loi général de transport :

Les phénomènes physiques impliquant l'écoulement d'un fluide et le transfert de chaleur sont régis par les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Ces équations se présentent sous la forme générale d'une équation de transport, soit :

$$\underbrace{\frac{\partial \phi}{\partial t}}_I + \underbrace{\frac{\partial U_j \phi}{\partial X_j}}_{II} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial X} \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X}}_{III} + \underbrace{S_\phi}_{IV} \quad [\dots \text{Eq 3.31}]$$

Où :

\mathbf{U} : les composantes de vecteur vitesse

ϕ : est la variable dépendante

Γ : est le coefficient de diffusion

S_ϕ : est le terme source

Cette équation de transport comporte quatre termes représentant les processus par lesquels la variable ϕ peut changer.

I : terme de la variation temporelle au sein du volume.

II : terme de convection à travers les faces du volume.

III : terme de diffusion à travers les faces du volume.

IV : terme de génération ou destruction au sein du volume.

On intégrant sur un volume de contrôle typique ; on obtient :

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^s \int_w^e \frac{\partial \phi}{\partial t} dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^s \int_w^e \frac{\partial U \phi}{\partial x} dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^s \int_w^e \frac{\partial V \phi}{\partial y} dx dy =$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^s \int_w^e \frac{\partial \Gamma \partial \phi}{\partial x \partial x} dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^s \int_w^e \frac{\partial \Gamma \partial \phi}{\partial y \partial y} dx dy dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_s^s \int_w^e S_\phi dx dy dt$$

[.... Eqt 3.32]

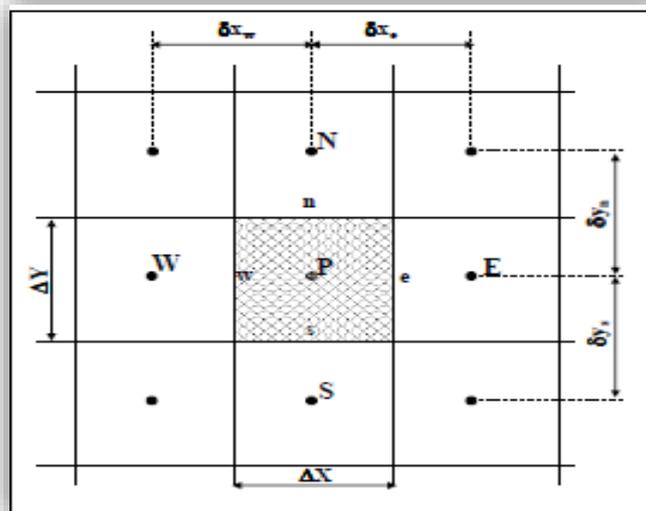


Figure n°20 : volume de contrôle typique

On évaluant chaque terme séparément, nous obtenant :

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial \phi}{\partial t} dx dy dt = (\phi_p^{n+1} - \phi_p^n) \Delta X \Delta Y$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial U \phi}{\partial x} dx dy dt = (U_e \phi_e - U_w \phi_w) \Delta Y \Delta t$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial V \phi}{\partial y} dx dy dt = (V_n \phi_n - V_s \phi_s) \Delta X \Delta t$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial x} \right) dx dy dt = \left(\left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial x} \right)_w \right) \Delta Y \Delta t$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial y} \right) dx dy dt = \left(\left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial y} \right)_s \right) \Delta X \Delta t$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e S_\phi dx dy dt = \bar{S}_\phi \Delta Y \Delta X \Delta t$$

Où : **n** : correspond au temps (t).

n+1 : correspond au temps (t + Δt)

En réduisant les termes semblables, nous obtenons :

$$\begin{aligned} & (\phi_p^{n+1} - \phi_p^n) \frac{\Delta X \Delta Y}{\Delta t} + (U_e \phi_e - U_w \phi_w) \Delta Y + (V_n \phi_n - V_s \phi_s) \Delta X = \\ & \left[\left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] \Delta Y + \left[\left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \Delta X + \bar{S}_\phi \Delta Y \Delta X \quad [\dots \text{Eq 3.33}] \end{aligned}$$

En posant :

$$J_x = U \phi - \frac{\Gamma \partial \phi}{\partial x} \quad \text{et} \quad J_y = V \phi - \frac{\Gamma \partial \phi}{\partial y}$$

Donc les résultats de l'équation (3.33) donnent :

$$(\phi_p^{n+1} - \phi_p^n) \frac{\Delta X \Delta Y}{\Delta t} + J_e^{n+1} + J_w^{n+1} + J_n^{n+1} + J_s^{n+1} = \overline{S_\phi} \Delta Y \Delta X$$

[...Eq 3.34]

Où :

$$J_e = U_e \phi_e \Delta Y - \left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial X} \right)_e \Delta Y$$

$$J_w = U_w \phi_w \Delta Y - \left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial X} \right)_{ew} \Delta Y$$

$$J_n = V_s \phi_s \Delta X - \left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial X} \right)_s \Delta X$$

$$J_s = V_s \phi_s \Delta X - \left(\frac{\Gamma \partial \phi}{\partial X} \right)_s \Delta X$$

Les quantités **Je**, **Jw**, **Jn** et **Js** sont les flux aux interfaces (e, w, n, s). Le terme $\overline{S_\phi}$ est Suppose être constant dans le volume de contrôle. $\overline{S_\phi}$ est évalué au centre de volume de contrôle.

II.2.3. Couplage vitesse pression [3] :

La présence de la pression dans les équations de conservation de la quantité de mouvement sous forme de gradient rend la résolution de celles-ci plus compliquée, pour la principale raison que cette pression est inconnue et constitue l'une des variables du problème. Pour la déterminer, il faut tout d'abord trouver une équation pour la décrire. Cette équation sera constituée à partir de l'équation de la conservation de la masse. Mais, avant de passer à ce point, faisons les deux remarques suivantes :

- ✓ La discrétisation des équations de conservation de la quantité de mouvement fait apparaitre un problème lie à la pression. En effet, lors de cette discrétisation en un nœud P, par exemple, seules les pressions aux nœuds voisins apparaitront dans l'équation finale. En passant à un nœud voisin (E par exemple) nous verrons apparaitre la pression au nœud initial P et au nœud situe à l'est du nœud E. Nous constatons ainsi que les équations discrétisées utilisent deux champs de pression complètement indépendants. Ce qui est inadmissible et conduit, si nous n'y remédions pas, a des résultats complètement fantaisistes.
- ✓ Le même problème apparait aussi lors de la discrétisation de l'équation de continuité. Nous voyons apparaitre deux champs de vitesses sans relation l'un avec l'autre et sans aucun fondement physique.

Pour éviter ces deux inconvénients, Nous décalons le maillage de la pression par rapport à celui des vitesses. Nous allons alors localiser la pression au centre de l'élément de volume et les vitesses sur les faces de celui-ci comme indique sur la figure (20).

Revenons maintenant à la constitution d'une équation pour la pression ou plus Exactement pour une correction de la pression P' définie par :

$$P = P^* + P' \quad \text{[... Eqt 3.35]}$$

Ou :

P : est la pression exacte

P^* : une estimation de départ qu'il faut corriger en déterminant P'

Le problème est ramené à la détermination de P' au lieu de P . L'équation de conservation de la quantité de mouvement discrétisée s'écrit pour les deux composantes de vitesses :

$$a_p^{(u)} U_P = a_E^{(u)} U_E + a_W^{(u)} U_W + a_N^{(u)} U_N + a_S^{(u)} U_S + b_p^{(u)} \quad \text{[... Eqt 3.36A]}$$

$$a_p^{(v)} V_P = a_E^{(v)} V_E + a_W^{(v)} V_W + a_N^{(v)} V_N + a_S^{(v)} V_S + b_p^{(v)} \quad \text{[... Eqt 3.36B]}$$

Les termes sources $b_p^{(u)}$ et $b_p^{(v)}$ font intervenir la pression inconnue. Nous allons donc travailler par itérations successives. Nous supposons pour démarrer que la pression est connue (estimation P^*) et nous calculons le champ des vitesses. Or, les vitesses calculées avec une estimation de la pression ne satisfont pas, en général, l'équation de continuité qui doit être respectée à tout moment. Nous allons alors les corriger en utilisant, comme pour la pression ci-dessus, une correction telle que :

$$U = U^* + U' \quad \text{[... Eqt 3.37A]}$$

$$V = V^* + V' \quad \text{[... Eqt 3.37B]}$$

Ou V^* et U^* sont les vitesses calculées avec P^* . U' et V' étant les corrections de ces vitesses à déterminer pour retrouver les vitesses exactes U et V de l'itération en cours. Le calcul des corrections U' et V' s'effectue en utilisant les relations (3.37) dans les équations (3.36) en faisant des hypothèses simplificatrices.

$$U'_P = \frac{\Delta Y}{a_p^{(u)}} (P'_w - P'_e) \quad \text{[... Eqt 3.38A]}$$

$$V'_P = \frac{\Delta x}{a_p^{(v)}} (P'_s - P'_n) \quad \text{[... Eqt 3.38B]}$$

Pour déterminer la correction de pression P' nécessaire pour le calcul des corrections des vitesses, nous utilisons l'équation de continuité discrétisée suivante (élément de volume scalaire) :

$$(\mathbf{U}_E - \mathbf{U}_W)\Delta Y + (\mathbf{V}_N - \mathbf{V}_S) \Delta X = 0 \quad [\dots \text{Eq 3.39}]$$

Nous remplaçons dans cette équation, les vitesses par leurs valeurs données par les relations (3.37). Par identification avec l'équation de conservation de la quantité de mouvement (tout ce qui est en fonction des vitesses U^* et V^* disparaît), nous obtenons une équation pour la correction des vitesses. En utilisant les relations (3.38) dans cette dernière, nous obtenons l'équation suivante :

$$\mathbf{a}_p^{(p')} P'_p = \mathbf{a}_e^{(p')} P'_e + \mathbf{a}_w^{(p')} P'_w + \mathbf{a}_n^{(p')} P'_n + \mathbf{a}_s^{(p')} P'_s + \mathbf{b}_p^{(p')} \quad [\dots \text{Eq 3.40}]$$

Avec :

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_e^{(p')} &= \rho \frac{(\Delta y)^2}{(\mathbf{a}_p^{(u)})_e}, & \mathbf{a}_w^{(p')} &= \rho \frac{(\Delta y)^2}{(\mathbf{a}_p^{(u)})_w} \\ \mathbf{a}_n^{(p')} &= \rho \frac{(\Delta x)^2}{(\mathbf{a}_p^{(v)})_n}, & \mathbf{a}_s^{(p')} &= \rho \frac{(\Delta y)^2}{(\mathbf{a}_p^{(v)})_s} \\ \mathbf{a}_p^{(p')} &= \mathbf{a}_e^{(p')} + \mathbf{a}_w^{(p')} + \mathbf{a}_n^{(p')} + \mathbf{a}_s^{(p')} \\ \mathbf{b}_p^{(p')} &= \rho [(\mathbf{U}_w^* - \mathbf{U}_e^*)\Delta y + (\mathbf{V}_s^* - \mathbf{V}_n^*) \Delta x] \end{aligned}$$

Cette équation permet de déterminer le champ de la correction P' . La correction des pressions et des vitesses et maintenant possible et les valeurs déduites sont considérées comme des nouvelles estimations et la procédure est recommencée jusqu'à la convergence. Cette procédure est connue dans la littérature sous le nom de SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation) et est très largement utilisée.

L'algorithme SIMPLE sera donc défini par les étapes suivantes :

- ✓ Estimer le champ de pression ;
- ✓ Résoudre les équations de quantité de mouvement pour obtenir U^* et V^* ;
- ✓ Résoudre l'équation en P' et cela en utilisant U^* et V^* ;
- ✓ Calculer le champ de pression P et le champ des vitesses U et V à partir de leurs expressions de correction en utilisant P' ;
- ✓ Résoudre l'équation discrétisée pour d'autres variables dépendantes ϕ (température, concentration.... etc.) s'ils influencent le champ d'écoulement ;
- ✓ Traiter la pression P comme un nouveau estimate P' , et revenir à l'équation (3.35)

Pour répéter la même procédure jusqu'à la convergence.

Partie I : " Présentation du puits OKS#37 "

Le puits OKS#37 c'est un puits vertical de développement des hydrocarbures situé dans le champ de Berkaoui (Ouargla) dans le but d'investiguer les hydrocarbures à une profondeur total (TVD) de 3454 m avec un liner de 4.5".

