

M/624.841

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

2ème Année Master

Etude des propriétés rhéologique de la boue de forage

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Matériaux et Génie des Procédés

Option : Matériaux et traitement de surface

Présenté par :

Mamine Chems-Eddine

Sous la Direction de :

Dr.Nemamcha.A

Juin 2013

DEDICACE



Ce travail est l'aboutissement d'une longue aventure
universitaire.

Je le dédie à mes parents qui m'ont toujours épaulé dans mes
projets et mes rêves et qui se sont toujours inquiétés de mon
sort.

Je le dédie également à mon frère : ZAKARIA et mes sœurs.

À toute ma famille, à mes amis et surtout mon collègue

Mohamed Sallah Bayaza.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, ALLHAMDOULILLAH.

« Dieu le clément et le miséricordieux »

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements

Au Bon dieu « Allah »

Lui nous donne la force et la volonté pour travailler et pour
réussir.

Je remercie mon encadreur : Docteur : Nemamcha .A

Qui nous a bien guidés pour réaliser ce mémoire.

Je remercie tous ceux qui m'aidé de près ou de loin dans

l'accomplissement

de ce travail.

Résumé

En général, l'étude du comportement rhéologiques des fluides de forage a une importance dans le but d'amener l'opération de forage du puits à terme sans aucun problème. Ces caractéristiques vont permettre de maîtriser les propriétés rhéologiques (viscosité, contrainte seuil, gel) des fluides de forage à base d'eau. Le choix a été porté sur ce type de fluide pour des raisons environnementales.

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale :	1
.....	2
.....	3

Partie bibliographique

Chapitre I : Le forage pétrolier.

1. Introduction	5
2. Le forage :	5
3. Principe de forage rotary :	6
4. Equipement de forage :	8
4.1. Installation de forage :	8
4.2. La garniture de forage :	10
4.3.L'assemblage de fond :	12
4.4. Progression du forage :	14
5. Conclusion:	15

Chapitre II : La boue de forage pétrolier.

1. Introduction :	17
2. Définition de boue de forage :	17
3. Circulation du fluide de forage :	17
4. Les principales fonctions des fluides de forage:	18
5. Composition des fluides de forage :	20
5.1. Les composants de la boue de forage et leur rôle :	21
5.2. Formulation des boues de forage :	21
6. Les différents types de fluides :	22
6.1. Les fluides à base d'eau :	22
6.2. Les fluides à base d'huile :	23

6.3 .Les fluides de forage gazeux :	24
7. Caractérisation des boues de forage :	25
7.1. La densité :	25
7.2. Les propriétés rhéologiques :	26
7.2.1. La viscosité plastique :	26
7.2.2. La contrainte seuil ou « Yield value » (YP) :	27
7.2.3. La thixotropie :	28
7.3. Propriétés de filtration :	28
8. La rhéologie de la boue de forage :	29
8.1. Notion de mouvement laminaire de cisaillement:	30
8.1.1. Mouvements laminaires de cisaillement :	30
8.1.2. Contrainte de cisaillement :	30
8.2. La viscosité :	31
8.2.1. Viscosité dynamique :	31
8.2.2. Viscosité cinématique :	31
8.3. Différents comportements rhéologiques :	32
8.3.1. Fluides newtoniens :	32
8.3.2. Les fluides non newtoniens indépendants de temps :	33
8.3.2.1. Les fluides sans contrainte seuil :	33
8.3.2.2. Les fluides à contrainte seuil :	34
8.3.3. Les fluides non newtoniens dépendants du temps :	34
8.3.3.1. Fluides thixotropes :	34
8.3.3.2. Fluide antithixotrope :	35
8.4. Modèles rhéologiques :	35
8.5. Régime d'écoulement :	39
8.5.1. Les régimes permanents :	39
8.5.1.1. Le régime laminaire :	39
8.5.1.2. Le régime turbulent :	39
8.5.1.3. L'écoulement en bouchon :	40
8.5.2. Les régimes transitoires :	40
8.5.3. Changement de régime avec la vitesse moyenne de circulation :	40
9. Conclusion :	42

Partie pratique

Chapitre III : l'étude des propriétés rhéologiques de la boue de forage.

1. Introduction :	44
2. Définition de la rhéologie:	44
3. Détermination expérimentale des Caractéristiques rhéologiques :	45
3.1. Matériel et protocole de travail :	45
3.1.1. La viscosimètre FANN :	45
a. Principe :	45
b. Mode d'emploi :	46
3.1.2. Détermination de la viscosité plastique (VP) et de la yield point (YP) :	46
3.1.3. Détermination de la thixotropie :	47
3.2. Propriétés de la boue utilisée :	48
3.3. Etude des propriétés rhéologique de la boue de forage a base d'eau :	48
4. Interprétations :	53
Conclusion générale :	56
.....	57
Référence bibliographique :	59
.....	60

LISTE DE FIGURES :

Chapitre I :

- Figure I.1 : L'opération de forage et ses paramètres.
- Figure I.2 : Principe de forage rotary.
- Figure I.3 : Processus de forage.
- Figure I.4 : Pompe à cavité progressive.
- Figure I.5 : Moteur embarqué dans une garniture de forage.
- Figure I.6 : La garniture de forage.
- Figure I.7 : Les types d'outils en forage pétrolier.
- Figure I.8 : De gauche à droite trépan tricône et monobloc.

Chapitre II :

- Figure II.1 : Schéma de circulation de la boue sur le site de forage.
- Figure II.2 : Densimètre à bous à balance.
- Figure II.3 : Viscosimètre FANN 35 à 6 vitesses.
- Figure II.4 : Principe de l'essai classique sur suspension (gauche).
Essai modifié de filtration utilisant le cake formé à la fin de l'essai de suspension (droite).
- Figure II.5 : forces agissant sur deux éléments de couches voisines.
- Figure II.6 : Courbes d'écoulement des principaux comportements rhéologiques.
- Figure II.7 : Rhéogramme enregistré par un rhéomètre à contrainte imposée, (à gauche).
Rhéogramme enregistré par un rhéomètre à vitesse de cisaillement imposée, (à droite).
- Figure II.8 : Schéma d'écoulement présente le régime permanent.
- Figure II.9 : Schéma d'écoulement présente le régime turbulent.
- Figure II.10 : Schéma présente l'écoulement en bouchon.
- Figure II.11 : Schéma d'un fluide ne présente pas l'écoulement en bouchon.
- Figure II.12 : Schéma d'un fluide présentant l'écoulement en bouchon.

Chapitre III :

- Figure III.1 : Viscosimètre FANN.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II :

Tableau II.1: Les catégories des composants utilisés dans les fluides de forage.

Tableau II.2 : Quelques formulations utilisées dans les boues à base d'eau.

Chapitre III :

Tableau III.1 : Les Propriétés de la boue de forage utilisé pendant l'opération de forage.

Tableau III.2 : Propriétés et formulations de la boue utilisé dans la phase 26".

Tableau III.3 : Les propriétés rhéologiques obtenus dans la phase 26".

Tableau III.4 : Propriétés et formulations de la boue utilisé dans la phase 17"1/2.

Tableau III.5 : Les propriétés rhéologiques obtenues dans la phase 17"1/2.

Tableau III.6 : Propriétés et formulations de la boue utilisé dans la Phase 12"1/4.

Tableau III.7 : Les propriétés rhéologiques obtenues dans la phase 12"1/4

Tableau III.8 : Propriétés et formulations de la boue utilisé dans la Phase 8"1/2

Tableau III.9 : Les propriétés rhéologiques obtenues dans la phase 8"1/2.

LISTE DES SYMBOLES :

VA : viscosité apparente (cP)
VP : viscosité plastique (cP)
YP : yield point (contrainte seuil) (lb/100 ft²)
Gel 0 : Gel à 10 secondes (lb/100 ft²)
Gel 10 : Gel à 10 minutes (lb/100 ft²)
P : pression de formation (kgf/cm²)
h_c : profondeur de la couche traversée (m)
d : densité de la boue
V : volume du filtrat (cm³) ou (ml)
μ : viscosité (cP)
τ : contrainte de cisaillement (Pa)
df : force de cisaillement (N)
ds : surface élémentaire (m²)
μ_a : viscosité apparente (Pa.s)
ν : viscosité cinématique (m²/s)
ρ : masse volumique du fluide (kg/m³)
γ : Déformation de cisaillement
γ' : vitesse de cisaillement (1/s)
η₀ : La viscosité au cisaillement zéro
η_∞ : est la Viscosité à l'infini de cisaillement
m : est le constante de taux.
C : le constant du temps de Cross (ou parfois de la consistance).

INTRODUCTION GENERALE

Le pétrole et le gaz jouent un rôle fondamental dans l'économie nationale, ils constituent la source la plus importante d'énergie qui a une valeur inestimable. Pour exploiter ces richesses souterraines, on procède au forage qui est une opération très délicate et la plus coûteuse du processus d'exploitation de cette énergie. L'objectif prioritaire des foreurs est la réalisation d'un trou, conformément au programme qui leur a été fourni, au meilleur coût possible dans les meilleures conditions techniques.

Le forage est l'ensemble des opérations permettant le creusement de trous pour atteindre en sous-sol de nouvelles zones susceptibles de contenir des hydrocarbures. Il représente une part très importante du coût d'une campagne de recherche. La compétitivité accrue entre les compagnies pétrolières internationales incite à aller vite pour creuser des puits devenus de plus en plus coûteux. Aujourd'hui le forage, réalisé généralement par une société de service spécialisée, est devenu une activité très technique. La tendance actuelle est au développement des méthodes ou de moyens d'aide pour assister le foreur dans le choix des différents paramètres du forage pour aller vite et diminuer le prix de revient du mètre foré.

Actuellement, les contraintes liées à la protection de l'environnement sont de plus en plus rigoureuses, en particulier vis-à-vis des conditions de rejet des déblais de forage pétroliers en mer ou sur terre. De plus, de nombreuses controverses existent quant à la persistance de certaines substances utilisées dans la formulation des fluides de forage.

Il est donc nécessaire de disposer d'une argumentation fiable pour, non seulement répondre aux exigences de gestion des déblais, mais aussi contribuer à l'obtention de fluides de forage. Plus performants du point de vue rhéologique et en causant moins de dommages à l'environnement en permettant une régénération rapide des sites.

Le fluide de forage doit tout d'abord créer une pression hydrostatique permettant d'assurer la stabilité des parois forées et d'empêcher la venue de fluides provenant des nappes souterraines traversées, il doit également former un "cake" pour limiter la filtration vers la paroi poreuse [2].

Les boues de forage sont souvent décrites comme des fluides rhéofluidifiants et thixotropes à seuil, du fait de leurs compositions complexes, elles aussi ont une structure interne qui est susceptible de se modifier selon les conditions d'écoulement et/ou de cisaillement pouvant mener à des phénomènes non homogène au sein du matériau.

Par ailleurs la connaissance des propriétés rhéologiques et de filtration des fluides de forage qui sont d'une importance capitale pour la réussite de l'opération de forage, vont faciliter le passage de l'outil de forage à travers les différentes couches de la formation géologique, la boue de forage doit tout d'abord créer une pression hydrostatique permettant d'assurer la stabilité des parois forées et empêcher les venues des fluides provenant des nappes souterraines traversées.

Elle doit également former un "cake" pour limiter la filtration vers la parois poreuse et permettre de faire remonter à la surface les déblais de la roche broyée par le trépan et assurer leur maintien en suspension lors de l'arrêt des opérations de forage par sa capacité de former une structure tridimensionnelle au repos.

Pour cela, et afin de répondre à ces exigences, le choix de fluides de forage doit satisfaire, d'une part, aux principaux paramètres rhéologiques de ce fluide et, d'autre part, aux propriétés physico-chimiques tel que le filtrat, la densité, tout en

tenant compte des différents inhibiteurs utilisés lors de la traversée des zones sensibles.

Le but de ce mémoire est l'étude des propriétés rhéologique de la boue de forage, le travaille est divisé en deux grandes parties :

✓ **Partie bibliographique** : comporte deux chapitres :

Le premier chapitre traitera le forage pétrolier, son principe, équipement de forage et l'outil de forage.

Le deuxième chapitre sera consacré à la boue de forage : ces fonctions, son rôle lors de l'opération de forage, les paramètres rhéologiques de la boue de forage et son effet sur la circulation de la boue.

✓ **Partie pratique** : comporte un chapitre :

Le troisième chapitre contient l'étude des propriétés rhéologique de la boue à base de l'eau telle que : la viscosité plastique (VP), la contrainte seuil (YP) et gels (Gel0, Gel10).

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I

Chapitre I : LE FORAGE PETROLIER

I.1. Introduction :

Le forage est l'ensemble des opérations permettant le creusement de trous pour atteindre en sous-sol de nouvelles zones susceptibles de contenir des hydrocarbures. Il représente une part très importante du coût d'une campagne de recherche. La compétitivité accrue entre les compagnies pétrolières internationales incite à aller vite pour creuser des puits devenus de plus en plus coûteux. Aujourd'hui, le forage est réalisé généralement par une société de service spécialisée, est devenu une activité très technique. La tendance actuelle est au développement des méthodes ou de moyens d'aide pour assister le foreur dans le choix des différents paramètres du forage pour aller vite et diminuer le prix de revient du mètre foré.[4]

On appelle "forage pétrolier" l'ensemble des opérations permettant d'atteindre les roches poreuses et perméables du sous-sol, susceptibles de contenir des hydrocarbures liquides ou gazeux.