I.1 Fiche technique et localisation du puits :

Le tableau suivant nous montre les informations du puits :

Well Name	OKS-37	
Field	Berkaoui	
Basin	Oued Mya	
Block	438	
Well Classification	Development	
Operator	SONATRACH	
Drilling Contractor	ENTP	
Drilling Rig	TP184	
Surface Location	LSA	X = 735131.8438 Y = 124627.2097
	Latitude	N 31° 41' 31.6775"
	Longitude	E 05° 10' 43.6351"
	UTM Zone 31	X = 706512.03 Y = 3508106.92
Well Located in coordinate system	UTM Zone 31on North Sahara, Clarke 80 (This system will be used as reference in all documents)	
Elevations	Ground Level	195.71 m Above Mean Sea Level (AMSL)
	Rotary Table Elevation	7.65 m Above Ground Level (AGL)
	Rotary Table Elevation	203.36 m Above Mean Sea Level (AMSL)
Well TD	MD/TVD	3454 m

Tableau n°04 : Informations du puits OKS#37

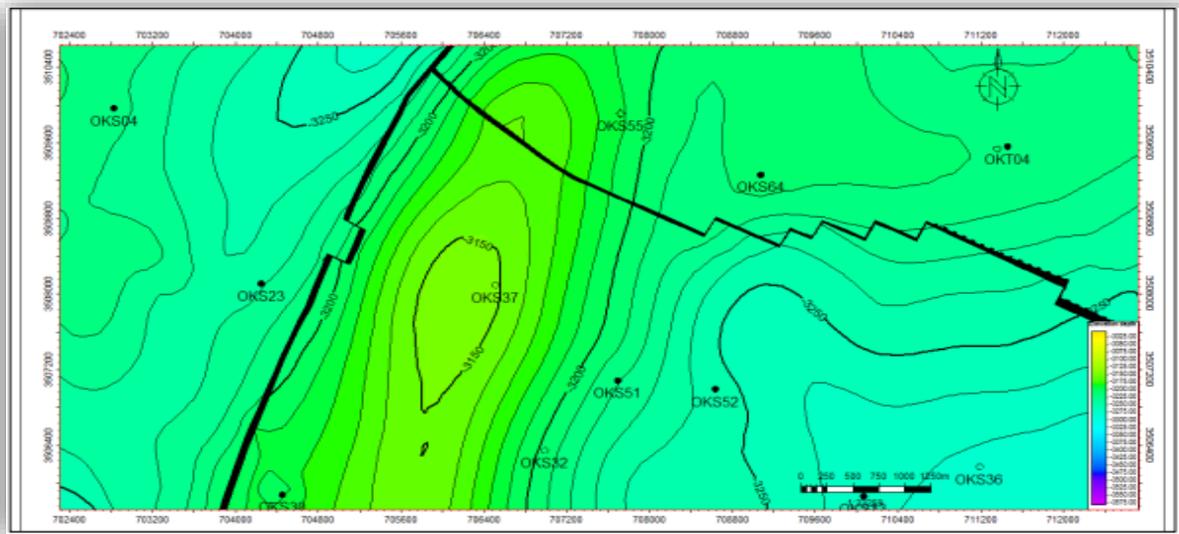


Figure n°21 : Localisation du puits OKS#37

I.2 Programmes de puits

I.2.1 Programme des outils :

HOLE SIZE	PRIMARY	BACK-UP
26"	<u>TCI NEW:</u> ER24JMRS (VAREL) If not available use GTX-C03 or SB415C (SMITH)	<u>TCI-RR:</u> GTX-C03 or good RR TCI
16"	<u>PDC-RR:</u> Q609F(BAKER) if not available use good available PDC	<u>PDC RR:</u> MM96R (HDBS)
12 1/4"	<u>PDC-New :</u> R813DGX (VAREL)	<u>PDC RR:</u> FM 2663 (HDBS)
8 1/2"	<u>PDC-New:</u> R613DGX (VAREL)	<u>PDC RR:</u> VTD613DGX (VAREL)
6"	<u>CORE HEAD (ENSP)</u> PDC New : CORE HEAD ENSP PDC New : MM94R HDBS	<u>IMP-RR:</u> FX64R (HDBS) or Good PDC
3''3/4 Clean out	<u>PDC RR:</u> FX63 (HDBS) or Chomp bit (SMITH)	

Tableau n°05 : Programme des outils OKS#37

I.2.1 Programme de la boue :

Hole Size	26"	16"	12 ¼"	8 ½"	6"
Interval Depth	00 - 233	233- 839	839-2446	2446-3318	3318 - 3454
Interval Length	233	606	1607	872	136
Casing Size	18 ⅝"	13 ⅜"	9 ⅝"	7"	Liner 4 ½"
Top of Cement	Surface				
Mud Type	Spud mud	Avoil DS.IE.70	Avoil DS.IE.80	Avoil DS.IE.90	Non Damaging Avoil DS.IE.90
Mud Weight	1.05-1.08	1.30	1.30	2.02	1.35 Confirm PER DP
plastic Viscosity	ALAP	ALAP	ALAP	ALAP	ALAP
Yield Point	40- 60	18-24	18 -16	14 - 12	12 - 10
Ratio Oil/Water	-	70/30- 80/20	80/20 90/10	90/10	90/10
HP HT filtrate	-	<10	<10	<10	<4
API filtrate	< 20 Before run Casing	.	.	.	.
PH	12	.	.	.	.
Alkalinity mud Pm	0.6 - 1.0	4	4	4	4
Alkalinity mud Pf	0.1 - 0.15	.	.	.	.
Alkalinity mud Mf	0.2 - 0.4	.	.	.	.
Electric stability	-	>600	>600	>800	>1000
LGS	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
MBT (kg/m3)	70 - 80	.	.	.	.

Tableau n°06 : Programme prévisionnel de la boue du puits OKS#37

I.3 Choix de la garniture de forage (BHA)

- Phase 26'' : (de la surface a 368 m)

ITEM	JOINTS	OD [IN]	ID (IN)	Connection
26'' Tricone bit	1	26.00		7 5/8'' Reg Pin + W/ Totco Ring
Bit sub	1	9.50	3.00	7 5/8'' Reg Box x 7 5/8'' Box
9.5'' Shock Sub	1	9.50	3.00	7 5/8'' Reg Pin x 7 5/8'' Box
9.5'' pony Collar	1	9.50	3.00	7 5/8'' Reg Pin x 7 5/8'' Box
9.5'' Drill Collar	1	9.50	3.00	7 5/8'' Reg Pin x 7 5/8'' Box
Stabilizer 15/16''	25	23.93	3.00	7 5/8'' Reg Pin x 7 5/8'' Box
9.5'' Drill Collar	1	9.50	3.00	7 5/8'' Reg Pin x 7 5/8'' Box
XO	1	9.50	3.00	7 5/8'' Reg Pin x 6 5/8'' Reg Box
8'' Drill Collar	12	8.00	2.81	6 5/8'' Reg Pin x 6 5/8'' Reg Box
XO	1	8.00	2.81	6 5/8'' Reg Pin x 4'' IF Box
5'' HWDP	6	5.00	3.00	4'' IF Pin x 4'' IF Box
DP	Xx	5.00	3.25	4'' IF Pin x 4'' IF Box

Tableau n°07 : Programme BHA de la phase 26''

- Phase 16'' : (de 368 à 854 m)

ITEM	JOINTS	OD [IN]	ID	Connection
16'' PDC bit	1	16''		7 5/8'' Reg Pin
Short neck NB Stabilizer 15''15/16	1	15.94	3.00	7 5/8'' Reg Box x 7 5/8'' Box
9''1/2 Short Drill Collar	1	9.50	3.00	7 5/8'' Reg Pin x 7 5/8'' Box
Stabilizer 15''15/16	1	15.94	3.00	7 5/8'' Reg Pin x 7 5/8'' Box
9''1/2 Drill Collar	1	9.50	3.00	7 5/8'' Reg Pin x 7 5/8'' Box
Stabilizer 15''15/16	1	15.94	3.00	7 5/8'' Reg Pin x 7 5/8'' Box
9.5'' Drill Collar	3	9.50	3.00	7 5/8'' Reg Pin x 6 5/8'' Reg Box
XO	1	9.50	3.00	6 5/8'' Reg Pin x Box
8'' Drill Collar	15	8.00	2.81	6 5/8'' Reg Pin x Box
8'' Hydraulic jar	1	8.00	3.00	6 5/8'' Reg Pin x Box
8'' Drill Collar	2	8.00	2.81	6 5/8'' Reg Pin x 4'' IF Box
XO	1	8.00	2.81	4'' IF Pin x 4'' Box
5'' HWDPs	06	5.00	3.00	4'' IF Pin x 4'' Box
DP	xx	5.00		4'' IF Pin x 4'' Box

Tableau n°08 : Programme BHA de la phase 16''

➤ Phase 12^{1/4} " : (de 854 à 2504 m)

ITEM	Joints	OD [in]	ID	Connection
12 ¼" PDC Bit	1	12.25		6"5/8 Reg Pin
NB Stabilizer 12 3/16"	1	12.19	3.00	6"5/8 RegBox X 7"5/8RegBox
9 ½ " Short Drill Collar	1	9.50	3.00	6"5/8 RegPin X 7"5/8RegBox
Stabilizer 12 3/16"	1	12.19	3.00	7"5/8 RegPin X 7"5/8RegBox
9 ½ " Drill Collar	1	9.50	3.00	7"5/8 RegPin X 7"5/8RegBox
Stabilizer 12 3/16"	1	12.19	3.00	7"5/8 RegPin X 7"5/8RegBox
9 ½ " Drill Collar	2	9.50	3.00	7"5/8 RegPin X 7"5/8RegBox
XO	1	9.50	2.81	7 5/8RegPin X 6 5/8RegBox
8" Drill Collar	9	8.00	2.81	6 5/8RegPin X 6 5/8RegBox
8" Hydraulic jar	1	8.00	2.75	6 5/8RegPin X 6 5/8RegBox
8" Drill Collar	2	8.00	2.81	6 5/8RegPin X 6 5/8RegBox
XO	1	8.00	2.81	6 5/8RegPin X 4 ½ IFBox
5" HWDPs	6	5.00	3.00	4 1/2 IF Pin X 4 1/2 IF Box

Tableau n°09 : Programme BHA de la phase 12^{1/4}"➤ Phase 8^{1/2}" : (de 2504 à 3399 m)

Item	Joints	OD [in]	ID	Connection
PDC bit	1	8.5		4 ½ Reg P
N-Bit Stabilizer	1	8 7/16	2.81	4 IF B x 4 IF B
Short Drill Collar	1	6.5	2.81	4 IF P x B
IB Stabilizer	1	8 7/16	2.81	4 IF P x B
Drill Collar	1	6.5	2.81	4 IF P x B
IB Stabilizer	1	8 7/16	2.81	4 IF P x B
Drill Collar	19	6.5	2.81	4 IF P x B
Drilling Jar	1	6.5	2.81	4 IF P x B
Drill Collar	2	6.5	2.81	4 IF P x B
Cross Over	1	6.5	3.00	4 IF P x 4 1/2 IF B
HWDP	6	5.0	3.00	4-1/2" IF Pin x Box
DP	xx	5.00		4-1/2" IF Pin x Box

Tableau n°10 : Programme BHA de la phase 8^{1/2}.

➤ Phase 6" : (de 3399 à 3553 m)

Item	Joints	OD [in]	ID[in]	Connection
6" PDC BIT	1	6	-	3 ½ Reg M
Near bit Stabilizer	1	5 15/16	2 1/4	3 ½ Reg Box x 3 ½ IF Box
Short Drill Collar (~3m)	1	4 3/4	2 1/4	3 ½ IF Pin x Box
IB String Stabilizer	1	5 15/16	2 1/4	3 ½ IF Pin x Box
Drill Collar	1	4 3/4	2 1/4	3 ½ IF Pin x Box
IB String Stabilizer	1	5 15/16	2 1/4	3 ½ IF Pin x Box
15 x Drill Collar	18	4 3/4	2 1/4	3 ½ IF Pin x Box
Drilling Jar	1	4 3/4	2 1/4	3 ½ IF Pin x Box
2 x Drill Collar	2	4 3/4	2 1/4	3 ½ IF Pin x Box
6 x HWDP	6	3"1/2	2.06	3 ½ IF
DP	xx	3.50		3 ½ IF

Tableau n°11 : Programme BHA de la phase 6"