I.2. Le forage :

L'opération de forage s'effectue par un outil animé d'un mouvement de rotation généralement formé de trois molettes en acier très résistant qui, en roulant sur les roches et par des percussions multiples et rapides, les désagrège (voir Figure I.1).

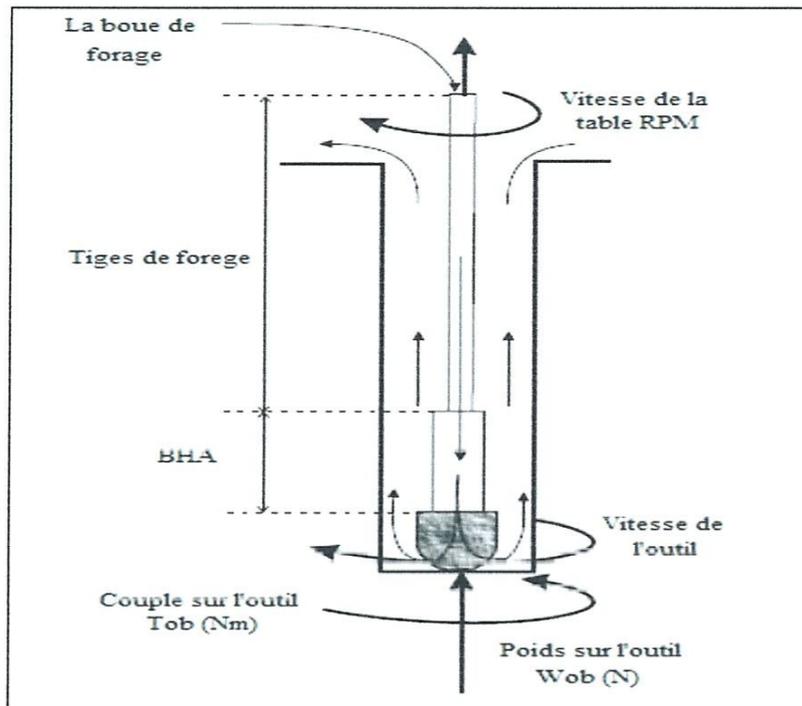


Figure I.1 : L'opération de forage et ses paramètres.

L'outil (ou trépan) est fixé à l'extrémité inférieure d'une colonne de tiges cylindriques

vissées les unes au bout des autres.

Au fur et à mesure que le trépan entame la roche au fond du trou, on laisse descendre le train de tiges en agissant sur le frein du tambour du treuil. [3] Un appareil enregistre en permanence la tension s'exerçant sur le câble, ce qui permet, connaissant le poids des tiges, de régler à chaque instant le poids appliqué sur l'outil.

I.3. Principe de forage rotary :

Cette méthode consiste à utiliser des outils à molettes dentées ou à picots de carbure de tungstène ou des outils diamantés sur lesquels on appuie et que l'on fait tourner. L'action combinée du poids sur le trépan et de sa rotation permet, soit aux dents des outils à molettes d'écailler la roche, soit aux trépan diamantés de strier, de raboter et de détruire celle-ci.

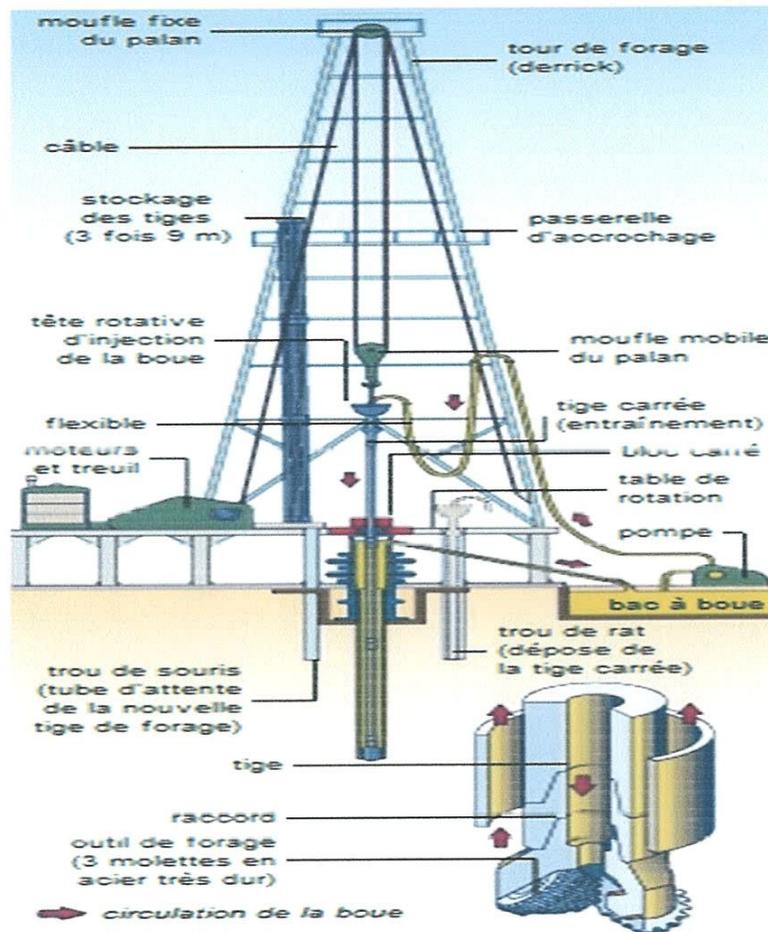


Figure I.2 : Principe de forage rotary.

La rotation de l'outil ou trépan, atteint une vitesse maximale de l'ordre de 200tr/min, est obtenue en faisant tourner l'ensemble des tiges de forage qui relient le trépan à la surface. Grâce à la tige supérieure de section carrée ou hexagonale dit tige d'entraînement qui s'engage dans un logement de même forme, solidaire d'une table de rotation, entraînée par un moteur, il est possible de faire tourner l'ensemble des tiges et du trépan. [5] (Figure I.2)

Le poids sur le trépan est obtenu par 100 à 200m de tubes très épais appelés masses-tiges pesant 100 à 300 Kg/m et placés juste au-dessus du trépan ; ces masses-tiges, ayant un diamètre voisin de celui du trépan, tendent à maintenir la verticalité du trou. Pour éliminer les débris de roches détachés du fond par le trépan, on emploie la technique de la circulation de fluides [9].

I.4. Equipement de forage :

A terre, l'équipement de forage est composé de l'installation de forage et de la garniture (Figure I.3). L'installation de forage est la partie visible située à la surface du sol.

Elle comprend une tour, appelée derrick ou mat, sur laquelle sont placés les équipements de levage qui permettent la manutention, le vissage et dévissage des tiges et le changement de l'outil.

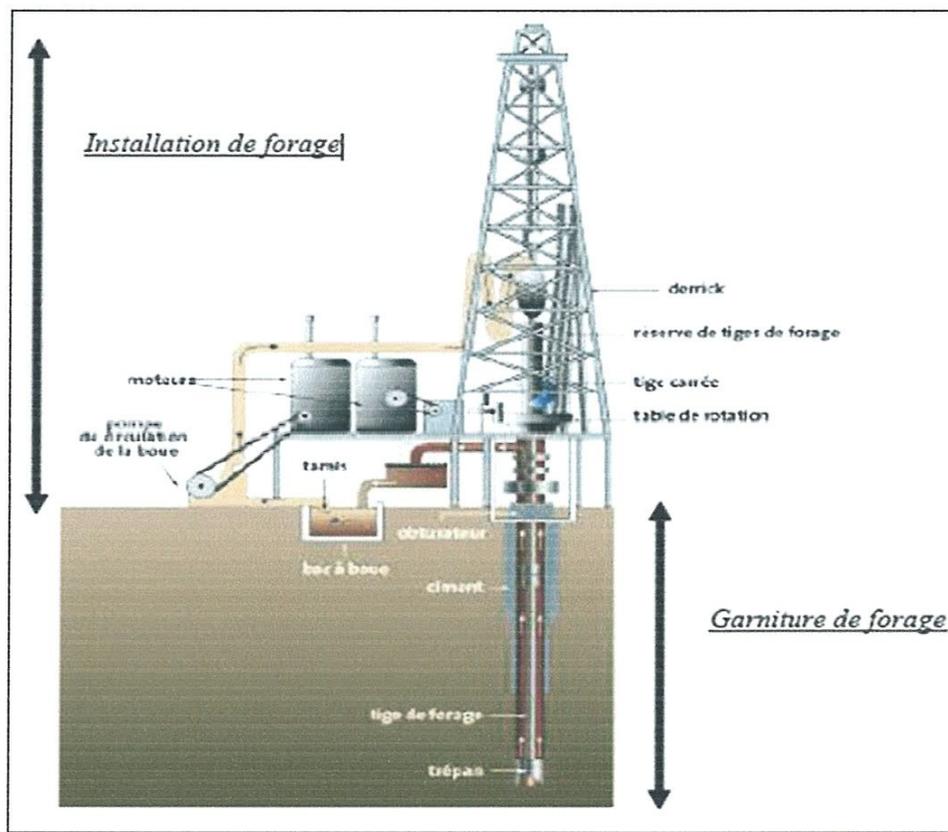


Figure I.3 : Processus de forage.

I.4.1. Installation de forage :

L'installation de forage possède plusieurs modules (Figure I.3) : le système hydraulique (pompe et bac à boue), le système d'alimentation (moteurs), les obturateurs, la table de rotation, les réserves des tiges de forage ainsi que le système de suspension. [7]

✓ *Systeme hydraulique :*

La circulation du fluide dans le processus de forage est assurée par une pompe de circulation. La figure I.3 présente une pompe connectée à un bac à boue et disposant d'un tamis pour le filtrage des déblais issus du forage avant la réinjection de ce fluide dans le puits. Plusieurs catégories de pompes de circulation existent dont la pompe à cavités progressives.

La pompe est rotative, volumétrique et constituée d'un engrenage composé de deux éléments hélicoïdaux : le rotor et le stator. La géométrie de l'ensemble comprend plusieurs séries de cavités séparées. La rotation du rotor dans le stator entraîne le déplacement axial du fluide de cavité en cavité, créant ainsi une action de pompage.

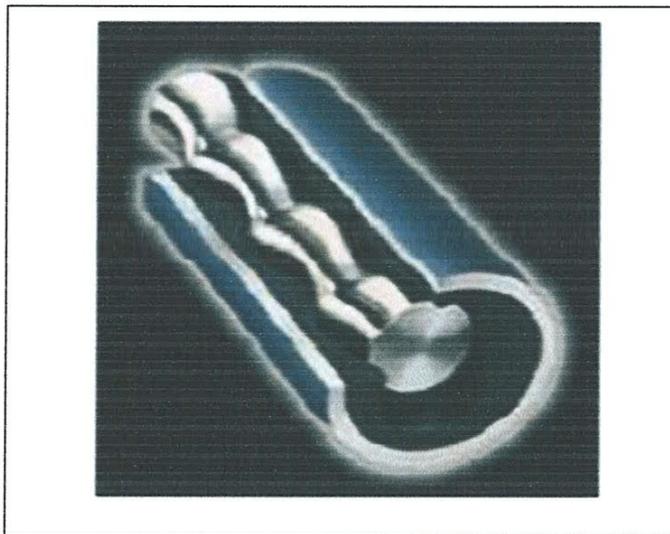


Figure I.4 : Pompe à cavité progressive.

✓ *Systeme d'alimentation :*

Les moteurs électriques ou hydrauliques sont les sources d'alimentation les plus fréquentes dans l'industrie pétrolière. L'énergie produite est transmise sous forme électrique ou mécanique vers les différents constituants de l'installation : la pompe de circulation, le treuil et la table de rotation. La nécessité de réaliser des puits déviés incite l'utilisation des moteurs embarqués afin d'accéder aux poches latérales contenant des hydrocarbures.



Figure I.5 : Moteur embarqué dans une garniture de forage.

✓ *Système de rotation :*

Le système de rotation regroupe une table de rotation (rotary table), une tige d'entraînement (kelly) et une tête d'injection (top drive).

✓ *Système de suspension :*

La tâche dédiée au système de suspension réside dans les déplacements du processus de forage (montée, descente) et dans le contrôle du poids appliqué sur l'outil. Il dispose d'un derrick, pouvant présenter une hauteur de plus de 80 mètres, un crochet et un treuil motorisé. Le derrick représente le point culminant de la plateforme. C'est une tour métallique qui soutient une tige au bout de laquelle se situe le trépan. La tige est rallongée au fur et à mesure que le trépan opère.

I.4.2. La garniture de forage :

La garniture de forage est la partie active non visible. Elle est constituée, de deux parties principales. La partie haute formée de tiges et la partie basse de l'assemblage de fond. [6]

La garniture désignée aussi par arbre de forage, en raison de la mécanique de liaison qu'elle établit entre la motorisation rotative en surface et le trépan, correspond à la partie opérative dans le puits. Elle effectue plusieurs tâches dont la transmission de l'énergie nécessaire à la désagrégation de la roche, le guide et

le contrôle de la trajectoire du puits, la transmission de la force de poussée ainsi que la circulation du fluide.

Elle est constituée essentiellement des masses tiges et des trains de tiges. A cela se greffent des accessoires tels que les stabilisateurs des masses tiges, les amortisseurs de choc, les systèmes de mesures etc.

✓ **Trains de tiges :**

Ils sont constitués de tuyaux en acier enchevêtrés les uns aux autres et pouvant s'étaler à des milliers de mètres. Ils transmettent le couple au trépan et servent de support aux masses tiges.

✓ **Masses tiges :**

Les masses tiges sont des tubes en acier se situant au-dessus des trains de tiges. Elles contribuent à la création du poids agissant sur le trépan et sont soumises à plusieurs contraintes engendrées par le diamètre du trépan, la production des pertes de charge minimales, la résistance au flambage et la rigidité. (Figure I.6)

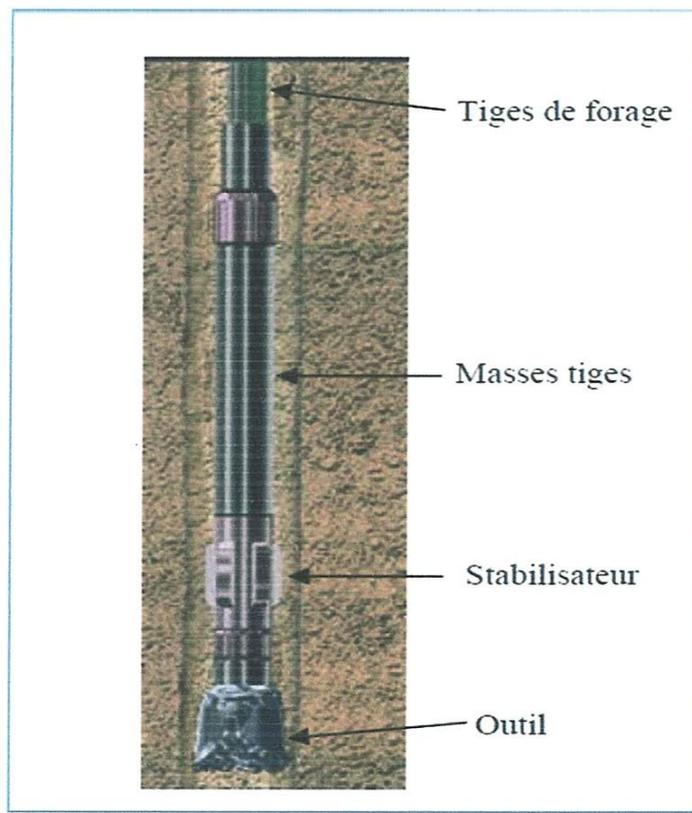


Figure I.6 : La garniture de forage.

I.4.3.L'assemblage de fond :

De longueur entre 200 et 300 mètres, il est constitué de tubes d'acier appelés les masses-tiges (drill-collar), de stabilisateurs et de l'outil de fond.

✓ Les stabilisateurs :

Ce sont des tubes de longueur nettement plus faible que celle des masses-tiges et dont le diamètre extérieur est voisin de celui du trépan. Ils sont placés au niveau des masses-tiges pour assurer le centrage et le guidage de l'assemblage de fond. Ils maintiennent le trépan perpendiculaire à la formation, ce qui augmente sa performance.

Le pourtour des stabilisateurs, et parfois celui des masses-tiges est constitué de lames spiralées pour faciliter la remontée de la boue.

✓ Mesures pendant le forage (Measurement While Drilling, MWD) :

De nombreux systèmes permettant l'acquisition des mesures sont incorporés dans le processus de forage et conditionnent le bon déroulement des opérations. Ils assurent la transmission des informations, pendant le forage, vers la surface. Les systèmes de mesures MWD sont transportés dans les puits en étant soit intégrés dans l'assemblage de fond soit embarqués dans les masses tiges. Ils délivrent les mesures relatives aux natures des roches, aux pressions dans le puits, aux températures, aux vibrations, aux chocs, aux couples etc... Quelques mesures peuvent être enregistrées dans les systèmes MWD et les autres sont transférées à la surface en utilisant le système téléométrique modulé par la boue ou d'autres sources de transmissions de données. Ces appareils de mesures ont révolutionné le monde du forage directionnel en permettant au processus de forage de se munir d'accéléromètres et de magnétomètres fournissant à la surface les inclinaisons et les azimuts des puits. Les mesures suivantes sont transmises par les systèmes MWD :

- La vitesse de rotation des trains de tiges et donc du trépan.
- Les types et sévérités des vibrations.
- La température dans le puits.
- Le couple et le poids agissant sur le trépan.
- Le débit du fluide de forage.

L'augmentation de la fréquence d'acquisition de ces mesures permet d'effectuer en temps-réel un pilotage fin de la garniture de forage. La majorité des dispositifs MWD intègre ou est en liaison avec des dispositifs nommés digraphes pendant le forage (Logging While Drilling, LWD).

Ils fournissent des mesures décrivant les propriétés de la formation et caractérisant des informations géologiques telles que, la porosité, la résistivité, l'inclinaison, la résonance magnétique, la pression de la formation etc...

✓ *L'outil de forage :*

La vitesse d'avancement de forage dépend de la conception de l'outil, de sa forme, de sa résistance. Il doit travailler le plus longtemps possible pour espacer les manœuvres de remplacement qui sont des temps morts.

Il existe plusieurs types d'outils, la différence entre ces outils réside surtout dans la forme et le nombre de dents.

- *Les outils à molettes :*

Les molettes, de forme conique, la pointe dirigée vers l'axe du trou, sont montées sur roulements à billes et sont garnies de dents. Ils sont en acier très résistant.

- *La fraise à diamants :*

Elle est utilisée, non pas pour forer, mais pour carotter. Elle se présente sous la forme d'une couronne.

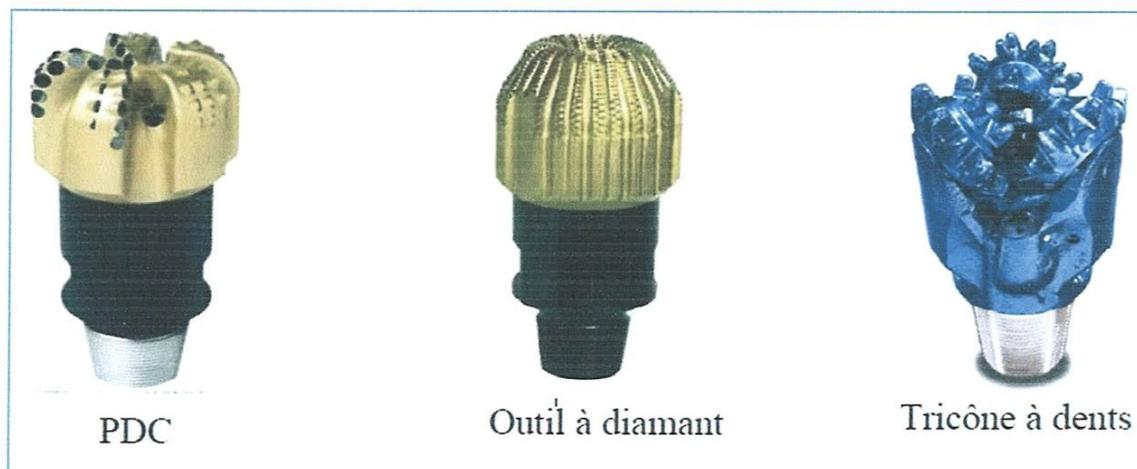


Figure I.7 : Les types d'outils en forage pétrolier.

I.4.4. Progression du forage :

Le forage est un processus graduel combinant plusieurs phases. Lors de chaque phase, l'assemblage de fond est remonté à la surface pour la maintenance du processus, pour le tubage et la cimentation de la partie forée. Le tubage consiste à déployer des tubes en acier dans le puits (Casing). Dans certaines situations, le tubage peut être enroulé (Coil tubing) et correspond au déploiement progressif d'un tube simultanément au forage. Dans toutes les situations le tubage permet de consolider les parois du puits au cours du forage, et de préparer les éléments nécessaires à la production une fois les réservoirs contenant les hydrocarbures atteints.

La cimentation consiste à cimenter l'annulaire à la fin de chaque phase de casing. Ce processus correspond à l'installation d'un anneau de ciment favorisant l'obtention d'un lien étanche et résistant entre le corps du tube et les parois du puits. Pendant le forage la partie basse du puits n'est pas couverte (Open Hole) tandis que sa partie supérieure est tubée : c'est le (Cased Hole).

Enfin, le bon déroulement du forage est conditionné par les états du système de circulation du fluide et du trépan.

✓ *Système de circulation du fluide :*

Une pompe hydraulique assure la circulation du fluide qui transite par les trains de tiges, puis sort du trépan et remonte par les espaces annulaires. L'espace annulaire désigne le domaine qui sépare la garniture de forage du puits. L'injection du fluide sur la roche à perforer s'effectue continuellement et permet l'évacuation des déblais vers la surface. Elle contribue également à la lubrification et au refroidissement des organes du processus de forage et à l'équilibre hydrostatique du puits.

En fonction des performances recherchées, plusieurs types de fluide peuvent être utilisés.

✓ *Trépans :*

Une variété de trépans présentant des géométries spécifiques existent. Ils sont conçus pour forer une certaine gamme de roches et sont choisis en fonction des puits à réaliser.

Ils se catégorisent en deux : les trépans tricônes et les trépans monobloc de type PDC (diamants synthétique polycrystalline).

Les trépan tricônes sont principalement composés d'acier ou de carbure de tungstène. Tandis que les monoblocs de type PDC sont composés de diamants, ou de diamants synthétiques. La grande différence entre ces deux familles de trépan réside dans leurs façons d'arracher la roche. (Figure I.8)

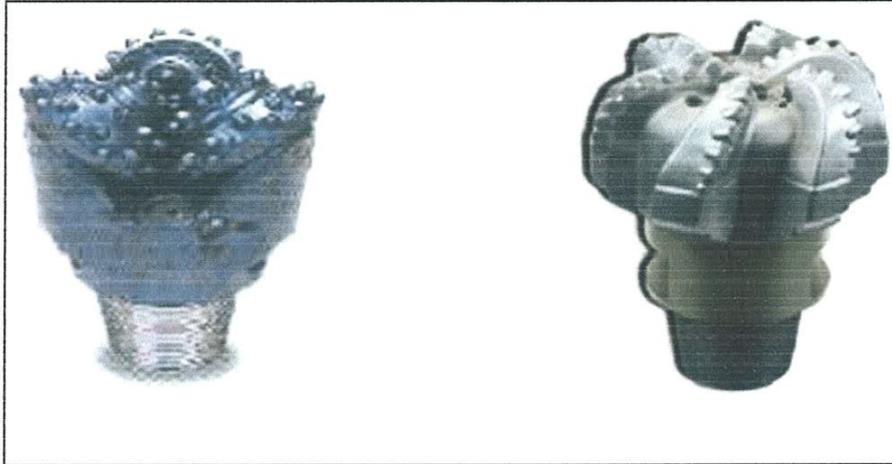


Figure I.8 : De gauche à droite trépan tricône et monobloc.

I.5.Conclusion:

Dans ce premier chapitre, on a présenté l'opération de forage qui est l'ensemble des opérations permettant d'atteindre les roches poreuses et perméables du sous-sol, susceptibles de contenir des hydrocarbures liquides ou gazeux.

Cette méthode consiste à utiliser des outils à molettes dentées ou à picots de carbure de tungstène ou des outils diamantés sur lesquels on appuie et que l'on fait tourner.

A terre, l'équipement de forage est composé de l'installation de forage et de la garniture. L'installation de forage est la partie visible située à la surface du sol et la garniture est la partie active non visible, Elle est constituée, de deux parties principales. La partie haute formée de tiges et l'assemblage de fond : les tiges de forage, les masses tiges, les stabilisateurs et l'outil de forage.

Dans le chapitre suivant on va présenter la boue de forage qui est un élément essentiel durant cette opération. On va étudier ces fonctions et les rôles pendant le forage, sa composition et les propriétés rhéologiques...

CHAPITRE II

Chapitre II : LA BOUE DE FORAGE

II.1.Introduction :

Le succès d'une opération de forage est assuré par plusieurs facteurs dont le choix du fluides de forage lesquels sont classés dans la famille des fluides complexes du fait de leur nature même (ces fluides peuvent être des émulsions/suspensions de divers constituants) dont les fonctions sont multiples (refroidir et lubrifier l'outil au cours du forage, maintenir les parois du puits, maintenir les déblais en suspension, assurer la remontée des déblais, ...).

La connaissance et le contrôle des propriétés rhéologiques des fluides de forage ont donc une incidence majeure sur le bon déroulement d'une opération de forage [1] [2].