I.4 Programme prévisionnel du puits OKS#37

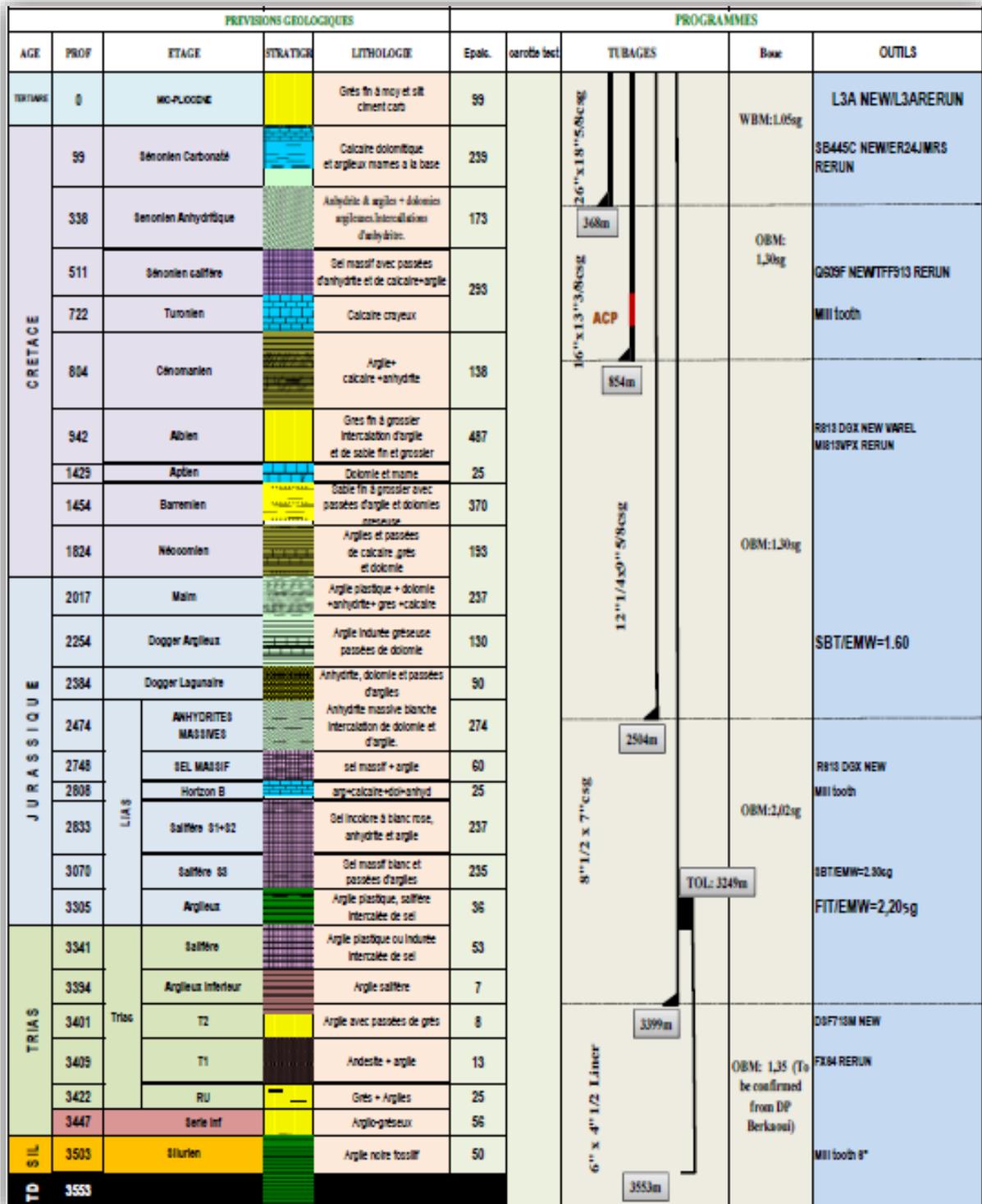


Figure n°22 : Programme prévisionnel de forage du puits OKS#37

Partie II : " Modélisation d'un fluide AVA pour la phase 16" sur le champ de Houad Berkaoui "

Dans cette partie on va étudier le comportement rhéologique de la boue à l'aide d'un rhéomètre Fann et un autre rhéomètre plus sophistiqué et plus précis "Physica MCR 301" puis on va essayer de donner le modèle rhéologique de cette de boue en fonction des résultats obtenus à l'aide des deux rhéomètres.

II.1 : Matériel et procédures expérimentales :

II.1.1 : Composition de la boue utilisée :

Produits	Fonctions	Quantité (L ou kg/m ³) R (O/W)=80/20
Huile	Solvant	659 l/m ³
Eau	Solvant	165 l/m ³
AVA Bentoil SA	Viscosifiant, Argile organophiles	/
AVA Bentoil HY	Viscosifiant, Argile organophiles	12 kg/m ³
Avoil PE	Premier émulsifiant	10 kg/m ³
Avoil SE	Deuxième émulsifiant	10 kg/m ³
Choux	Activation des émulsifiants	30 kg/m ³
Nacl	Activation d'eau	63 kg/m ³
Avoil FRHT	Réducteur de filtrat	0.5 kg/m ³
Barite	Agent alourdissant	452 kg/m ³

Tableau n°12 : Composition de la boue utilisée

I.1.2 : Matériel et protocoles expérimentales :

II.1.2.1 : Viscosimètre Fann : (Détails au premier chapitre)

On a utilisé le Rhéomètre Fann 35 A à 6 vitesses. On a les vitesses 600, 300, 200, 100, 6 et 3. Les paramètres mesurés sont la viscosité plastique, apparente, Yield Value. (Détails au premier chapitre).

➤ Description de protocole :

- ✓ A l'aide d'un viscosimètre Fann, on a fait un essai sur un échantillon de la boue utilisée pour différents vitesses de rotation on lit la lecture sur le cadran qui nous permet de déduire le taux et la vitesse de cisaillement.

- ✓ A l'aide des lectures obtenus on trace le graphe $\tau = f(\dot{\gamma})$ suivant le model **Bingham**, **Herschell Bulkley** et **Ostwald**.

II.1.2.2 : Rhéomètre Physica MCR 301 :

Cet appareil commercial fabriqué par la société "Anton Paar" est caractérisé par une boucle de contrôle électronique très performante qui permet de faire les mesures soit en contrainte soit en taux de cisaillement imposés avec pratiquement la même efficacité. Il est aussi pourvu d'une mesure de force normale. Le rhéomètre est équipé avec les dispositifs permettant d'élargir leur champ d'utilisation.

➤ Mesures :

- ✓ Moteur EC synchrone puissant
- ✓ Palier à air de haute précision
- ✓ TruGap™ Système pour la mesure de l'entrefer
- ✓ Direct Strain Oscillation (DSO) : Réglage de position en temps réel pour un réglage rapide et précis de la déformation
- ✓ Mesures dans le domaine de la nano-rhéologie.

➤ Caractéristiques du rhéomètre :

- ✓ Sollicitation dynamique : Déformation
- ✓ Vitesse de cisaillement : 10^{-7} - 3000 min^{-1}
- ✓ Force : 0.01 – 50 N
- ✓ Gamme de couples : $5 \cdot 10^{-6}$ – $2 \cdot 10^{-2} \text{ kg.m}$
- ✓ Gamme de fréquences mesurables : $5 \cdot 10^{-3}$ – 628 rad.s^{-1}
- ✓ Gamme de températures : $-150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ - $+1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- ✓ Atmosphère d'analyse : Air
- ✓ Mesure temporelle : Fonction de relaxation.



Figure n°23 : Rhéomètre Physica MCR 301

➤ **Equipements :**

- ✓ Four
- ✓ Plateaux parallèles (diamètre)
- ✓ Cône –Plan (angles, diamètre).

➤ **Description de protocole :**

- ✓ Agiter la boue pendant 10 min avec un agitateur à 6000 tr/mn pour avoir les paramètres initiaux.
- ✓ Mettre la boue dans la géométrie de rhéomètre et la pré-cisailler pendant une minute à une vitesse de cisaillement 800 s^{-1} .
- ✓ Lancer le cisaillement de la boue avec une rampe logarithmique de vitesse de cisaillement de 0.01 à 1000 s^{-1} avec 30 points de mesures à l'équilibre.
- ✓ On prend 45 secs pour l'équilibre (45 sec entre chaque mesure).

II.2 : Etude Comportement rhéologique de la boue [$\tau = f(\dot{\gamma})$] et détermination de modèle rhéologique :

II.2.1 : Résultats de rhéomètre Fann 35A :

Les résultats obtenus à partir de viscosimètre Fann durant l'expérience sur la boue AVA à base d'huile (phase 16'') d'une densité $d=1.30$ sont les suivant :

Vitesse de rotation 'w' (tr/min)	600	300	200	100	6	3
Lecture sur Fann Θ	48	28	20	11	3	2
Vitesse de déformation $\dot{\gamma}$ (s^{-1})	1021.8	510.9	340.6	170.3	10.218	5.109

Tableau n°13 : Les résultats obtenus de la boue à partie viscosimètre Fann

- Pour calculer la vitesse de déformation $\dot{\gamma}$, on utilise la formule suivante :

$$\dot{\gamma} = 1.703 * w \quad \text{[... Eqt 4.1]}$$

Avec : la constante **1.703** est spécifique au rhéomètre Fann 35A

II.2.2 : Approche suivant les modèles connus :

➤ **Modèle de Bingham :**

- Ce modèle est représenté par l'équation rhéologique suivante :

$$\tau = \tau_c + \mu_p \dot{\gamma} \quad [\dots \text{Eq 4.2}]$$

Avec :

τ : taux de cisaillement (Pa).

τ_c : contrainte seuil (Pa)

μ_p : viscosité plastique (Pa.s)

$\dot{\gamma}$: vitesse de cisaillement (s^{-1}).

- Calcule des paramètres μ_p et τ_c :

$$\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300} = 48 - 28 = 20$$

$$\mu_p = 20 \text{ cp}$$

$$\tau_c = 2 \theta_{300} - \theta_{600} = 2 * 28 - 48 = 8$$

$$\tau_c = 8 \text{ lb/100ft}^2$$

Les résultats de calcul des contraintes de cisaillements pour modèle de Bingham sont représentés dans le tableau suivant :

Vitesse de rotation 'w' (tr/min)	600	300	200	100	6	3
Vitesse de déformation $\dot{\gamma}$ (s^{-1})	1021.8	510.9	340.6	170.3	10.218	5.109
Contrainte de cisaillement τ (pas)	24.266	14.49	10.642	7.237	4.035	3.932
Viscosité (pas.s)	0.024	0.028	0.032	0.044	0.0420	0.820

Tableau n°14 : Les résultats obtenus suivant l'approche de modèle de Bingham

➤ **Modèle d'Ostwald (modèle à la loi de Puissance) :**

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad [\dots \text{Eq 4.3}]$$

k : indice de consistance

n : L'exposant n est l'indice de comportement qui traite l'écart avec le fluide newtonien.

$$n = 3.31 \log \frac{L 600}{L 300} = 3.31 \log \frac{48}{28} \longrightarrow n = 0.78$$

$$K = \frac{L 300}{500^n} = \frac{28}{500^{0.78}} \longrightarrow k = 0.22$$

Les résultats de calcul des contraintes de cisaillements pour modèle d'Ostwald sont représentés dans le tableau suivant :

Vitesse de rotation 'w' (tr/min)	600	300	200	100	6	3
Vitesse de déformation $\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	1021.8	510.9	340.6	170.3	10.218	5.109
Contrainte de cisaillement τ (pas)	23.436	13.648	9.948	5.794	0.645	0.376
Viscosité (pas.s)	0.024	0.028	0.0306	0.0357	0.0668	0.0780

Tableau n°15 : Les résultats obtenus suivant l'approche de modèle d'Ostwald

➤ **Modèle de Herschell Bulkley :**

Ce modèle est caractérisé par l'équation suivante :

$$\tau = \tau_c + k \dot{\gamma}^n \quad \dots \text{Eq4.4}$$

τ_c : contrainte d'Herschel (Pa)

k : consistance de la structure,

n : paramètre adimensionnel compris entre 0 et 1 et peut être considéré comme un indice de structure.

$$\tau_c = \theta_3 = 2$$

$$n = (3.32) \log [(\theta_{600} - \tau_c) / (\theta_{300} - \tau_c)] = (3.32) \log [(48 - 2) / (28 - 2)]$$

$$\implies n = 0.82$$

$$k = \theta_{300} / 511^n = 28 / 511$$

$$\implies k = 0.17$$

Les résultats de calcul des contraintes de cisaillements pour modèle de Herschel Bulkley sont représentés dans le tableau suivant :

Vitesse de rotation 'w' (tr/min)	600	300	200	100	6	3
Vitesse de déformation $\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	1021.8	510.9	340.6	170.3	10.218	5.109
Contrainte de cisaillement τ (pas)	24.851	14.491	10.664	6.456	1.504	1.267
Viscosité (pas.s)	0.024	0.028	0.0309	0.0372	0.1347	0.2223

Tableau n°16 : Les résultats obtenus suivant l'approche de modèle de Herschel Bulkley

NB :

Pour le calcul de la contrainte de cisaillement dans le modèle rhéologique de Bingham on doit convertir les unités en SI.

Pour le calcul de la viscosité on a utilisé le logiciel "Mud Ware " de MI SWACO (représenté sur l'annexe C).

I.2.3 : Résultats de rhéomètre Physica MCR 301 :

Les résultats obtenus à partir de l'expérience réalisé sur la boue AVA de densité $d=1.28$ avec un rhéomètre Physica MCR 301 sont donnés dans les tableaux suivants :

Interval:				2			
Number of Data Points:				30			
Time Setting:				30 Meas. Pts.			
				Meas. Pt. Duration 45s			
Measuring Profile:							
Shear Rate				$d(\gamma)/dt = 0,01 \dots 1000 1/s \log$			
Meas. Pts.	Shear Rate [1/s]	Shear Stress [Pa]	Viscosity [Pa·s]	Speed [1/min]	Torque [µNm]	Status	
1	0,01	0,1161	11,61	0,007788	6,165	WMa,Dy_	
2	0,01487	0,128	8,603	0,01158	6,793	WMa,Dy_	
3	0,02212	0,1599	7,227	0,01723	8,487	WMa,Dy_	
4	0,0329	0,1992	6,055	0,02562	10,58	WMa,Dy_	
5	0,04894	0,2446	4,997	0,03811	12,98	WMa,Dy_	
6	0,07279	0,3189	4,38	0,05668	16,93	WMa,Dy_	
7	0,1083	0,4713	4,354	0,08431	25,02	WMa,Dy_	
8	0,161	0,6215	3,86	0,1254	32,99	WMa,Dy_	
9	0,2395	0,7109	2,968	0,1865	37,74	Dy_ auto	
10	0,3562	0,7239	2,032	0,2774	38,43	Dy_ auto	
11	0,5298	0,7434	1,403	0,4126	39,46	Dy_ auto	
12	0,788	0,7581	0,962	0,6137	40,24	Dy_ auto	
13	1,172	0,7789	0,6646	0,9127	41,35	Dy_ auto	
14	1,743	0,8017	0,4599	1,358	42,56	Dy_ auto	
15	2,593	0,8297	0,32	2,019	44,05	Dy_ auto	
16	3,857	0,8568	0,2222	3,003	45,48	Dy_ auto	
17	5,736	0,8808	0,1536	4,467	46,76	Dy_ auto	
18	8,532	0,9075	0,1064	6,644	48,18	Dy_ auto	
19	12,69	0,9602	0,07567	9,882	50,97	Dy_ auto	
20	18,87	1,06	0,05617	14,7	56,28	Dy_ auto	
21	28,07	1,216	0,04333	21,86	64,58	Dy_ auto	
22	41,75	1,441	0,03452	32,51	76,51	Dy_ auto	
23	62,1	1,77	0,0285	48,36	93,96	Dy_ auto	
24	92,37	2,239	0,02424	71,93	118,8	Dy_ auto	
25	137,4	2,92	0,02126	107	155	Dy_ auto	
26	204,3	3,921	0,01919	159,1	208,2	Dy_ auto	
27	303,9	5,366	0,01766	236,7	284,9	Dy_ auto	
28	452	7,521	0,01664	352	399,3	Dy_ auto	
29	672,3	10,89	0,01619	523,6	577,9	Dy_ auto	
30	1000	16,55	0,01655	778,7	878,8	Dy_ auto	

Tableau n°17 : Résultats obtenus pour une vitesse de cisaillement ascendante

Interval:				3			
Number of Data Points:				30			
Time Setting:				30 Meas. Pts.			
				Meas. Pt. Duration 45s			
Measuring Profile:							
Shear Rate				$d(\gamma)/dt - 1000 \dots 0,011/s \log$			
Meas. Pts.	Shear Rate	Shear Stress	Viscosity	Speed	Torque	Status	
	[1/s]	[Pa]	[Pa.s]	[1/min]	[μ Nm]	[]	
1	1000	16,74	0,01674	778,7	888,5	Dy_auto	
2	672,3	10,87	0,01617	523,6	577	Dy_auto	
3	452	7,26	0,01606	352	385,4	Dy_auto	
4	303,9	5,007	0,01648	236,7	265,8	Dy_auto	
5	204,3	3,556	0,0174	159,1	188,8	Dy_auto	
6	137,4	2,583	0,0188	107	137,1	Dy_auto	
7	92,37	1,945	0,02106	71,93	103,3	Dy_auto	
8	62,1	1,509	0,02429	48,36	80,09	Dy_auto	
9	41,75	1,205	0,02886	32,51	63,98	Dy_auto	
10	28,07	0,9919	0,03533	21,86	52,66	Dy_auto	
11	18,87	0,8428	0,04465	14,7	44,74	Dy_auto	
12	12,69	0,7384	0,05819	9,882	39,2	Dy_auto	
13	8,532	0,6671	0,07819	6,644	35,41	Dy_auto	
14	5,736	0,6207	0,1082	4,467	32,95	Dy_auto	
15	3,857	0,5928	0,1537	3,003	31,47	Dy_auto	
16	2,593	0,5775	0,2227	2,019	30,66	Dy_auto	
17	1,743	0,5671	0,3253	1,358	30,11	Dy_auto	
18	1,172	0,5591	0,477	0,9127	29,68	Dy_auto	
19	0,788	0,5571	0,7069	0,6137	29,57	Dy_auto	
20	0,5298	0,5524	1,043	0,4126	29,32	Dy_auto	
21	0,3562	0,5516	1,549	0,2774	29,29	Dy_auto	
22	0,2395	0,5578	2,329	0,1865	29,61	Dy_auto	
23	0,161	0,5659	3,514	0,1254	30,04	WMa,Dy_	
24	0,1083	0,5525	5,103	0,08431	29,33	WMa,Dy_	
25	0,07279	0,476	6,54	0,05669	25,27	WMa,Dy_	
26	0,04894	0,3697	7,554	0,03811	19,63	WMa,Dy_	
27	0,03291	0,287	8,721	0,02562	15,23	WMa,Dy_	
28	0,02212	0,2282	10,32	0,01723	12,11	WMa,Dy_	
29	0,01487	0,1836	12,34	0,01158	9,747	WMa,Dy_	
30	0,01	0,1543	15,43	0,007788	8,193	WMa,Dy_	

Tableau n°18 : Résultats obtenus pour une vitesse de cisaillement descendante

I.2.4 : schématisation et interprétation des graphes [$\tau = f(\dot{\gamma})$], [$\mu = f(\dot{\gamma})$] :

Le Graphe ci-dessous [$\tau = f(\dot{\gamma})$], représente les résultats donné par le rhéomètre MCR 301 :

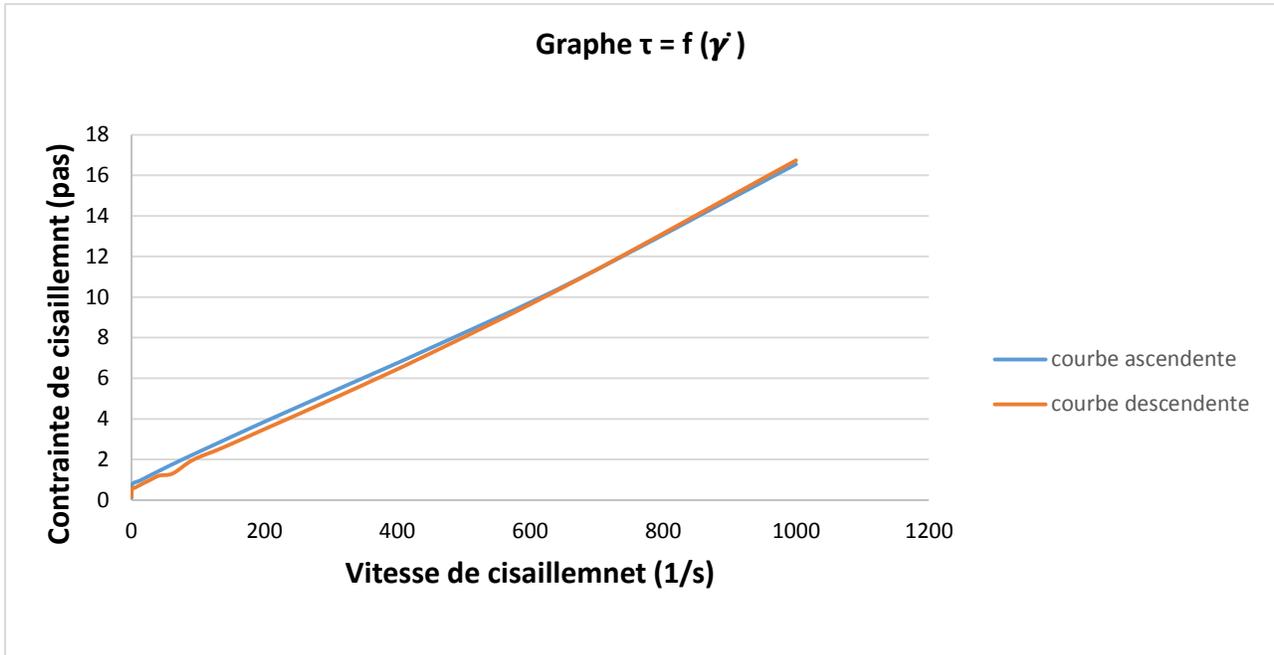


Figure n°24 : Graphe $\tau = f(\dot{\gamma})$ des résultats de MCR 301

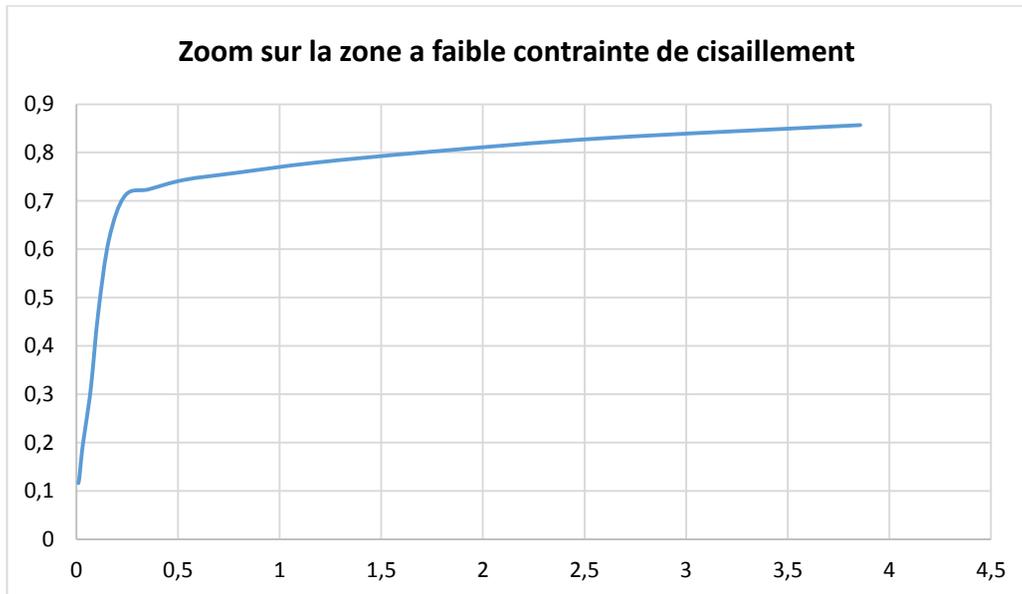


Figure n°25 : Zoom sur la zone à faible taux de cisaillement

D'après le graphe ci-dessus, on remarque que la contrainte de cisaillement augmente en fonction de la vitesse de cisaillement d'une manière quasi linéaire avec une contrainte seuil, et on distingue un léger espacement entre la courbe ascendante et la courbe descendante à partir d'une certaine valeur de contrainte de cisaillement, Cette différence nous montre clairement le critère de la thixotropie qui caractérise les boues de forage.

Le graphe ci-dessous [$\tau = f(\dot{\gamma})$] montre la représentation des résultats donné par un viscosimètre Fann en supposant les modèles rhéologiques (Bingham, Ostwald et Herschel Bulkley) :

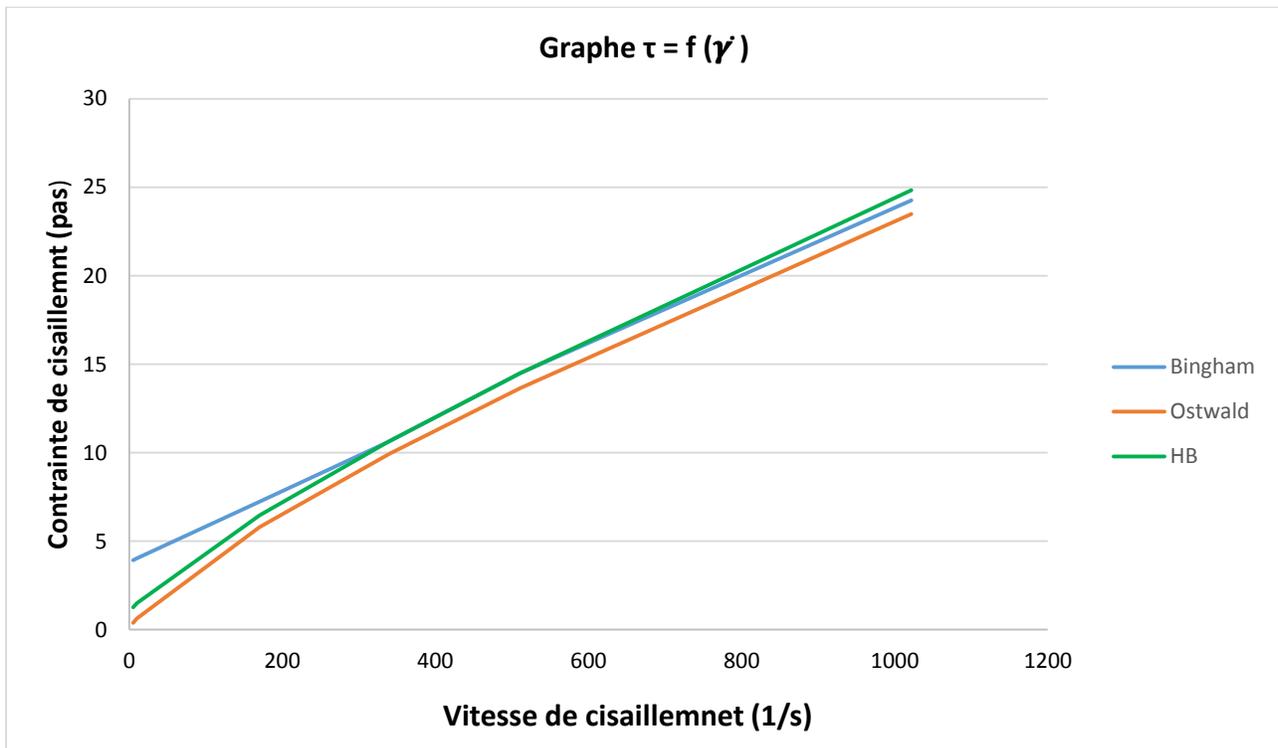


Figure n°26 : Graphe $\tau = f(\dot{\gamma})$ pour les différents modèles rhéologiques

On remarque sur le graphe n°26 que la contrainte de cisaillement augmente en fonction de la vitesse de cisaillement, pour les différents modèles. Et on compare les 03 graphes de la figure (17) par rapport au graphe de la courbe ascendante de la figure (15) et la figure (16), on constate que notre boue à base d'huile à un comportement semblable au modèle rhéologique de **Bingham** (augmentation linéaire de la contrainte de cisaillement à partir d'une contrainte seuil suivant la loi $\tau = \tau_c + \mu \dot{\gamma}$) ; et cela pour des vitesses de cisaillement assez élevé (partir de $\dot{\gamma} = 4 \text{ s}^{-1}$).