II.2.Définition de boue de forage :

Un fluide de forage ou boue de forage est un système composé de différentes combinaisons liquides (eau, huile, ...), gazeuses (air ou gaz naturel) contenant en suspension une phase solide (argile, déblais, ciments, ...). C'est un fluide non newtonien, visqueux ou viscoélastiques, le plus souvent thixotrope [3].

II.3.Circulation du fluide de forage :

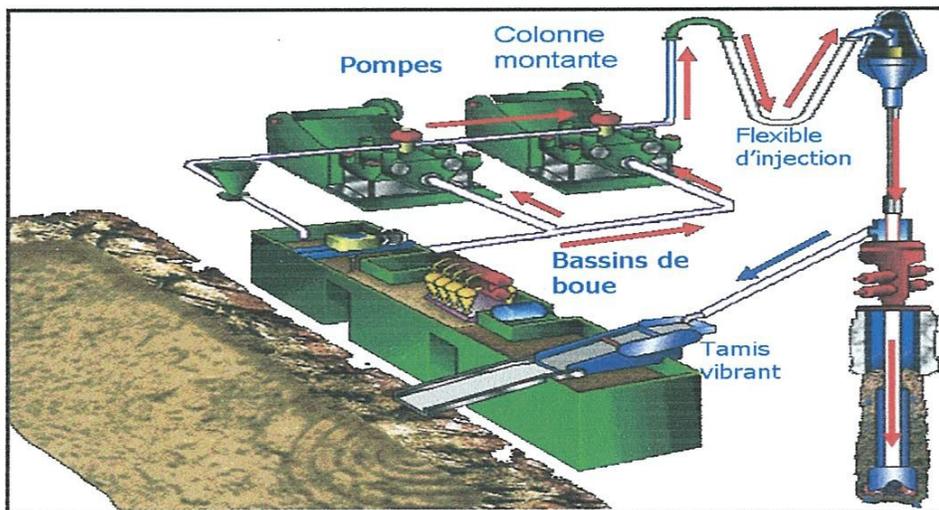


Figure II.1 : Schéma de circulation de la boue sur le site de forage.

La majeure partie de la boue utilisée dans une opération de forage est recyclée en continu :

- La boue est mélangée et conservée dans le bassin de décantation.
- Une pompe achemine la boue dans la tige de forage qui descend jusqu'au fond du puits.
- La boue sort de l'extrémité de la tige de forage et tombe au fond du puits où le trépan est en train de forer la formation rocheuse.
- La boue emprunte ensuite le chemin inverse en remontant à la surface les morceaux de roche, appelés déblais, qui ont été arrachés par le trépan.
- La boue remonte jusqu'à l'espace annulaire, entre la tige de forage et les parois du puits. Le diamètre type d'une tige de forage est d'environ 10 centimètres (4 pouces). Au bas d'un puits profond, le puits peut mesurer 20 centimètres de diamètre. A la surface, la boue circule dans la conduite d'aspiration de la boue, une tige qui mène au tamis vibrant.
- Les tamis vibrants se composent d'un ensemble de crépines métalliques vibrantes servant à séparer la boue des déblais. La boue s'égoutte dans les crépines et est renvoyée vers le bassin de décantation.
- Les déblais de la roche glissent le long de la glissière du tamis pour être rejetés. En fonction des impératifs environnementaux, notamment, ils peuvent être lavés avant leur rejet. Une partie des déblais est prélevée pour être examinée par des géologues afin d'étudier les propriétés des roches souterraines présentes au fond du puits.

II.4. Les principales fonctions des fluides de forage:

Les roches sont raclées à l'aide du trépan rotatif. Le fluide de forage, qui est pompé par la tige de forage, collecte les déblais et les remonte à la surface. L'environnement difficile des opérations de forage souterrain a encouragé les initiatives de recherche et développement en vue de concevoir des fluides de forage pouvant jouer plusieurs rôles importants: Suspension, contrôle de la pression, stabilisation des formations, flottabilité, lubrification et refroidissement.

Les principales fonctions et leur rôle du fluide de forage sont :

➤ **La remontée des déblais :**

Le fluide de forage doit assurer la remontée des déblais entre le front de taille jusqu' à la surface. Trois paramètres influent sur l'efficacité du nettoyage [8]:

- la vitesse du fluide.
- la masse volumique.
- la viscosité de la boue.

➤ **Maintien des déblais en suspension :**

Maintenir les déblais en suspension pendant les arrêts de circulation, suite à un problème ou pour dégager la tige de forage afin de changer le trépan, grâce au caractère thixotropique de la boue.

C'est le caractère thixotrope du fluide de forage qui retient les déblais en suspension, par sa gélification lorsque il n'est plus en mouvement [8].

➤ **Refroidissement et lubrification de l'outil et du train de sonde :**

L'outil de forage s'échauffe par la température de fond (degré géothermique) et les frottements mécaniques transformés en calories. Le fluide refroidi et lubrifie l'outil pour éviter l'usure rapide des pièces métalliques en mouvement. Cette fonction est améliorée par l'utilisation d'une boue à base d'eau.

➤ **Prévention du cavage et des resserrements des parois des puits :**

La boue doit posséder des caractéristiques physiques et chimiques pour que le trou conserve un diamètre voisin du diamètre nominal de l'outil. Donc, il ne doit pas y avoir le cavage ou le resserrement.

➤ **Le maintien des parois du trou foré :**

La boue de forage dépose un film de particules colloïdales, appelé cake, lors de sa filtration à travers les formations perméables grâce à la différence de pression sur les abords de puits. Ce cake est consolidé par l'ajout d'un réducteur de filtrat. Le dépôt du cake permet de consolider et de réduire la perméabilité des parois du puits.

➤ ***Le contrôle de la pression:***

La boue doit exercer une pression hydrostatique suffisante pour équilibrer les pressions d'eau, de gaz, ou d'huile dans le gisement. La pression hydrostatique souhaitée est maintenue en ajustant la densité entre des valeurs maximales et minimales.

➤ ***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 conditionnent les vitesses d'avancement instantanées, la durée de vie des outils, le temps de manœuvre. Un filtrat élevé augmente la vitesse d'avancement. Les très faibles viscosités sont aussi un facteur favorable à la pénétration des outils.

➤ Enfin, la boue ne doit pas être ni abrasive ni corrosive pour l'équipement, ni toxique ou dangereuse pour le personnel et elle ne doit pas présenter le risque un incendie. Les déblais remontés par la boue sont la principale source d'information du géologue.

I.5.Composition des fluides de forage :

Le choix de la formulation à utiliser va dépendre de la formation rocheuse à traverser, des contraintes environnementales et économiques ainsi que des possibilités d'approvisionnement sur place des produits à boue. Différentes formulations peuvent être utilisées sur un même forage selon les couches géologiques traversées. Les boues à l'huile donnent généralement de meilleurs résultats (meilleures lubrifications, minimisation de l'endommagement des formations productrices, résistances aux hautes températures) mais sont généralement plus chères et posent des problèmes écologiques.

I.5.1. Les composants de la boue de forage et leur rôle :

Les propriétés que l'on exige des boues de forage sont multiples et peuvent parfois même être contradictoires. Les boues doivent, par exemple, être très visqueuses pour assurer la remontée des déblais, mais la viscosité ne doit pas être trop élevée afin de diminuer les pertes de charge dues à l'écoulement et éviter la fracturation de la formation. De nombreux composants multi-fonction sont donc ajoutés à la boue pour obtenir les propriétés désirées. Il est possible de classer grossièrement ces composants en 20 catégories [9] représentées dans le tableau II.1 :

1	Contrôleur d'alcalinité	11	Lubrifiant
2	Bacéricides	12	Decoinçant
3	Anti-calcium	13	Inhibiteur de gonflement des argiles
4	Inhibiteur	14	Produits facilitant la séparation
5	Anti-mousse	15	Stabilisateur haute température
6	Agent moussant	16	Défloculant
7	Emulsifiant	17	Viscosifiant
8	Réducteur	18	Alourdissant
9	Floculant	19	Fluide de base aqueux (sammure)
10	Colmatant	20	Fluide de base oléagineux

Tableau II.1: Les catégories des composants utilisés dans les fluides de forage.

II.5.2. Formulation des boues de forage :

Les boues de forage sont donc des formulations extrêmement complexes comprenant des additifs de fonctions multiples. Pour éviter des problèmes de reproductibilité sur chantier, la profession a normalisé la préparation et la caractérisation des fluides de forage par les normes éditées par l'API (American Petroleum Institute), pour la formulation sur site et au laboratoire pour la caractérisation des propriétés.

La formulation proprement dite de la boue est optimisée (généralement par le fournisseur des produits), le temps et l'ordre d'agitation de chaque produit étant défini.

Chaque formulation spécifique est caractérisée et optimisée en laboratoire avant d'être utilisée, toutefois, la boue subit, au cours de sa circulation dans le puits, de nombreuses contraintes et peut être affectée par des événements liés au forage (venues d'eau, venues de gaz...) ; il est donc important de contrôler les propriétés en cours de forage et en particulier les propriétés rhéologiques, à savoir, la viscosité et la yield point. [11]

II.6. Les différents types de fluides :

Les fluides de forage sont classés en trois catégories en accord avec le fluide de base utilisé dans leur préparation :

II.6.1. Les fluides à base d'eau :

Il est possible de classer les boues à base d'eau en 3 catégories :

- ✓ boues douces.
- ✓ boues salées.
- ✓ boues salées saturées.

Ces fluides sont souvent désignés par "Water-Based Muds" (WBM).

Ils sont dans la plupart des cas constitués par des suspensions de bentonites dans l'eau (30 à 60 g/l) dont les caractéristiques rhéologiques et de filtration sont souvent ajustées par des polymères.

La nature des électrolytes et leur concentration dans les formulations de boues à l'eau sont choisies en prenant en compte les caractéristiques de la formation.

Parmi les additifs, on peut trouver :

- ✓ des viscosifiants: bentonite, polymères synthétiques ou biopolymères.
- ✓ Réducteur de filtrat: amidons, carboxyméthyle celluloses (CMC), celluloses polyanioniques (PAC), ou résines.
- ✓ Des inhibiteurs de gonflement et de dispersion des argiles.

Type de boue	Compositions [Kg]	Caractéristiques	Stabilité aux contaminants	Domaines d'utilisation
Boue bentonitique simple	Ben. 40 à 60 CMC 0-5 Soude (NaOH)	d= 1.03 à 1.05 PH= 8.5 à 9	Faible	Boue de démarrage
Boue bentonitique aux extraits tannants	Ben. 40 à 60 CMC 0.5 à 5 Soude 0.5 à 1 Tanim 2 à 4	Filtrat 2 à 4 cm ³ PH < 11	Moyenne Ca ²⁺ < 300 mg/l Cl ⁻ < 20g/l	Zone à faible contamination < 300 M : gypse, anhydrite, argile.
Boue bentonitique au FCL/LC	Ben. 50 à 60 FCL 20 à 40 Soude 2 à 4 CMC 0.5 LC 10 à 20	PH > 9 Résistance a la température (200 °C)	Bonne Cl ⁻ 50 à 70 g/l	Zone à forte contamination 5000 à 6000 M : gypse, anhydrite, argile.
Boue au gypse	Ben. 50 à 70 FCL 12 à 15 Soude 3 à 4 CMC 5 à 10 Gypse 10 à 20 LC	PH < 9 Bonne résistance à 200 °C	Bonne Cl ⁻ 60 à 70 g/l	Horizon gypse ou anhydrite Horizon argileux Horizon faiblement salifère
Boue salée saturée	Argile 50 Amidon 30 à 40 Chaux 0 à 10 Sel 300	d > 1.20 corrosive résistance aux températures 130 à 140 °C	Bonne : gypse et anhydrite Moyenne argile	Horizon salifère Zone argileux peu ou moyennement dispersante

Tableau II.2 : Quelques formulations utilisées dans les boues à base d'eau.

II.6.2. Les fluides à base d'huile :

Les fluides à base d'huile sont des fluides dont la phase continue est une huile minérale (pétrole brut, fuel, gazole, ...) et la phase dispersée est de l'eau. Par définition les fluides de forage à base d'huile contenant plus de 5% d'eau sont appelés boues de forage en émulsion inverse ; avec moins de 5% d'eau, on a les boues à l'huile. Ces fluides sont souvent désignés par "Oil-Based Muds" ou OBM.

Les propriétés rhéologiques (thixotropie) de cette émulsion sont ajustées par l'addition d'agents viscosifiants, généralement des argiles organophiles. Les formulations peuvent contenir également des agents réducteurs de filtrat (composés asphalténiques et polymères) et d'autres additifs spéciaux comme agents fluidifiants et alourdissant.

II.6.3 .Les fluides de forage gazeux :

Ce sont des fluides dont la phase continue est du gaz mélangé avec de l'eau en proportions variables provenant de la formation traversée ou ajoutée intentionnellement. Le gaz peut être de l'air ou du gaz naturel, et peut appartenir à une mousse ou à un brouillard.

✓ *Forage à l'air :*

Le forage à l'air apporte sous toutes ses formes une solution à des problèmes compliqués parfois impossible à résoudre avec les méthodes de forage à la boue conventionnelle.

✓ *Forage à la mousse :*

Les mousses sont des dispersions d'un volume (relativement) important de gaz, dans un volume relativement faible de liquide. Elles sont utilisées comme fluide de forage lorsque:

- Les terrains traversés sont fracturés.
- Le forage à l'air est impossible parce que la pression nécessaire ne peut être fournie sur le chantier.

✓ *Forage à la boue aérée :*

Afin d'éviter les pertes de circulation et d'avoir un fluide forage plus léger, on utilise le forage à la boue aérée. La combinaison boue-air permet de générer deux fluides de forage totalement différents selon la prédominance de la boue ou l'air.

- Si la phase continue est l'air, on a un fonctionnement en mist-drilling.
- Si la phase continue est la boue, on a une boue aérée.

II.7. Caractérisation des boues de forage :

Tout comme la formulation des boues, le contrôle et la caractérisation des boues de forage sont réalisés selon des normes. Les tests relatifs à l'étude des caractéristiques des fluides de forage sont généralement basés sur quatre paramètres: densité, viscosité, filtrat et réactivité.

Historiquement, face aux problèmes majeurs rencontrés dans les premiers forages, la densité est le premier paramètre fondamental pour la caractérisation des fluides de forage. [12]

II.7.1. La densité :

C'est rapport du poids d'un corps à son volume dans des conditions définies de pression et température. Il s'exprime en N/m^3 ou plus pratiquement en kg/l . Cette caractéristique est très importante et doit être contrôlée régulièrement car la densité doit être telle que la pression hydrostatique au fond suffisante pour contrôler les fluides de formation et ne doit pas être trop importante vis-à-vis des terrains forés pour ne pas les fracturer et ne pas risquer une perte de boue au cours de la circulation [16]. Il faut être vigilant pour qu'en aucun moment la pression dans le puits ne dépasse la pression de fracturation des roches avec pour conséquence l'effondrement de l'ouvrage et le coincement du matériel du forage.

La pression exercée par la boue sur les parois du puits, est donnée par l'expression suivante :

$$P = h_c \cdot \frac{d}{10} \quad (II. 1)$$

Avec :

P: Pression de la formation (kgf/cm^2).

h_c : Profondeur de la couche traversée (m).

d: Densité de la boue.

A cause de cette pression de contre-balancement en conditions normales de forage, une diffusion du fluide dans les milieux poreux est possible.

Pour diminuer autant que possible cette invasion, un produit de filtration, de faible épaisseur, appelé cake, est formé sur les parois du trou foré [10].

La densité se mesure avec le densimètre (Figure II.2) dont le principe est équivalent à la balance à curseur.

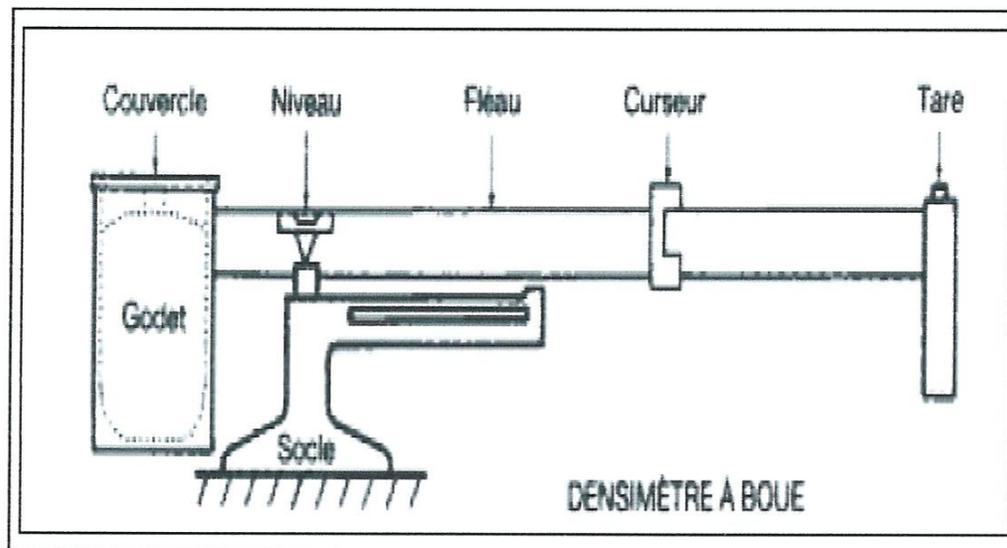


Figure II.2 : Densimètre à bous à balance.

II.7.2. Les propriétés rhéologiques :

Les outils disponibles pour contrôler sur site la rhéologie de la boue sont deux types : le viscosimètre Marsh et le rhéomètre rotatif FANN 35.

Les normes API impose de calculer trois paramètres correspondants au modèle de Bingham : VP (viscosité plastique), VA (viscosité apparente), YV (contrainte seuil). Deux autres mesures sont réalisées afin de caractériser la thixotropie de la boue : Gel 0 et Gel 10 qui sont des mesures de contrainte à très faible vitesse normalisée après, respectivement, 10 secondes et 10 minutes de repos [13].

➤ II.7.2.1. La viscosité plastique (VP) :

Elle dépend avant tout de la teneur en solides contenus dans la boue. Une augmentation de viscosité plastique ne pourra pas être donc combattue que par l'élimination des solides. Par ailleurs, la viscosité plastique est également liée à la taille des particules, et à leur forme :

$$VA = L_{600}/2 \text{ (cP)} \quad (II.2)$$

$$VP = L_{600} - L_{300} \text{ (cP)} \quad (II.3)$$

L600 et L300 sont les lectures respectives à 600 rpm et 300 rpm sur le rhéomètre FANN 35.

✓ **Le viscosimètre FANN 35 :**

Est un appareil à cylindres coaxiaux dont le rotor est entraîné à l'aide d'un moteur électrique. Il sert à mesurer la résistance au cisaillement de la boue contenue dans le godet à l'intérieur du quel sont immergés les cylindres [14] (Figure II.3). Le cylindre extérieur (rotor) peut tourner aux vitesses 3, 6, 100, 200, 300, 600 tr/min. Pour chaque vitesse on lit le couple transmis par le fluide sur le cylindre intérieur (stator). Ces six points de mesure permettent de tracer le rhéogramme.



Figure II.3 : Viscosimètre FANN 35 a 6 vitesses.

➤ **II.7.2.2. La contrainte seuil ou « Yield value » (YP) :**

Les solides présents dans la boue de forage influencent un paramètre autre que la viscosité plastique ; c'est la contrainte seuil plus connue sous le nom de yield value ou yield point. La contrainte seuil est la mesure de résistance initiale à franchir pour que le fluide s'écoule. Cette résistance est due aux forces électrostatiques attractives localisées sur ou près de la surface des particules. C'est une mesure dynamique. La contrainte seuil dépend des types des solides présents, de leurs charges

de surface, respectives, de la concentration de ces solides, du type et la concentration des autres ions ou sels qui peuvent être présents.

$$YP = L_{300} - Vp \text{ (Ib/100ft}^2\text{)} \quad (II.4)$$

➤ II.7.2.3. La thixotropie :

Le caractère thixotrope 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. Ils sont mesurés à l'aide du viscosimètre Fann35 à une vitesse de 3 tr/min et exprimé en lb/100ft².

Le gel 10 représente la résistance du gel après un repos de la boue de 10 minutes. Le gel 0 varie pratiquement comme la viscosité plastique et le gel 10 comme la contrainte seuil avec cependant, pour ce dernier, une sensibilité particulière au traitement chimique [10].

La thixotropie peut aussi être estimée à partir des rhéogrammes réalisés en rampes, de paliers croissants puis décroissants de gradients de vitesse, par l'amplitude de l'hystérésis. En effet, on dit que plus l'aire, contenue entre les deux courbes de montée et descente, est grande plus le matériau est thixotrope [9].

II.7.3. Propriétés de filtration :

La filtration du fluide de forage se produit sous l'effet de la pression différentielle lorsque le fluide se trouve au contact d'une paroi poreuse et perméable. La pression dans le puits étant supérieure à celle de la formation [6]:

1. Si le diamètre des pores est supérieur à celui des argiles en suspension, la formation absorbera le fluide dans son intégralité.
2. Si le diamètre des pores est inférieur à une partie des éléments en suspension, il y a filtration c'est-à-dite formation de cake.

Deux sortes de filtration ont lieu pendant le forage: la filtration statique, lors de l'arrêt de la circulation du fluide, et la filtration dynamique au cours de la circulation du fluide, qui entraîne une érosion du cake formé [10]. La capacité de rétention de la bentonite sodique est plus élevée par rapport à la bentonite calcique

activée. Quand à la perméabilité dans le temps, une suspension de bentonite avec électrolyte (CaCl_2) dépose un cake plus perméable qu'une suspension sans électrolyte.

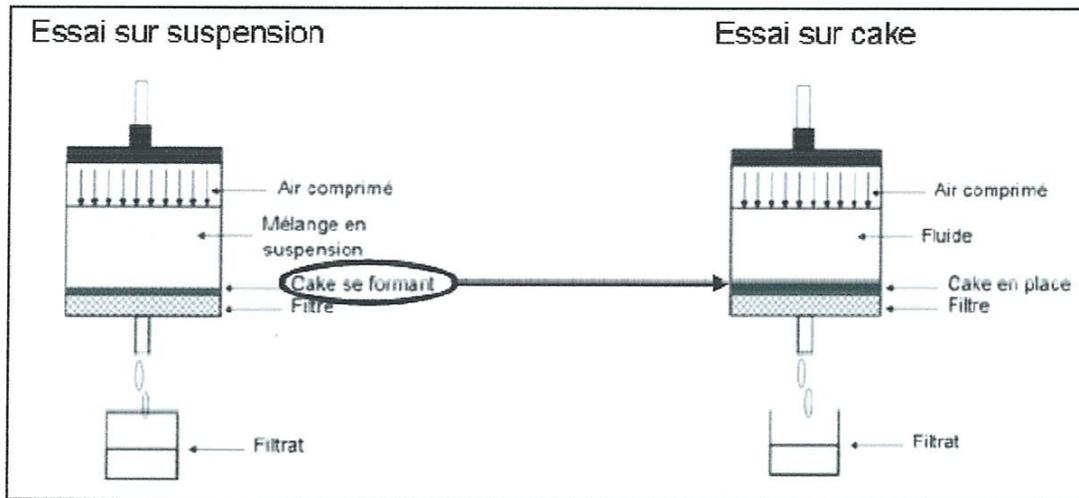


Figure II.4 : Principe de l'essai classique sur suspension (gauche).
Essai modifié de filtration utilisant le cake formé à la fin de l'essai de suspension (droite).

Le filtre-presse standard est un appareil qui exerce pendant 30 minutes une pression de 7 bars sur la boue contenue dans un cylindre normalisé muni d'une surface semi-perméable, puis on note la quantité d'eau qui a traversé la plaque filtrante qui est imperméable aux colloïdes mais perméable aux liquides. Le pesage est effectué à l'aide d'une balance analytique [15].

II.8. La rhéologie de la boue de forage :

La rhéologie permet, alors de prévoir le comportement d'un corps réel à condition de ne pas trop s'éloigner des hypothèses ayant servi à la construction de modèle rhéologique utilisé. La section qui suit vise à définir les principaux paramètres rhéologiques ainsi que les différentes typologies d'écoulement des fluides [4].

II.8.1. Notion de mouvement laminaire de cisaillement:

II.8.1.1. Mouvements laminaires de cisaillement :

Un matériau soumis à un ensemble de forces est susceptible de se déformer, les mouvements de différents points du matériau dépendant bien entendu de la répartition et de l'intensité des forces appliquées.

Un mouvement laminaire de cisaillement est un mouvement au cours duquel le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes, d'épaisseurs infiniment minces ; la déformation du matériau s'effectue par un glissement relatif des différentes couches les unes sur les autres, sans qu'il y ait de transfert de matière d'une couche à l'autre ; c'est un mouvement strictement ordonné et stratifié qui se produit sans brassage du matériau et sans variation de son volume [8].

II.8.1.2. Contrainte de cisaillement :

La contrainte de cisaillement (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 frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche, elles sont appelées force de cisaillement (Figure II.5) [8].

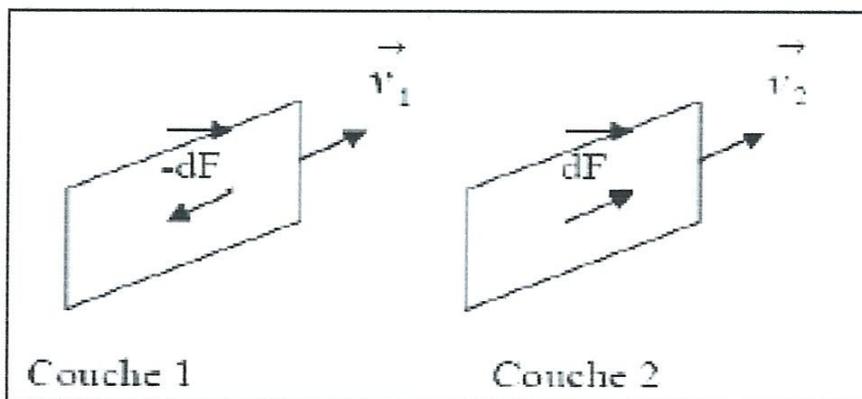


Figure II.5 : forces agissant sur deux éléments de couches voisines.