Et un comportement suivant le modèle de **Herschel Bulkley** ($\tau = \tau_c + k \dot{\gamma}^n$) pour les faibles taux de cisaillement ce qui est déduit à partir de la figure (16).

Les graphes ci-dessous représentent les résultats de viscosimètre Fann et rhéomètre MCR301 pour l'étude de la viscosité en fonction de taux de cisaillement :

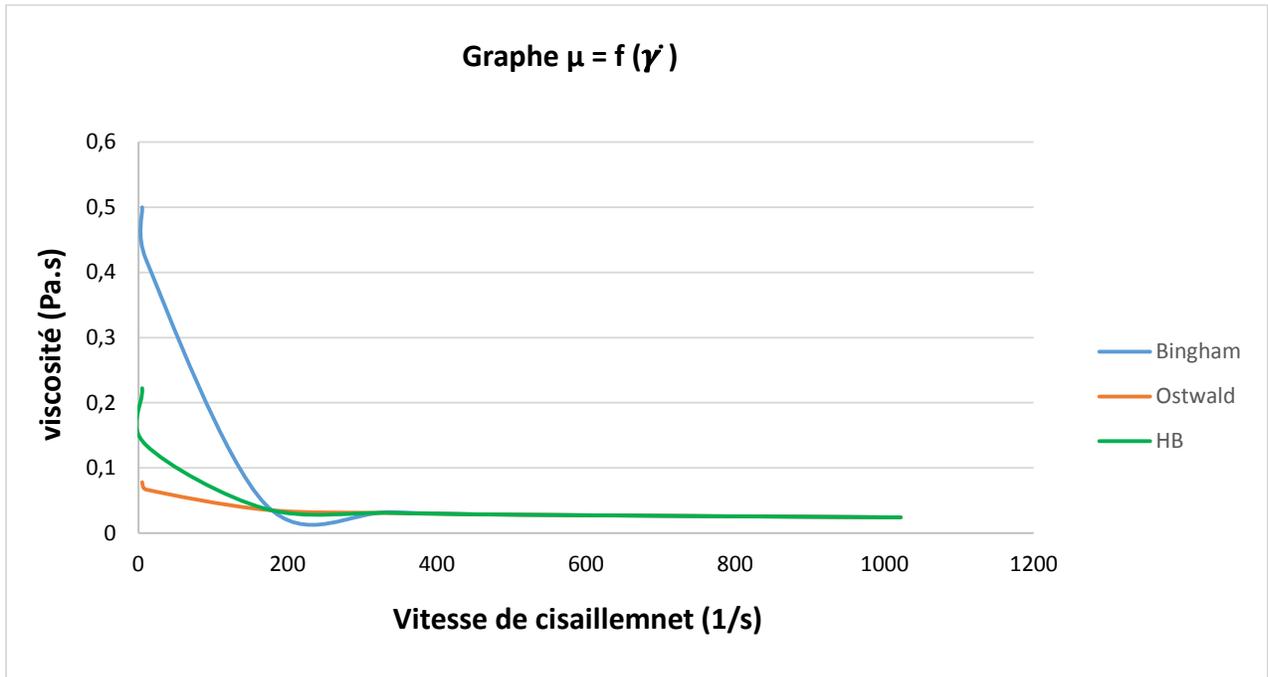


Figure n°27 : Graphe $\mu = f(\dot{\gamma})$ de viscosimètre Fann pour les différents modèles rhéologiques

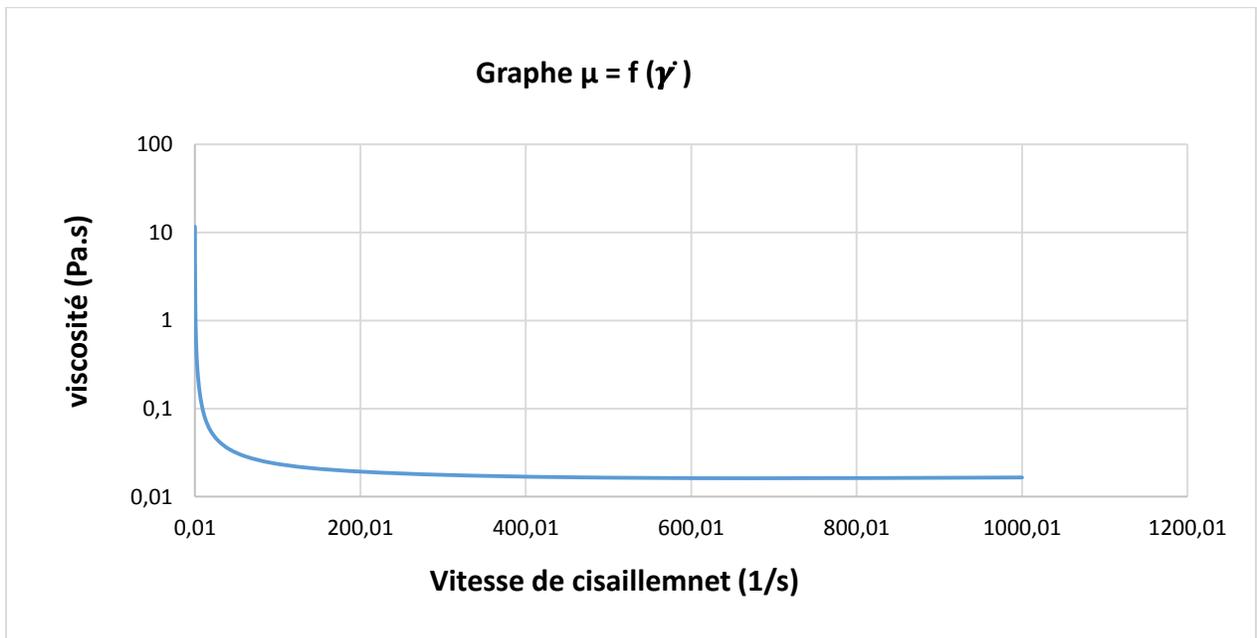


Figure n°28 : Graphe $\mu = f(\dot{\gamma})$ de rhéomètre MCR 301 pour la boue

A partir des figures (27) et (28), on constate que la viscosité apparente diminue en fonction de l'augmentation de taux de cisaillement jusqu'à atteindre une valeur critique puis elle deviendra constante et cela tous les modèles rhéologiques supposés.

D'après la figure (28) obtenue à partir de rhéomètre MCR 301 : il nous montre bien précisément l'allure de la viscosité en fonction de taux de cisaillement qu'est proche de l'allure de graphe obtenu de viscosimètre Fann pour le modèle Binghamien.

Partie II : " Simulation de la boue avec le logiciel Drillbench "

II.1. Présentation de Drillbench de Schlumberger :

Drillbench est une suite de logiciels appartenant à la société Schlumberger dédié à la conception et l'évaluation de toutes les opérations de forage. Il est le résultat de plus de 15 ans de recherche de forage et a des caractéristiques uniques dans la simulation dynamique du processus de flux du puits de forage.

Drillbench est une compilation de plusieurs applications individuelles en se concentrant sur différents défis rencontrés dans une opération de forage.

Presmod est l'une des applications de Drillbench. Il met l'accent sur le forage hydraulique et modélisation des pressions et des températures du puits de forage pendant toutes les phases de l'opération de forage. Presmod comprend des paramètres important tels que la pression et les propriétés des fluides selon la température, les propriétés thermodynamique, description détaillée de la géométrie et les effets opérationnels.

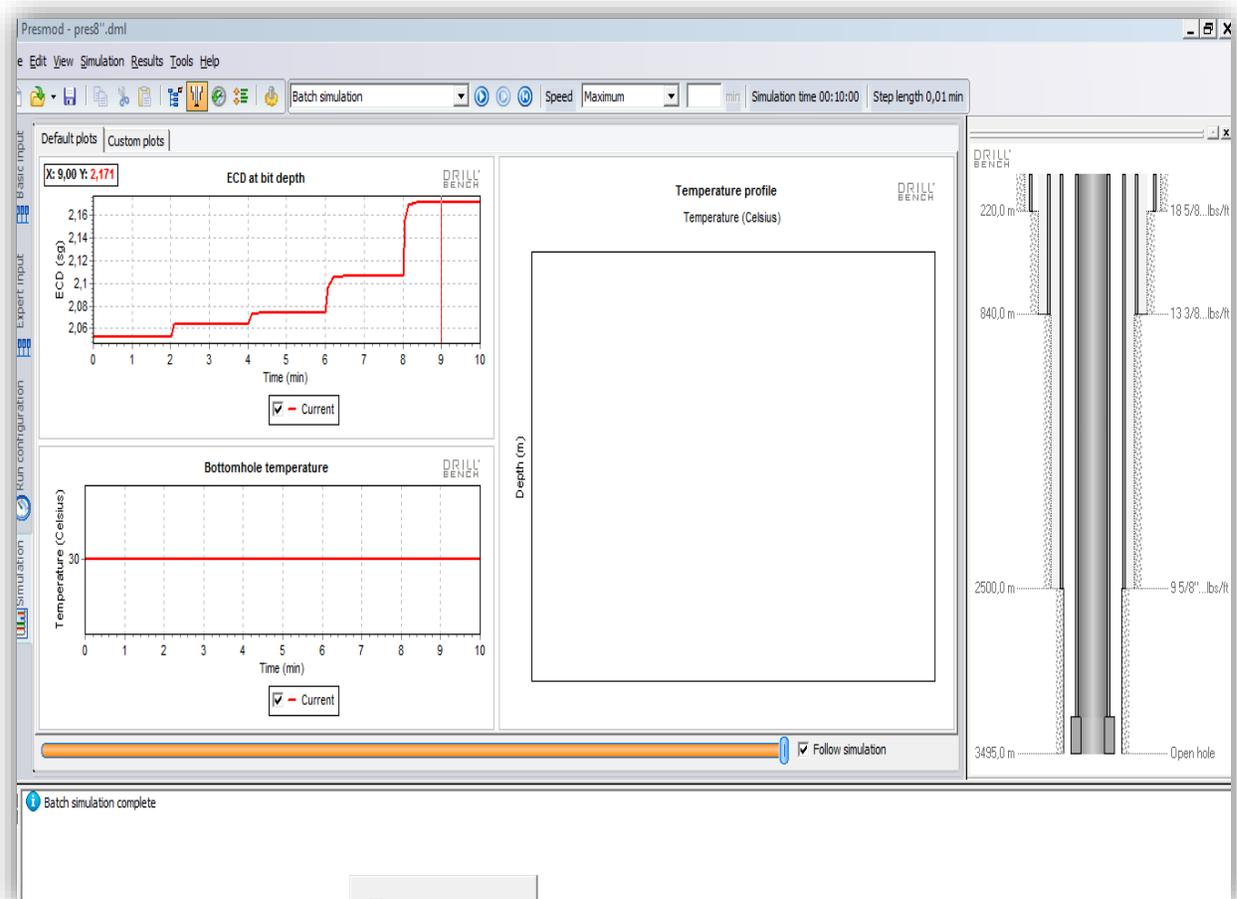


Figure n°29 : Fenêtre de logiciel Drillbench

II.2 : Etude de changement des pertes de charges en fonction de débit :

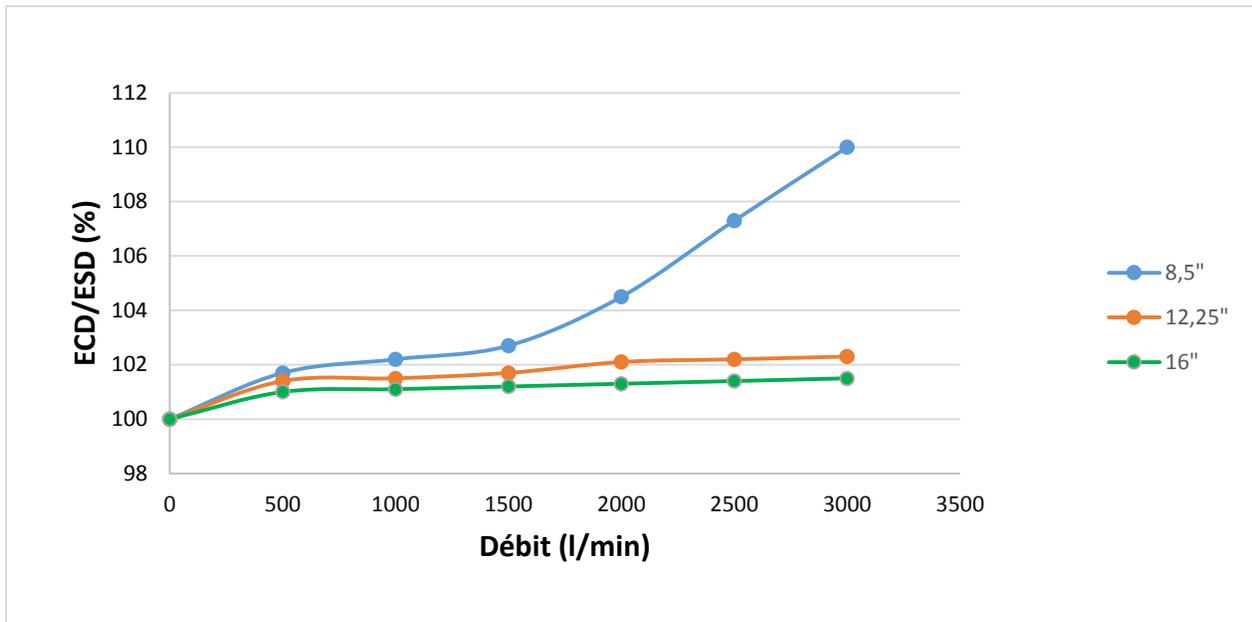


Figure n°30 : ECD/ESD en fonction des différents diamètres du trou pour un RPM constant

RPM = 90 tr/min

Il est évident que l'augmentation de débit d'injection entraîne une augmentation de la vitesse axiale dans l'annulaire, ce qui cause l'augmentation de nombre de Reynolds et donc les pertes charges dans l'annulaire.

Dans notre simulation représentée sur la figure n°30, on a constaté que les pertes de charges (représenté par le rapport ECD/ESD en %) augmente d'une façon quasi linéaire avec une faible pente pour les annulaires relativement grands (un grand diamètre hydraulique) et d'une façon parabolique et assez élevé pour les annulaires étroits (un diamètre hydraulique faible).

On constate une augmentation de 11% de l'ECD par rapport à l'ESD pour un débit 3000 l/min pour un diamètre de 8.5'' et une augmentation de 2.5% pour un diamètre de 12.25'' a un même débit.

II.3 : Etude de changement des pertes de charges en fonction de la vitesse de rotation RPM :

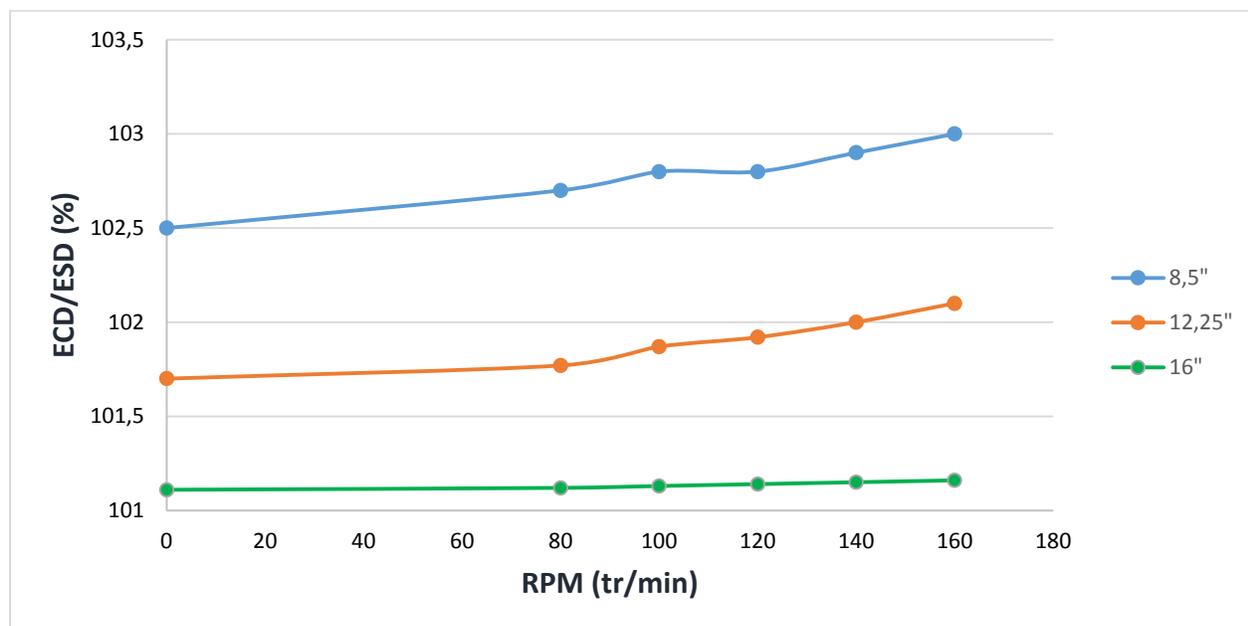


Figure n°31 : ECD/ESD en fonction différents diamètres du trou pour un débit d'injection constant $Q = 1500 \text{ l/min}$

Beaucoup d'études ont été mené pour la détermination de la relation entre la vitesse de rotation de la garniture et les pertes de charges dans l'annulaire, ces études ont montré que l'augmentation de la vitesse de rotation entraîne une augmentation de l'ECD mais d'une façon différente suivant les diamètres de l'annulaire.

Cette augmentation de l'ECD est due à la formation des écoulements oscillatoires criant des modèles de fluides très complexes tels que les tourbillons de Taylor..., ce qui augmente les pertes de charges par friction.

D'après notre simulation représentée dans le graphe ci-dessus, on a constaté que l'effet de la vitesse de rotation est quasi négligeable dans les grands annulaires et qu'est de l'ordre de 0.15% entre les tiges à l'arrêt et les tiges en rotation avec une vitesse de 160 tr/min. Par contre l'effet de la vitesse de rotation prend de valeur plus que les annulaires deviennent plus étroits donc on a une augmentation significative et sensible de l'ECD par rapport à la vitesse de rotation.

On constate aussi que pour des vitesses de rotation plus petites (inférieur à 50 tr/min) on a une légère variation des pertes de charges pour tous les diamètres et au-delà de cette vitesse on a une augmentation linéaire pour les petits diamètres avec une anomalie pour la vitesse 100 tr/min.

II.4 : Etude de changement des pertes de charges dans la phase 8^{1/2}'' :

III.4.1. En fonction de débit pour les différentes vitesses de rotation :

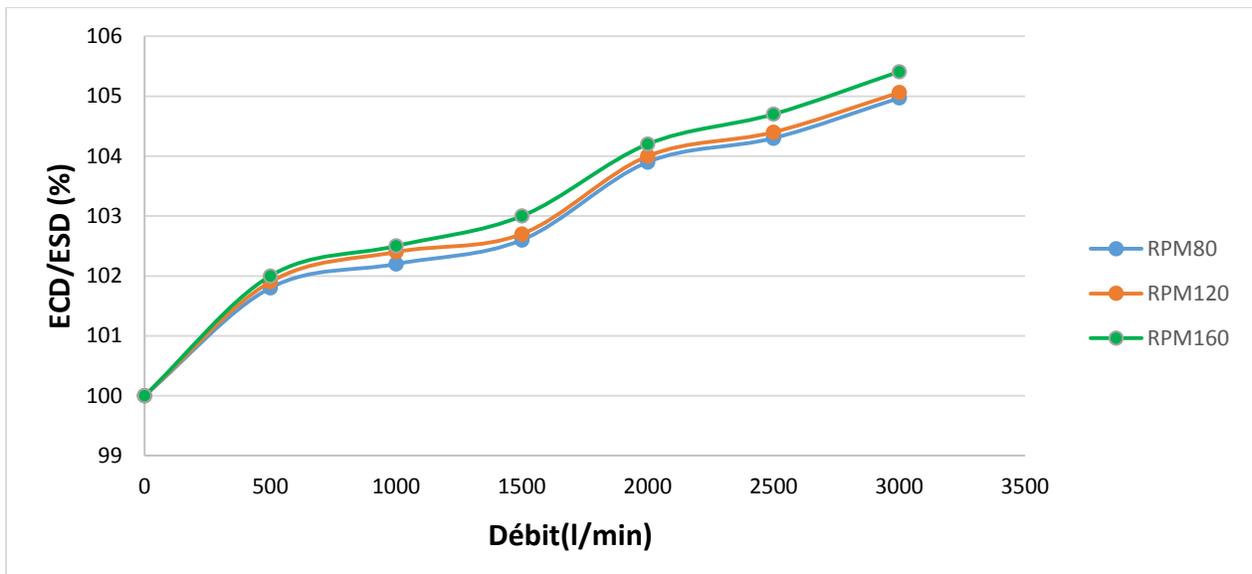


Figure n°32 : ECD/ESD en fonction des débits d'injection pour différents RPM

D'après le graphe ci-dessus qui représente le rapport de l'ECD/ESD en fonction de débit pour les différentes vitesses de rotation, on constate une augmentation de rapport ESD/ECD (augmentation des pertes de charges) pour toutes les vitesses de rotation avec l'augmentation de débit et de même profil mais d'une grandeur différentes (plus que la vitesse de rotation augmente plus le rapport augmente).

On remarque clairement que pour des faibles débits d'injection il n'y aura pas une grande différence de l'ECD/ESD pour les différentes vitesses de rotation, mais plus que le débit augmente on aura une séparation des courbes, cette dernière se distingue de plus avec l'augmentation de la vitesse de rotation.

Cette augmentation de rapport ECD/ESD et la séparation des courbes est dû donc au couplage de l'effet de la vitesse de rotation et de débit.

II.4.2. En fonction de la vitesse de rotation pour les différents débits d'injection :

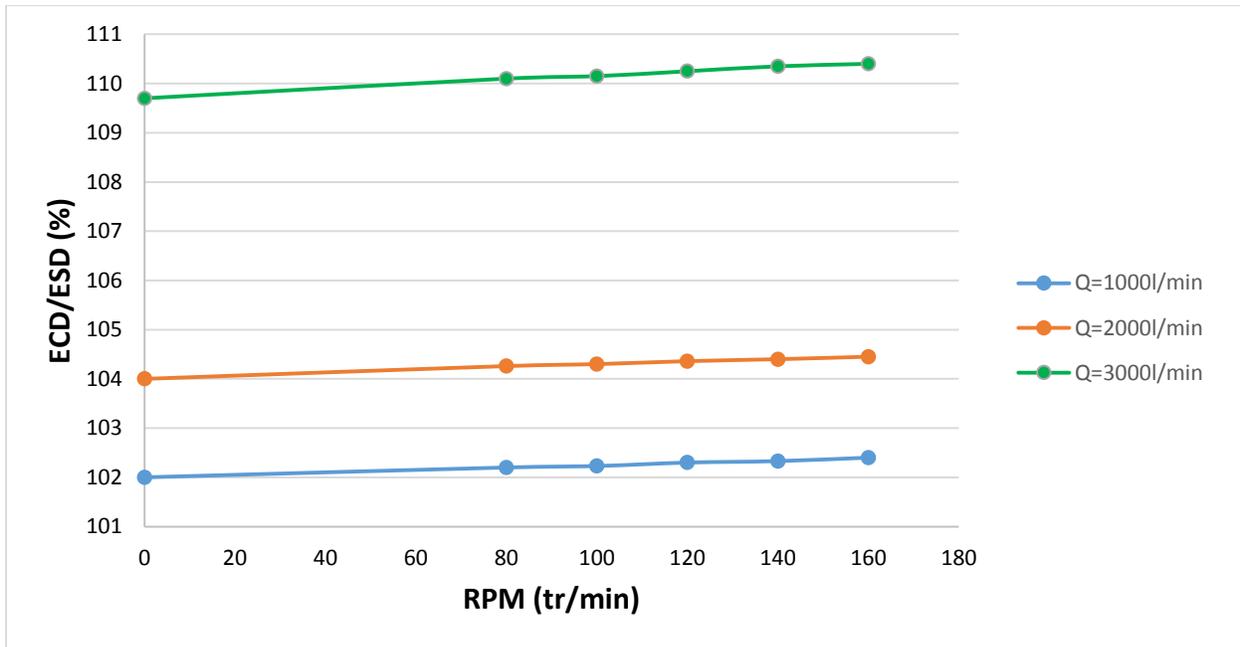


Figure n°33 : ECD/ESD en fonction de RPM pour différents débits d'injection

D'après le graphe ci-dessus qui représente le changement de rapport ECD/ESD (pertes de charges) en fonction de la vitesse de rotation (RPM) pour les différents débits d'injection, on remarque une augmentation linéaire de ce rapport pour tous les débits avec une même tendance à l'augmentation mais d'une cadence différente suivant le carré de (Q_2 / Q_1) .