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 (équation II.5):

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (II.5)$$

τ : représente une force par unité de surface (N/m²) ou (Pa) et dS est la surface élémentaire de l'entité considérée.

II.8.2.La viscosité :

Les coefficients de viscosité sont des grandeurs physiques qui jouent un rôle essentiel en rhéologie. Leurs connaissances suffisent parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique du matériau. On définit différents coefficients de viscosité.

✓ II.8.2.1.Viscosité dynamique :

Elle est définie par la relation :

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (II.6)$$

Et est appelée également viscosité apparente, son unité est le poise (p) dans le système CGS, et le pascal seconde (Pa.s) dans le système MKSA. Il est clair que μ est une fonction de la température T et de la pression P extérieures.

✓ II.8.2.2.Viscosité cinématique :

Ce coefficient est défini par la relation :

$$\nu = \frac{\rho}{\mu} \quad (II.7)$$

Où ρ est la masse volumique du matériau, l'unité de ν est le cm²/s encore appelé stokes (St) dans le système CGS, le m²/s dans le système MKSA.

II.8.3. Différents comportements rhéologiques :

Dans les systèmes dilués, la distance interparticulaire est grande par rapport à la taille des particules. Les forces gravitationnelles peuvent être négligées et les propriétés sont indépendantes du temps. Les particules diffusent librement au sein de la suspension pour aboutir à un arrangement aléatoire. Lorsque la concentration en particules augmente, la probabilité d'interactions particule-particule augmente. Les particules s'organisent en entités de plusieurs particules susceptibles de se déformer ou de s'orienter sous l'effet des forces hydrodynamiques [16].

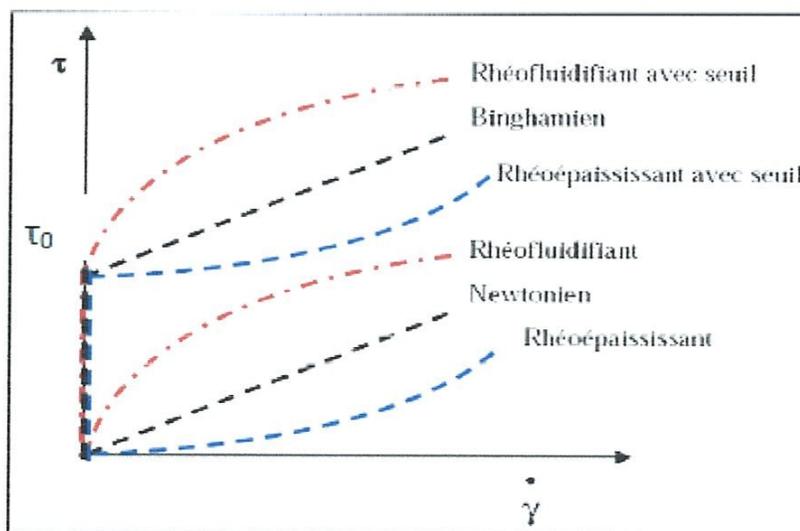


Figure II.6 : Courbes d'écoulement des principaux comportements rhéologiques.

➤ II.8.3.1. Fluides newtoniens :

Les fluides idéaux ou normaux appartiennent à ces systèmes. Ils présentent une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement, τ , et le gradient de vitesse, $\dot{\gamma}$. Le coefficient de proportionnalité, η , tel que $\tau = \eta \dot{\gamma}$, définit la viscosité absolue du fluide. Il est constant, indépendant de la contrainte de cisaillement et du gradient de vitesse [18].

Le rhéogramme d'un tel fluide est donc une droite passant par l'origine, sa viscosité dynamique est constante.

➤ **II.8.3.2. Les fluides non newtoniens indépendants de temps :**

Dans ce cas, la viscosité n'est pas constante. A chaque valeur du couple vitesse de cisaillement, contrainte de cisaillement ($\tau, \dot{\gamma}$) correspond une valeur de la viscosité μ . Il en existe quatre catégories principales qui peuvent être regroupées en deux grands groupes :

- Les fluides sans contrainte seuil (les fluides rhéofluidifiants et rhéoépaississants).
- Les fluides à contrainte seuil (les fluides plastiques de type binghamien et les fluides plastiques de type Herschel-Bulkley).

✓ **II.8.3.2.1. Les fluides sans contrainte seuil :**

1. Fluides rhéofluidifiants (ou pseudoplastique) :

La viscosité apparente est à peu près constante pour les plus faibles valeurs de vitesse de cisaillement imposées et vaut η_0 . Ce rapport décroît ensuite progressivement lorsque la vitesse de cisaillement augmente, jusqu'à atteindre une valeur de viscosité limite (η_∞) [16].

La représentation passe par l'origine avec une décroissance de la dérivée. Donc, La courbe d'écoulement correspondant à ce comportement va s'incurver vers le bas [17]. Les suspensions de particules asymétriques ont souvent ce comportement. De nombreuses solutions de polymères présentent ce type de comportement qui peut être attribué à des macromolécules entremêlées qui se séparent progressivement et s'alignent avec l'écoulement. Dans d'autres cas, cela provient de la disparition des structures qui sont formées par suite de l'attraction entre particules solides.

2. Fluides rhéoépaississants (dilatants) :

Le rhéoépaississement correspond à une augmentation de la viscosité à mesure que le gradient de vitesse croît. Donc, la courbe d'écoulement correspondant à ce comportement va s'incurver vers le haut. Ce comportement est beaucoup moins fréquent. Ce phénomène est lié à la dilatance de la matière ou à des réorganisations associées à un accroissement de la fraction volumique (ex : émulsions de bitume, micelles géantes . . .) [17]. Il concerne des dispersions très concentrées, les solutions

d'amidon, sables mouillés et compactés, certaines huiles polymériques et certains amidons dans l'eau.

✓ II.8.3.2.2. Les fluides à contrainte seuil :

L'origine de la contrainte seuil s'explique par l'existence au départ, d'une certaine structure tridimensionnelle rigide (particules emboîtées) ou cohésion (particules floculées due aux forces interparticulaires dans la suspension. Ces forces peuvent être des forces de friction, des forces intermoléculaires de Van Der Waals (forces attractives), des forces d'interaction entre les doubles couches (forces répulsives) [19].

1. Les fluides Binghamiens :

Ces fluides présentent un seuil d'écoulement τ_s au-delà duquel ils s'écoulent comme un liquide newtonien: c'est le comportement plastique idéal. Si le mélange est suffisamment concentré, il se forme un réseau d'interaction tridimensionnel dans tout le volume. Le fluide présente alors un seuil de contrainte minimum, τ_s , appelé également seuil de plasticité qu'il est nécessaire d'appliquer pour briser le réseau et amorcer l'écoulement [18].

2. Les fluides rhéofluidifiant avec contrainte seuil :

Ces fluides présentent un comportement rhéofluidifiant au-delà d'une contrainte seuil. Autrement dit, après une certaine contrainte appliquée, la viscosité diminue lorsque la vitesse de cisaillement augmente.

➤ II.8.3.3. Les fluides non newtoniens dépendants du temps :

✓ II.8.3.3.1. Fluides thixotropes :

La thixotropie est la propriété physique de certains fluides de présenter une viscosité dépendante du temps. Les fluides thixotropes ont une viscosité qui diminue avec le temps quand on leur applique une contrainte constante à condition que le phénomène soit réversible. Dans ces conditions, la viscosité dynamique n'est plus fixée pour une valeur de contrainte ou de vitesse de déformation, mais dépend également d'un autre paramètre : le temps. Ainsi, lorsqu'on trace dans un même système d'axes les courbes d'écoulement pour un cisaillement croissant, puis pour un cisaillement décroissant, nous obtenons deux courbes.

Il s'agit alors d'une boucle d'hystérésis. Ce phénomène est généralement lié à la désorganisation de la structure et est réversible [19]. Un fluide non newtonien peut avoir une caractéristique thixotrope si sa viscosité dépend de la durée d'application de la contrainte de cisaillement. La méthodologie utilisée pour déterminer le caractère thixotrope de fluides consiste le plus souvent en l'application d'un cycle de cisaillement montée-palier-descente (Figure II.7) [16].

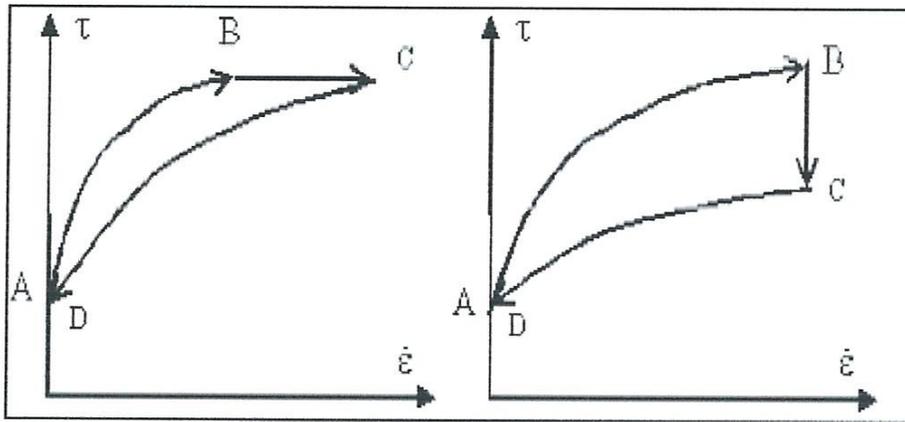


Figure II.7 : Rhéogramme enregistré par un rhéomètre à contrainte imposée, (à gauche).
Rhéogramme enregistré par un rhéomètre à vitesse de cisaillement imposée, (à droite).

Un trépan au repos dans un puits de forage peut être cimenté dans sa propre boue, on y injecte avant un arrêt du forage, une boue aux propriétés thixotropiques qui empêche les matériaux environnants de se déposer. Lors d'un redémarrage, elle se liquéfie par vibration.

✓ II.8.3.3.2. Fluide antithixotrope :

C'est le phénomène inverse, à savoir qu'à contrainte, τ , ou à gradient de vitesse, $\dot{\gamma}$, donnés, la viscosité dynamique augmente avec le temps.

II.8.4. Modèles rhéologiques :

De nombreux modèles, reliant la contrainte de cisaillement τ au gradient de cisaillement $\dot{\gamma}$ ont été développés afin de décrire les comportements rhéologiques les plus couramment rencontrés. Les modèles d'Ostwald-de Waele, de Carreau-Yassuda et de Cross représentent des comportements sans contrainte seuil. Dans le cas des "fluides à seuil", on ajoute la contrainte seuil (τ_0). Les deux modèles les plus utilisés

pour caractériser les fluides à seuils sont, respectivement, le modèle de Bingham (1922) et le modèle de Herschel-Bulkley(1926).

➤ **Le modèle newtonien :**

L'écoulement des fluides newtoniens est le cas le plus simple que l'on puisse trouver. Dans ce cas, vitesse de cisaillement et contrainte de cisaillement sont reliés par une loi linéaire, la pente de la droite alors obtenue en traçant le rhéogramme est la viscosité du fluide [20].

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (II.8)$$

➤ **Modèle d'Ostwald de Waele :**

La loi de puissance proposée par Ostwald de Waele permet de décrire simplement le comportement rhéofluidifiant ou rhéoépaississant d'un grand nombre de fluides. Elle permet de définir une viscosité apparente qui décroît avec $\dot{\gamma}$ lorsque n est inférieur à 1 (rhéofluidification) et croît avec $\dot{\gamma}$ dans le cas contraire (rhéoépaississement).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (II.9)$$

Le cas du fluide newtonien est retrouvé pour $n=1$ [20]. La loi d'Ostwald de Waele (équation II.10) est la plus communément utilisée.

Ce modèle peut décrire le comportement rhéofluidifiant.

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (II.10)$$

Dans ce modèle, k est appelée la consistance du fluide et l'écart de l'exposant n (ou indice d'écoulement) à l'unité ($0 < n \leq 1$) traduit la non perfection visqueuse du fluide considéré. Parmi les fluides présentant un comportement pseudoplastique, on compte les suspensions de particules asymétriques, les ciments, les colles, certaines peintures ...

Les fluides dilatants obéissent également à une loi puissance d'Ostwald mais avec $n > 1$, la viscosité apparente augmente lorsque la vitesse de cisaillement croît. Cette catégorie de fluides est beaucoup plus rare que les fluides pseudoplastiques [16].

En réalité, un fluide n'est en général rhéofluidifiant que pour une certaine gamme de taux de cisaillement. Le modèle de Carreau- Yassuda et de Cross (1965), par exemple, tiennent compte du plateau de la viscosité à cisaillement nul et infini.

➤ **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 du taux de cisaillement est :

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (C\dot{\gamma})^m} \quad (II. 11)$$

η_0 : La viscosité au cisaillement zéro, est la valeur de la viscosité au palier newtonien inférieur. C'est une propriété matérielle critique qui peut s'avérer utile pour effectuer des évaluations de la suspension, de la stabilité de l'émulsion, des estimations de poids moléculaire de polymères comparatifs et des changements dus au processus de suivi ou de la formulation des variables etc.

η_{∞} : est la Viscosité à l'infini de cisaillement. Ce qui nous indique comment notre produit est susceptible de se comporter dans les situations de traitement très élevé au cisaillement.

Le paramètre "**m**" est connu sous le nom « constante de taux ». Il est sans dimension, et représente une mesure du degré de dépendance de la viscosité sur le taux de cisaillement dans la région fluidifiée. La valeur de zéro pour "**m**" indique un comportement newtonien, et avec **m** tend vers unité, le comportement est de plus en plus rhéofluidifiant.

Le paramètre "**C**" est connu comme la constant du temps de Cross (ou parfois de la consistance). La réciproque, $1/C$, donne un taux de cisaillement critique qui prouve un indicateur utile du taux de cisaillement pour un rhéofluidifiant.

➤ **Le modèle bingham :**

Le modèle de Bingham est le plus simple de ces modèles, le fluide de Bingham s'écoule lorsqu'un seuil minimal de contrainte τ_0 est dépassé. Ce modèle permet de décrire le comportement rhéologique de nombreux matériaux (boues de forage, peintures à l'huile, certaines graisses...). Equation d'état du modèle de Binghamien s'écrit :

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \dot{\gamma} \quad (II.12)$$

Où η_{pl} est la viscosité plastique.

➤ **Le modèle de Herschel Bulkley**

Le modèle d'Herschel-Bulkley est celui permettant de décrire la plupart des fluides plastiques (fluides à seuil), la courbe d'écoulement de tels fluides finit par devenir rectiligne au-delà d'une certaine contrainte critique appliquée [16].

Il s'agit en fait d'une loi de puissance à laquelle on a ajouté le terme τ_s [13] [18].

$$\tau = \tau_s + k \dot{\gamma}^n \quad (II.13)$$

Où .

n : l'indice d'écoulement et k la consistance du fluide.

Si $n = 1$, le fluide a un comportement Binghamien.

Si $n < 1$, le fluide est dit rhéofluidifiant avec seuil.

Si $n > 1$, le fluide est dit rhéoépaississant avec seuil.

➤ **Model de Casson :**

Dans le cas particulier des fluides rhéofluidifiants avec seuil d'écoulement, il est possible d'utiliser l'équation de Casson (équation II.14). Ces fluides présentent un comportement plastique fluidifiant avec, généralement, une « région newtonienne » pour des vitesses de déformation élevées.

$$(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_s})^2 = \eta \dot{\gamma} \quad (II.14)$$

II.8.5. Régime d'écoulement :

Il existe différents régimes d'écoulement [21] :

II.8.5.1. Les régimes permanents :

Ou l'écoulement établi. Parmi ceux-ci se classe :

➤ II.8.5.1.1. Le régime laminaire :

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. Pour l'écoulement dans un tube cylindrique, la vitesse est maximale le long de l'axe de tube ; elle est nulle à la paroi.

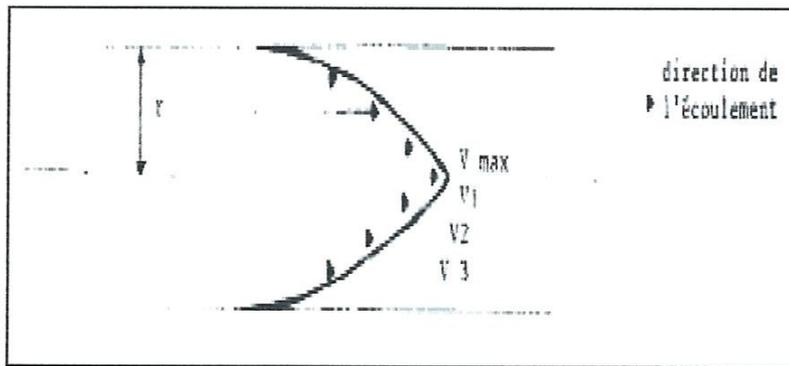


Figure II.8 : Schéma d'écoulement présente le régime permanent.

➤ II.8.5.1.2. Le régime turbulent :

Caractérisé par la formation de petits tourbillons répartis dans toute la masse du liquide.

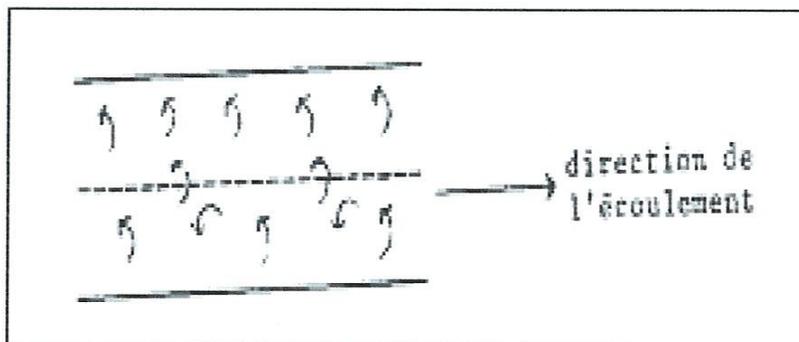


Figure II.9 : Schéma d'écoulement présente le régime turbulent.

➤ **II.8.5.1.3. L'écoulement en bouchon :**

Où 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.

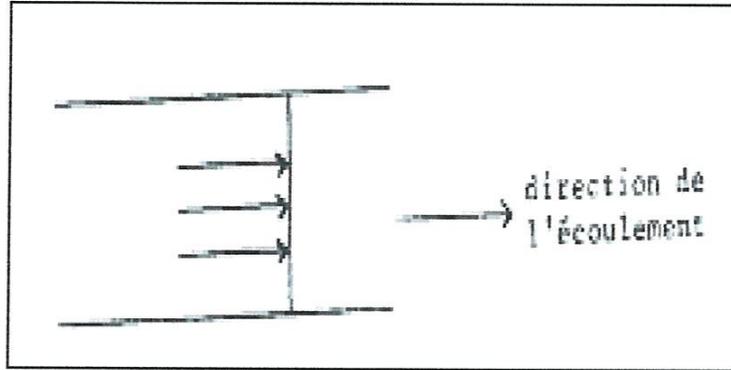


Figure II.10 : Schéma présente l'écoulement en bouchon.

L'écoulement en bouchon n'existe pas que pour certaines catégories de fluides : une suspension de bentonite (fluide plastique) peut s'écouler en bouchon, contrairement à l'eau, le gas-oil, une solution...

II.8.5.2. Les régimes transitoires :

Où les conditions d'écoulement 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 d'un changement de section, etc...

II.8.5.3. Changement de régime avec la vitesse moyenne de circulation :

Pour un fluide de caractéristiques données circulent dans un tube cylindrique rectiligne de géométrie donnée, ou aura, en fonction de la vitesse moyenne d'écoulement V .

➤ **Pour un fluide ne présentant pas l'écoulement en bouchon :**

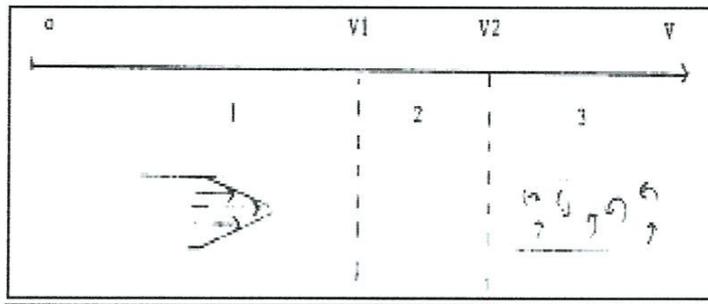


Figure II.11: Schéma d'un fluide ne présente pas l'écoulement en bouchon.

1. Régie laminaire (permanent).
2. Zone de transitions laminaire-turbulent.
3. Régime turbulent (permanent en moyenne).

➤ **Pour un fluide présentant l'écoulement en bouchon :**

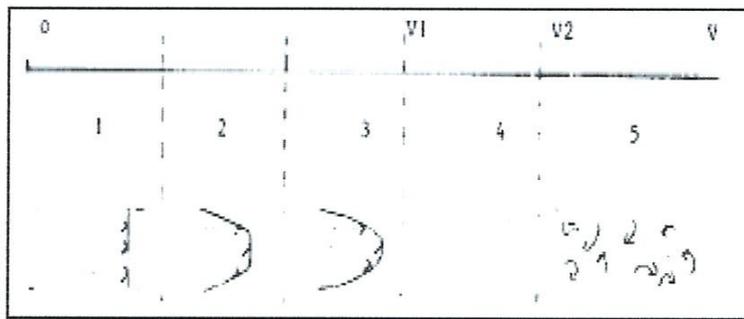


Figure II.12 : Schéma d'un fluide présentant l'écoulement en bouchon.

- 1- Ecoulement en bouchon (permanent).
- 2- L'épaisseur du noyau central diminue quand V augmente (transitoire).
- 3- Régime laminaire (permanent).
- 4- Zone de transition laminaire-turbulent.
- 5- Régime turbulent (permanent en moyenne).

V1 : représente la vitesse critique correspondant à la fin du régime laminaire.

V2 : représente la vitesse critique correspondant au début du régime turbulent.

II.9.Conclusion :

La boue de forage est un élément essentiel pendant l'opération de forage, il joue plusieurs rôles et fonctions telles que : La remontée des déblais, refroidissement et lubrification de l'outil et le maintien des parois du trou foré..., la composition de la boue de forage va dépendre de la formation rocheuse à traverser, des contraintes environnementales et économiques.

Il est divisé en trois types : boue à base de l'eau, boue à base de l'huile et les fluides de forage gazeux.

La rhéologie permet, alors de prévoir le comportement d'un corps, les fonctions de la boue de forage sont réalisées par ces caractéristiques rhéologiques comme la viscosité, la contrainte seuil et la thixotropie qui sont étudiées dans le chapitre suivant.

PARTIE PRATIQUE

CHAPITRE III

Chapitre III : ETUDE DES PROPRIETES RHEOLOGIQUE DE LA BOUE DE FORAGE

III.1.Introduction :

La connaissance des propriétés rhéologiques de boue de forage est d'une importance capitale dans la réussite de l'opération de forage. Lors du passage de l'outil de forage à travers les différentes couches ; la boue joue le rôle du transporteur ; elle est responsable de l'évacuation des déblais de roche du fond du trou foré vers la surface, toute en maintenant ces derniers en suspension en cas d'arrêt brusque, et la consolidation des parois du trou par la formation d'un cake.

La rhéologie couvre un domaine d'investigation très large, puisqu'elle traite de l'écoulement des matériaux et de leur déformation sous l'action de contraintes. Elle permet l'étude de systèmes complexes, intermédiaires entre le solide élastique et le fluide newtonien. La rhéologie apporte de nombreuses informations sur l'organisation des solutions.

Les expériences de rhéologie, ont été réalisées à l'aide d'un viscosimètre Marsh et un viscosimètre FANN à 6 vitesses pour déterminer la viscosité plastique (VP), la yield point (YP) et gels (gel 0, gel 10). Le type de boue utilisé est boue à base de l'eau.

III.2.Définition de la rhéologie:

La rhéologie étudie la déformation des matériaux (cas des solides) ou leur écoulement (cas liquide) sous l'effet d'une contrainte.

Une force appliquée à un corps lui fait subir une déformation. Pour un solide, il y aura déformation élastique si le corps revient a son état premier des qu'on cesse d'appliquer cette force (c'est le cas de l'élastique que l'on étire) ou déformation plastique s'il revient à son état premier sous l'action d'autres forces (c'est le cas de la

boule de mastic que l'on déforme). Pour un fluide, l'action d'une force donne un écoulement.

III.3. Détermination expérimentale des Caractéristiques rhéologiques :

III.3.1. Matériel et protocole de travail :

L'appareil utilisé est :

➤ **III.3.1.1. La viscosimètre FANN :**

a. Principe :

C'est un appareil à cylindres coaxiaux. Les modèles les plus couramment commercialisés comportent :

✓ Soit deux vitesses de rotation (600 - 300 T/mn). Dans ce cas, le rotor est entraîné à la main (viscosimètre mécanique) ou à l'aide d'un moteur électrique (viscosimètre électrique).

✓ Soit six vitesses de rotation (600 - 300 - 200 - 100 - 6 - 3 T/mn). Dans ce cas, le rotor est entraîné par un moteur électrique.

✓ Soit un appareil à vitesse variable entraîné par un moteur électrique.

Ces appareils sont normalisés par L'API :

Les appareils à deux vitesses sont de moins en moins utilisés dû à leur faible échantillonnage. On détermine en fonction du taux de cisaillement (déduit de la vitesse de rotation) la tension de cisaillement (déduite de la lecture de la graduation).