II.5 : Etude de changement des pertes de charges en fonction de débit pour les différents modèles rhéologiques :

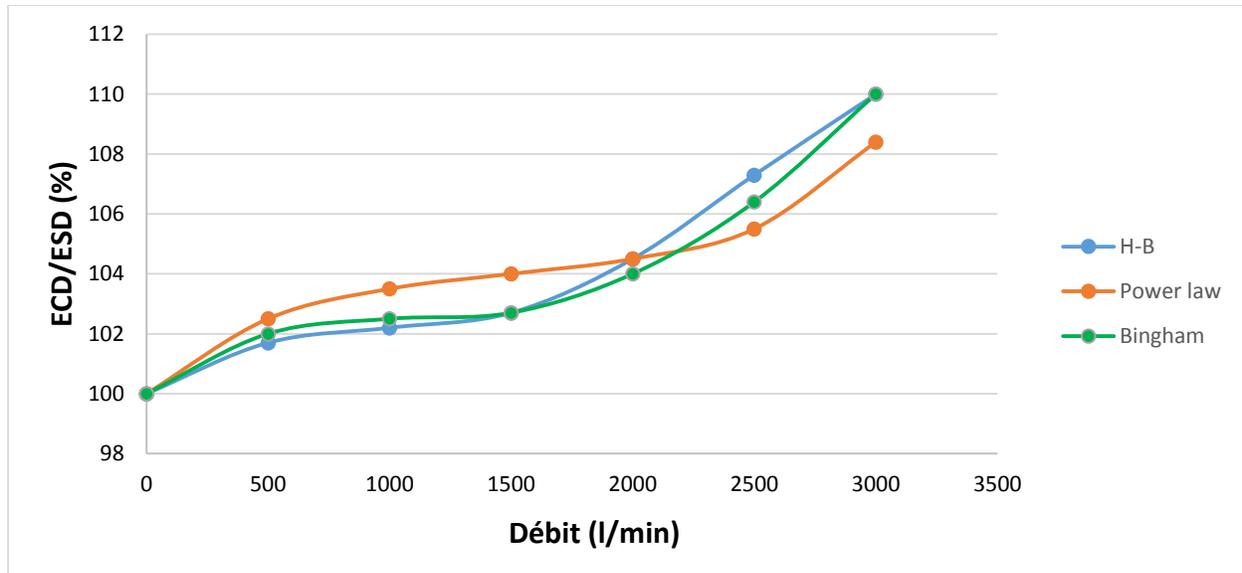


Figure n°34 : ECD/ESD en fonction de débit d'injection pour les différents modèles rhéologique

Le modèle rhéologique est toujours utilisé pour obtenir les expressions analytique qui modélisent l'écoulement des fluides non -Newtoniens, d'où la valeur des pertes de charges dans l'annulaire dépend de modèle rhéologique de ce fluide, ce qu'est très remarquable sur les graphes de la figure ci-dessus.

Donc on constate que les pertes de charges augmentent pour tous les modèles en fonction de débit et ça est dû à l'augmentation de la vitesse dans l'annulaire, mais d'une manière à ce que :

Pour les modèles de Bingham plastique et Herschel Bulkley (H-B), on a le même profile et qu'est différent de Power-Law. Cette différence est due à l'expression de la viscosité globale du fluide ainsi que le profil des vitesses dans l'annulaire qui est spécifique pour chaque modèle.

Et aussi, on constate que pour les débits inférieures à 2000 l/min la courbe de modèle Power-Law est au-dessus des courbes des deux autres modèles et au-delà de ce débit les courbes vont s'inverser et ça est dû au changement de régime d'écoulement (le nombre de Reynolds et le coefficient de friction).

Conclusion :

Les nouvelles technologies adaptés dans le domaine pétrolier en général, et en forage en particulier ainsi que la quête vers la réalisation des forages plus économiques et avec plus d'efficacités ont contribué à faire des études plus profondes pour mieux comprendre l'aspect physicochimique et le comportement rhéologiques des fluides de forage dans le but de l'amélioration de leurs caractéristiques afin de les adapter aux différents problèmes rencontrés lors d'un forage.

Les études rhéologiques des boues de forage ont effectué dans le but de comprendre le comportement rhéologique de ces derniers sous l'effet de plusieurs facteurs (Type de boue, température, pression, concentration et type de viscosifiant...) afin d'améliorer les caractéristiques rhéologiques et hydrauliques de ces boues.

L'étude de l'évaluation des pertes de charges dans l'annulaire en fonction des différents paramètres de forage (débit, vitesse de rotation), du modèle rhéologique du fluide de forage et la détermination des relations qui les relie se révèlent très important surtout dans les forages profonds et a diamètres annulaires faibles car ils présentent une influence direct sur la vitesse d'avancement (ROP), la stabilité des parois et les pertes de circulation. L'ECD (Equivalent Circulating Density) est toujours limité par la pression de fracturation des formations.

D'une autre part, la maîtrise des paramètres rhéologiques des boues de forage, ainsi que la bon évaluation des pertes de charges dans l'annulaire est un intérêt économique très important car ils réduisent les temps d'arrêts dus aux problèmes rencontrés dans le puits (pertes de circulation, coincement...), et aide à optimiser la vitesse d'avancement et réduit le prix de reviens de mètres forés.

Dans la première partie de notre étude, on a déterminé un modèle rhéologique d'une boue à base d'huile utilisé dans le forage de la phase 16'' dans le champ Berkaoui en utilisant deux (02) types de rhéomètres (Fann et Physica MCR 301). Le modèle Binghamien a permis de reproduire d'une manière satisfaisante le comportement de notre boue dans cette phase de forage.

Dans la deuxième partie de ce mémoire; on s'est intéressé au changement de l'ECD en fonction du débit et de la vitesse de rotation (RPM), ainsi que le modèle rhéologique de la boue dans les différentes phases, et à l'aide d'un logiciel de simulation Drillbench qui nous permis de voir d'une manière claire l'effet de changement de ces paramètres sur l'ECD, qui a une relation linéaire avec les pertes de charges.

Ainsi, on a conclu que l'augmentation du débit et de la vitesse de rotation font augmenter l'ECD pour toutes les phases mais avec des profils différents. Aussi que l'effet de ces derniers deviennent plus important dans les annulaires étroits.

On a pu déduire aussi que le modèle rhéologique de la boue a une grande influence sur les pertes de charges dans l'annulaire et sur le régime d'écoulement.

Bibliographies

- [1] ENGEL Ryming «Dynamique des fluides » deuxième édition.
- [2] P-Y.Lagrée Cours ENSTA « Transfert de masse » P-Y.Lagrée.
- [3] Suhas V.Patankar « Numerical Heat Transfer and Fluid flow » S V 1980.
- [4] « Manuel technique des fluides de forage » Tome 1 et Tome 2 éditions 1990.
- [5] « Fluide de forage » ENSPM Formation Industrie - IFP Training 2006
- [6] MI SWACO « Engineering Drilling Fluid » V1 édition 2001.
- [7] API RP 13D « Recommended Practice on the Rheology and Hydraulics of Oilwell Drilling Fluids » Fifth edition .2006. Washington, DC.
- [8] Adil RIDHA « Dynamique des fluides réels » Copyright 2008 Université Caen.
- [9] Olivier LOUISNARD « Cours de mécanique des fluides » Septembre 2012.
- [10] KHODJA Mohamed. Thèse Doctorat « Etude de performances et considérations environnementales des fluides de forage » soutenu en 2008 a L'institut National Polytechnique de Toulouse.
- [11] FOURAR Karim. Mémoire Magister « Amélioration des propriétés rhéologiques : des fluides de forage a base biopolymères : application aux puits horizontaux » soutenu en 2007 à l'Université M'hamed Bougara UMBB.
- [12] AMARA Rabah. Mémoire Magister « Modélisation d'écoulement des fluides de forage dans un forage conventionnel » soutenu en 2008 à l'Ecole National Polytechnique.
- [13] BOUKERROU Mohamed. Mémoire Magister « Amélioration des performances des boues de forage » soutenu en 2012 à l'Ecole National Polytechnique.
- [14] BENKHEDDA Mohamed. Mémoire Magister « Transferts thermiques dans une conduite cylindrique annulaire men d'ailettes » soutenu en 2010 a Université de Constantine.
- [15] ABDELFETTAH Belaid. Mémoire Magister « Etude de la convection mixte dans un tube verticale » soutenu en 2009 a Université de Constantine.
- [16] Alexandre RAGOULLIAUX. Thèse Doctorat «Etude Rhéologique de système émulsion inverse/Argile organophiles» Soutenu en Septembre 2008 à L'Université Pierre et Marie Curie - Paris.

Bibliographies

- [17] Saïd HALLAI. Mémoire Master (Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou) soutenu en 2016.
- [18] Escudier, M.P., Oliveira, P.J., Pinho, F.T. 2002. Fully developed laminar flow of purely viscous non-Newtonian liquids through annuli, including the effects of eccentricity and inner-cylinder rotation, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 23, 52–73
- [19] Wang Zhongyirrg and Tang Songran 1986 « The Flow Effect Of Mud in Annulus And The Selection Of Rheological Parameters » Papier SPE 14871-MS
- [20] Subramanian.R et al 2000 « Experimental Study on Friction Pressure Drop for Non-Newtonian Drilling Fluids in Pipe and Annular Flow » Papier SPE 64647-MS.
- [21] Okafor M.N. 1992 « The Experimental Comparison Of Rheology Models For Drilling Fluids» Papier SPE 24086.
- [22] Ramadan Ahmed 2010 « The Effect of Drill string Rotation on Equivalent Circulation Density: Modeling and Analysis of Field Measurements » Papier SPE 135587.
- [23] Terry Hemphil, Halliburton 2015 « Validation of Drillpipe Rotation Hydraulics Using Drillpipe Eccentricity as a Key Factor » Papier SPE-176451-MS.
- [24] Terry Hemphil, Halliburton, Peter Bern and Juan Carlos Rojas« Field Validation of Drillpipe Rotation Effects on Equivalent Circulating Density » Papier SPE 110470.
- [25] Oney Erge & al 2015 « The Effects Of Drillstring- eccentricity-Rotation and Bucking Configurations on annular Frictional Pressure Losses While Circulating Yield-Power-Law Fluids » Papier SPE 167950-PA.
- [26] Olatunbosun Anifowoshe 2012 « The Effect Of Equivalent Diameter Definitions on Frictional Pressure Loss Estimation in an Annulus with Pipe Rotation» Papier SPE 151176 2012.
- [27] Benjamen Herzhafl & al 2003 «Influence of Temperature and Clays/Emulsion Microstructure on Oil-Based Mud Low Shear Rate Rheology» Papier SPE-86197-PA
- [28] Peter E.Clark 1995 «Drilling Mud Rheology and the API Recommended Measurement» Papier SPE-29543-MS.
- [29] Webographie.

Annexe A

A.I Les lois régissant l'écoulement des boues de forage

I. Equation de Navier-Stocks suivant \overrightarrow{ox} :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) &= \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ &= \frac{\partial}{\partial x} [2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - p] + \frac{\partial}{\partial y} [\mu (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial z} [\mu (\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial x} [\lambda \text{div } \vec{u}] + \rho f_x \\ &= 2\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial}{\partial y} (\frac{\partial v}{\partial x}) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \mu \frac{\partial}{\partial z} (\frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} [\lambda \text{div } \vec{u}] + \rho f_x \\ &= \mu (\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial x} [\lambda \text{div } \vec{u}] + \rho f_x \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta \vec{u} + (\lambda + \mu) \overrightarrow{\text{grad}} \text{div } \vec{u} + \rho f_x \end{aligned} \quad \text{[...Eq A.1]}$$

Da la même manière on trouvera :

Suivant \overrightarrow{oy} :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) &= \mu (\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \frac{\partial}{\partial y} (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y} \\ &[\lambda \text{div } \vec{u}] + \rho f_y \end{aligned} \quad \text{[...Eq A.2]}$$

Suivant \overrightarrow{oz} :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) &= \mu (\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \frac{\partial}{\partial z} (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z} \\ &[\lambda \text{div } \vec{u}] + \rho f_z \end{aligned} \quad \text{[...Eq A.3]}$$

II. Théorème de transport de Reynolds

Considérant une masse de fluide spécifique, qu'on suit, une courte période « Δt » lors de son écoulement.

Soit « α » une propriété du fluide dans un référentielle lagrangien **[$\alpha = \alpha(t)$]**.

Annexes

La vitesse de variation de : $\alpha(t) dV \Rightarrow \frac{d}{dt} \int_V \alpha(t) dV$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \alpha(t) dV &= \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\delta t} \left(\int_{V(t+\delta t)} \alpha(t+\delta t) dV - \int_{V(t)} \alpha(t) dV \right) \right] \\ &= \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\delta t} \left(\int_{V(t+\delta t)} \alpha(t+\delta t) dV - \int_{V(t)} \alpha(t+\delta t) dV \right) \right] \\ &\quad + \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\delta t} \left(\int_{V(t)} \alpha(t+\delta t) dV - \int_{V(t)} \alpha(t) dV \right) \right] \quad \text{[...Eq A.4]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{d}{dt} \int_V \alpha(t) dV &= \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\delta t} \left(\int_{V(t+\delta t)} \alpha(t+\delta t) dV - \int_{V(t)} \alpha(t+\delta t) dV \right) \right. \\ &\quad \left. + \int_{V(t)} \frac{\partial \alpha}{\partial t} dV \right] \quad \text{[...Eq A.5]} \end{aligned}$$

Le premier terme de nombre droit correspond ; à la variation du volume pour une propriété de fluide constante. Soit « \vec{u} » la vitesse de tout point de la surface $\mathbf{S}(t)$ de volume $\mathbf{V}(t)$.

$\vec{u} \cdot \vec{n} \cdot \delta t$: La distance parcourue par un point appartenant à $S(t)$ pour arriver à une surface $S(t+\delta t)$,

$$\text{Alors :} \quad \delta V = \delta S \vec{u} \cdot \vec{n} \delta t \quad \text{[...Eq A.6]}$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \alpha(t) dV = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \left[\left(\int_{S(t)} \alpha(t+\delta t) \vec{u} \cdot \vec{n} dS + \int_{V(t)} \frac{\partial \alpha}{\partial t} dV \right) \right] \quad \text{[...Eq A.7]}$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \alpha(t) dV = \int_{S(t)} \alpha(t) \vec{u} \cdot \vec{n} dS + \int_{V(t)} \frac{\partial \alpha}{\partial t} dV \quad \text{[...Eq A.8]}$$

III. Théorème de Gauss :

$$\int_S \vec{a} \cdot \vec{n} dS = \int_V \text{div } \vec{a} dV \quad \text{[...Eq A.9]}$$

D'après le théorème de transport de Reynolds :

$$\frac{d}{dt} \int_V \alpha(t) dV = \int_V \left[\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial \alpha u_i}{\partial x_i} \right] dV \quad \text{[...Eq A.10]}$$

IV. Mouvement infinitésimale d'un petit volume de fluide :

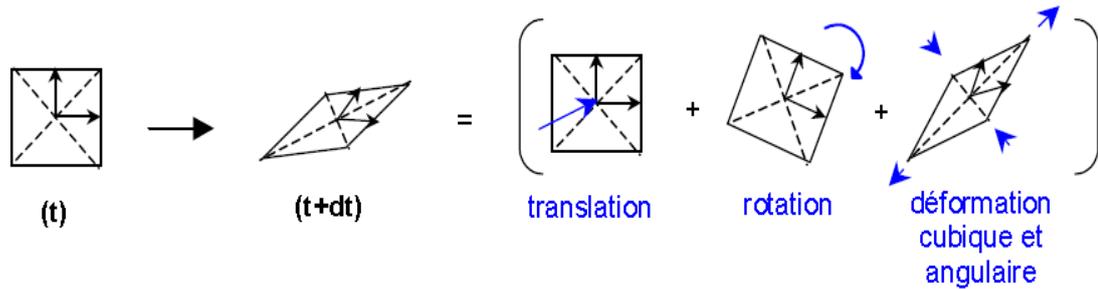


Figure : Schémas représentatif d'un Mouvement infinitésimale d'un petit volume de fluide

L'élément de fluide peut subir une translation, rotation et déformation.

On définit la vitesse de déplacement comme étant :

- La vitesse de rotation : $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ partie antisymétrique
- La vitesse de déformation : $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ partie symétrique

On définit le tenseur de déformation $\overline{\overline{D}}$ comme suite :

$$\overline{\overline{D}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$$

$$\overline{\overline{D}} = \overline{\overline{D}}_s + \overline{\overline{D}}_\delta$$

Avec :

$\overline{\overline{D}}_s$: Tenseur sphérique pour caractériser les déformations linéaires

$$\overline{\overline{D}}_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial v}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$$

Et $\overline{\overline{D}}_\delta$: tenseur directeur pour caractériser les déformations angulaire.

$$\overline{D}_\delta = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 0 & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 0 \end{bmatrix}$$

Annexe B

B.I : Solution numérique de l'équation de Navier Stokes en 2D

I. La sous relaxation :

La sous- relaxation est généralement utilisée dans les problèmes non linéaires pour éviter que le processus itératif décrit précédemment ne diverge. Elle consiste à diminuer la rapidité des changements des valeurs d'une variable, d'une itération à l'autre, par l'introduction d'un coefficient de sous relaxation $\phi\alpha$.

Comme nous l'avons vu précédemment, toutes les équations de transport, après avoir été discrétisées, peuvent être mises sous la forme générale suivante :

$$a_p \varphi_p = \sum_{nb} a_{nb} \varphi_{nb} + S_\varphi \quad [\dots \text{Eq B.1}]$$

Si nous notons φ_p^* la valeur de φ_p à l'itération précédente, il est possible d'écrire :

$$\varphi_p = \varphi_p^* + \left[\frac{\sum_{nb} a_{nb} \varphi_{nb} + S_\varphi}{a_p} - \varphi_p^* \right] \quad [\dots \text{Eq B.2}]$$

Le terme entre parenthèse dans cette relation représente le changement survenu à φ_p pendant une itération. Cette variation peut être alors amortie par l'introduction d'un facteur de sous relaxation α_φ de la manière suivante :

$$\varphi_p = \varphi_p^* + \alpha_\varphi \left[\frac{\sum_{nb} a_{nb} \varphi_{nb} + S_\varphi}{a_p} - \varphi_p^* \right] \quad [\dots \text{Eq B.3}]$$

Concernant la pression, la sous relaxation s'effectue d'une manière un peu différente compte tenu de l'existence de l'algorithme de couplage vitesse- pression.

Elle est simplement introduite dans la correction de pression P' sous la forme suivante :

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}^* + \alpha_p \mathbf{P}' \quad \text{[...Eq B.4]}$$

II. Critère de convergence :

Une procédure est convergente si toute erreur tend à décroître au cours des itérations. Elle a convergée lorsque les itérations ne produisent plus de changements significatifs sur les variables selon un critère bien défini. Le critère de convergence est donc utilisé pour stopper le processus itératif lorsqu'il est satisfait.

Le critère de convergence utilisé dans ce travail repose sur le résidu de l'équation de transport, comme suit :

$$\mathbf{R}\varphi = \sum_{maille} \mathbf{a}_e \varphi_e + \mathbf{a}_w \varphi_w + \mathbf{a}_n \varphi_n + \mathbf{a}_s \varphi_s + \mathbf{b} - \mathbf{a}_p \varphi_p \quad \text{[...Eq B.5]}$$

Dans le cas de l'équation de continuité, le résidu est la source de masse \mathbf{S}_m , pour toutes les variables, les résidus sont normalisés par \mathbf{F}_ϕ (masses entrantes, la somme de la quantité de mouvement à l'entrée). Il est alors attendu que ces grandeurs soient inférieures à un critère de Convergence prédéfini par :

$$\frac{\sum |\mathbf{R}\varphi|}{\mathbf{F}_\phi} \leq \mathit{epsilon} \quad \text{[...Eq B.6]}$$

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi epsilon de l'ordre de 10^{-3} .

Annexe C

C.I : Modélisation d'un fluide AVA pour la phase 16" sur le champ de Houad Berkaoui.

I. Logiciel Mud Ware :

Le module Hydra Gram peut être utilisé pour représenter graphiquement les données de viscosimètre Fann et la viscosité, et de calculer les paramètres API pour les modèles Bingham en plastique, Ostwald et Herschel Bulkley .Les données de viscosimètre sont entrés dans le cadre "mud rheology", le programme suppose une R1 : combinaison B1. Comme on le voit sur la figure ci-dessous, les données brutes sont tracées à l'écran. Si un modèle rhéologiques est supposé les constantes appropriés sont affichés dans le cadre "rhéological Parametres" et les calculés sont fournies dans cadre "Mud rheology" et les résultats de modèle sont tracés dans le graphique.

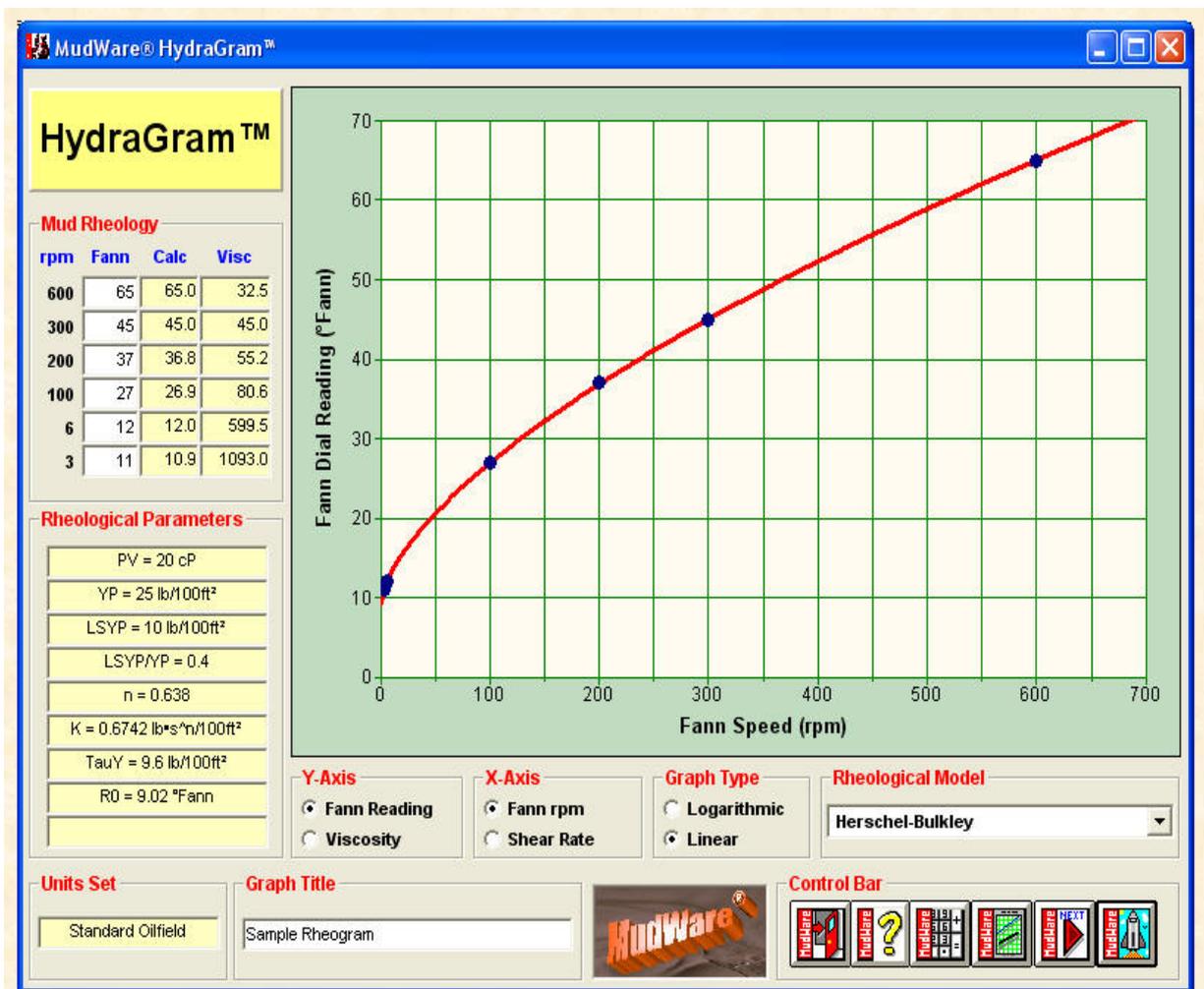


Figure C1 : Fenêtre de travail de logiciel Mud War

II. Réglage rhéomètre Physica HCR 301 :

Data Series Information						
Name:	emulsion PFE 1					
Sample:	text1					
Operator:	NoLogin					
Remarks:	text2					
Number of Intervals:	3					
Application:	RHEDPLUS/32 V3.2121002984-33025					
Device:	MCR301 SN80133964; FW3.00					
Measuring Date/Time:	10/04/2016; 15:18					
Measuring System:	CC27-SN9333; d=0 mm					
Accessories:	TU1-C-PTD200-SN80100461					
Calculating Constants:						
- Csr [min/s]:	1,284153					
- Css [Pa.mNm]:	18,83679					
- Start Delay Time [s]:	6,781					
- Measurement Type:	2					
- Motor Correction Factor:	1					
Interval:	1					
Number of Data Points:	1					
Time Setting:	1 Meas. Pts. Meas. Pt. Duration 1 min					
Measuring Profile:	Shear Rate d(gamma)/dt = 800 1/s					
Meas. Pts.	Shear Rate	Shear Stre	Viscosity	Speed	Torque	Status
	[1/s]	[Pa]	[Pa.s]	[1/min]	[µNm]	[]
*** 1***	800	14,15	0,01769	623	751,1	Dy_auto

Tableau C1 : Cordonnées et réglages effectués sur le rhéomètre MCR 301 pour l'expérience