Figure III.1 : Viscosimètre FANN.

b. Mode d'emploi :

- ✓ Prendre de la boue, tamiser sur le tamis de l'entonnoir Marsh, agiter 5 mn à l'aide d'un agitateur, puis remplir le godet du viscosimètre.
- ✓ Immerger les cylindres coaxiaux (l'appareil est muni d'un système de coulisse avec une molette de blocage) jusqu'à ce que le trait repère du rotor affleure la surface de la boue.
- ✓ Faire tourner le rotor à 600 T/mn en choisissant la position convenable du bouton de changement de vitesse et de l'interrupteur. Lire la déviation sur le cadran.
- ✓ Sans arrêter l'entraînement du rotor, régler la vitesse de rotation à 300 T/mn. Lire la déviation de la graduation.
- ✓ Faire de même pour les autres vitesses.

III.3.1.2. Détermination de la viscosité plastique (VP) et de la yield point (YP) :

Ces déterminations se font à l'aide du viscosimètre FANN :

- ✓ **Détermination de la viscosité plastique (VP) :** exprimer en centipoises :

$$VP = L_{600} - L_{300} \text{ (Cp).}$$

L_{600} : lecture Fann 600 tr/min.

L_{300} : lecture Fann 300 tr/min.

- ✓ **Détermination de la yield point :**

$$YP = L_{300} - VP = (VA - VP).2 \text{ (lb/100ft}^2\text{).}$$

III.3.1.3.Détermination de la thixotropie :

La thixotropie peut être estimée par l'évolution du gel en fonction du temps. Selon la norme API (American Petroleum Institute), on détermine le gel 10 seconde (gel0) et le gel 10 minute (gel10) avec le viscosimètre Fann à 2 vitesses ou 6 vitesses.

Le processus opératoire est le suivant : faire tourner le rotor à 600 tours/min pendant 10 secondes puis stopper le moteur tout en plaçant le petit bouton moleté supérieur en position intermédiaire. Attendre 10 secondes et tourner doucement à la main (à 3 tour/min) le gros bouton moleté situé au-dessus de l'appareil (sens de rotation inverse des aiguilles d'une montre).

Faire à nouveau tourner le rotor en grande vitesse pendant 10 secondes puis 10 minutes sans toucher la boue et effectuer la même opération.

Avec le viscosimètre Fann à 6 vitesses, la détermination est faite selon le même processus ; toutefois, au lieu de faire tourner le rotor à la main, on utilise la vitesse de rotation de 3 tours/min.

III.3.2. Propriétés de la boue utilisée :

Propriétés d'intervalle	26"	17"½	12"¼	8"½
Type de Fluides	Bentonitique	KCL/Polymer	KCL/Polymer	KCL/Polymer
Densité SG	1.05 - 1.08	1.10 - 1.15	1.15 - 1.20	1.13 - 1.15
Yield Point b/100ft ²	45 - 50	18 - 24	18 - 24	18 - 24
API FL c/30min	NC / 20	3 - 4	3 - 4	3 - 4
KCL% by Wt	-	4% - 5%	4% 5%	4%
Dureté totale	< 400	< 400	< 400	< 400
pH	11.5 - 12	9.5 - 10	9.5 - 10	9.5 - 10
MBT kg/m ³	80 - 110	≤ 21	≤ 21	≤ 14
LGS	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %

Tableau III.1 : Les Propriétés de la boue de forage utilisé pendant l'opération de forage.

III.3.3. Etude des propriétés rhéologique de la boue de forage à base d'eau :➤ Phase 26 " :Boue :

Pour cette phase on utilise une boue bentonite qui convulse aux formations fragiles et peu consolidées parce qu'elle offre :

- ✓ Filtrat élevé pour formation d'un cake épais et colmatage des sables.
- ✓ Une grande viscosité pour un meilleur transport du sable.

Formulation de la boue :

Propriétés des fluides recommandés							
Densité	FV	YP	PV	FL	MBT	pH	dureté
1.05-1.08	70-80	50	ALAP	NC	80-110	12	<400
Formulation de fluide							
Produit	Non chimique		Fonction		Concentration		
Bentonite	Treated clays		Viscosité et filtration contrôle		80 Kg/m ³		
Caustic Soda	Sodium Hydroxide		Traiter l'alcalinité et la dureté		0.5 Kg/m ³		
Soda Ash	Sodium Carbonate		Traiter l'alcalinité et la dureté		1.0 Kg/m ³		
Polysal	Starch		Le contrôle de perte de fluide		5.0 Kg/m ³		

Tableau III.2 : Propriétés et formulations de la boue utilisé dans la phase 26".

Les résultats obtenus des propriétés rhéologiques (VP, YP, Gel0, Gel10) de la boue de forage de cette phase pendant trois jours sont résumés dans ce tableau III.3 :

Jours / Propriétés	1	2	3
VP	8	9	10
YP	50	51	50
Gel 0	19	20	21
Gel 10	35	35	34

Tableau III.3 : Les propriétés rhéologiques obtenus dans la phase 26"

➤ **Phase 17"1/2 :****Boue :**

Pour cette phase on utilise une boue KCl + Polymère qui a pour le but d'éviter le contact (Eau, argile).le Kcl ; c'est un inhibiteur d'argile pour éviter le gonflement d'argile par l'eau.

Formulations de la boue :

Propriétés des fluides recommandés							
Densité	YV	Kcl (%)	FL	LGS	MBT	pH	Dureté(g/l)
1.10-1.18	18-24	4-5	< 4	< 5	< 21	9.5-10	<400
Formulation de fluide							
Produit	Non chimique		Fonction		Concentration		
Bentonite	Treated clays		Viscosité et filtration contrôle		28 kg/m ³		
Caustic Soda	Sodium Hydroxide		Traiter l'alcalinité et la dureté		0.7 Kg/m ³		
Soda Ash	Sodium Carbonate		Traiter l'alcalinité et la dureté		0.5 kg/m ³		
CMC HV	Carboxyl- methyl- Cellulose Polymer		perte de fluide et viscosité		3.0 kg/m ³		
CMC LV	Carboxyl- methyl- Cellulose Polymer		Le contrôle de perte de fluide		5.0 kg/m ³		
Dios-Vis	Bios-Polymer		Gélifiant		1.0 kg/m ³		
Polysal	Starch		Le contrôle de perte de fluide		8.5 kg/m ³		
KCl	Potassium Chloride		Inhibition d'argile		37.22 kg/m ³		
CaCO ₃	Calcium Carbonate		Agent de pontage et contrôle du poids		As needed		

Tableau III.4 : Propriétés et formulations de la boue utilisé dans la phase 17"1/2.

Les résultats obtenus des propriétés rhéologiques (VP, YP, Gel0, Gel10) de la boue de forage de cette phase pendant trois jours sont résumés dans ce tableau III.5 :

Jours \ Propriétés	1	2	3
VP	9	14	12
YP	18	22	24
Gel 0	17	7	6
Gel 10	25	11	10

Tableau III.5 : Les propriétés rhéologiques obtenues dans la phase 17"1/2.

➤ **Phase 12"1/4 :****Boue :**

Pour cette phase on utilise une boue KCl + polymère a pour éviter la contamination de la boue de forage par les eaux chlorurées calciques.

Formulations de la boue :

Propriétés des fluides recommandés							
Densité	Kcl	YP	LGS (%)	FL	MBT	pH	dureté
1.15 – 1.20	4 - 5	18 - 24	< 5	<4	< 21	9.5-10	<400
Formulation de fluide							
Produit	Non chimique		Fonction		Concentration		
Bentonite	Treated clays		Viscosité et filtration contrôle		28 Kg/m ³		
Caustic Soda	Sodium Hydroxide		Traiter l'alcalinité et la dureté		0.7 Kg/m ³		
Soda Ash	Sodium Carbonate		Traiter l'alcalinité et la dureté		0.5 Kg/m ³		
CMC HV	Carboxyl- methyl- Cellulose Polymer		Viscosité et la perte de fluide		0.3 Kg/m ³		
CMC LV	Carboxyl- methyl- Cellulose Polymer		Contrôle de la perte de fluide		0.5		
Duos-Vis	Bio-Polymer		Gélifiant		1.0		
Polysal	Starch		Contrôle de la perte de fluide		8.5		
Kcl	Potassium Chloride		Inhibiteur d'argile		37.22		
CaCO ₃	Calcium Carbonate		Agent de pontage et contrôle du poids		As needed		

Tableau III.6 : Propriétés et formulations de la boue utilisé dans la Phase 12"1/4.

Les résultats obtenus des propriétés rhéologiques (VP, YP, Gel₁₀, Gel₁₀₀) de la boue de forage de cette phase pendant trois jours sont résumés dans ce tableau III.7 :

Jours \ Propriétés	1	2	3
VP	9	11	13
YP	18	22	24
Gel 0	8	8	7
Gel 10	10	9	8

Tableau III.7 : Les propriétés rhéologiques obtenues dans la phase 12"1/4.

➤ Phase 8"1/2 :

Boue : Pour cette phase on utilise une boue KCl+ polymère.

Formulations de la boue :

Propriétés des fluides recommandés							
Densité	Kcl (%)	YP	LGS (%)	FL	MBT (Kg/m ³)	pH	dureté
1.13 – 1.15	4	18 - 24	< 5	<4	< 14	9.5-10	<400
Formulation de fluide							
Produit	Non chimique		Fonction		Concentration		
Bentonite	Treated clays		Viscosité et filtration contrôlée		28 Kg/m ³		
Caustic Soda	Sodium Hydroxide		Traiter l'alcalinité et la dureté		0.7 Kg/m ³		
Soda Ash	Sodium Carbonate		Traiter l'alcalinité et la dureté		0.5 Kg/m ³		
CMC HV	Carboxyl- methyl- Cellulose Polymer		Viscosité et la perte de fluide		0.3 Kg/m ³		
CMC LV	Carboxyl- methyl- Cellulose Polymer		Contrôle de la perte de fluide		0.5 Kg/m ³		
Duos-Vis	Bio-Polymer		Gélifiant		1.0 Kg/m ³		
Polysal	Starch		Contrôle de la perte de fluide		8.5 Kg/m ³		
Kcl	Potassium Chloride		Inhibiteur d'argile		37.22 Kg/m ³		
CaCO ₃	Calcium Carbonate		Agent de pontage et contrôle du poids		As needed		

Tableau III.8 : Propriétés et formulations de la boue utilisé dans la Phase 8"1/2

Les résultats obtenus des propriétés rhéologiques (VP, YP, Gel0, Gel10) de la boue de forage de cette phase pendant trois jours sont résumés dans ce tableau III.9 :

Jours Propriétés	1	2	3
VP	9	11	11
YP	18	23	24
Gel 0	5	5	5
Gel 10	9	9	9

Tableau III.9: Les propriétés rhéologiques obtenues dans la phase 8"1/2.

III.4. Interprétations :

A partir des résultats obtenus on remarque que :

- Dans la phase 26" :

La présence de matière solide conduit aussi à des valeurs des gels et de viscosité sont déférences à la valeur normal par contre de la yield point ne sont pas très infecté. La quantité de la bentonite diminuée progressivement en vue de préparer le terrain pour la cimentation qui nécessite une viscosité faible et donc une quantité de la bentonite réduite ceci est réalisé par centrifugation.

La vitesse annulaire est faible, donc il faut augmenter le yield point à l'aide de boutures. Ceci améliore l'efficacité des transports et assure un bon nettoyage du trou avec des pilules de haute viscosité (mélange avec 100 –120Kg/m³ de bentonite) doit être pompé. La yield point doit être maintenue à 50 lb/100ft². La valeur initiale de gels doit être d'au moins 20 lb/100ft² et les gels 10min 40 lb/100ft² afin d'assurer un bon coupe suspension dans l'état statique.

- Dans la phase 17"1/2 :

On remarque une variation pour les valeurs : gel 0, gel 10, la viscosité plastique et yield point par rapport à la norme admise a cause de déplacement de boue bentonite de la phase 26".

- Dans la phase 12"1/4 :

Les résultats conforme aux normes admises, la diminution des valeurs obtenus est due à l'arrive du gaz.

- Dans la phase 8"1/2 :

On observe un problème à cause de l'apparition du gaz dans la boue et une augmentation de la viscosité plastique et la contrainte seuil (YP) ce qui implique un bon rendement au cours de forage.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

La formulation des fluides de forage ainsi que la nouvelle technologie relative aux outils utilisés ont beaucoup évolué afin d'apporter de meilleures solutions aux problèmes soulevés et assurer une amélioration continue des opérations de forage. Plusieurs travaux ont montré, qu'au cours du forage, la stabilité des parois du puits est intimement liée à plusieurs phénomènes incluant les interactions fluides-roches, l'aspect mécanique des roches, le comportement anormal des formations géologiques traversées ainsi que certaines pratiques inappropriées lors du forage.

Par ailleurs, les propriétés rhéologiques à importance capitale pour les fluides de forage à base d'eau

A cet effet, dans ce travail, on a traité les propriétés rhéologiques de la boue de forage à base d'eau, les effets et son influencent sur le circuit de la boue lors de l'opération de forage.

On conclure que :

✓ Les propriétés rhéologiques sont contrôlées pour éviter la formation des gels excessifs et aussi pourraient résulter de l'invasion de la formation argileuse.

✓ La Yield point, Gel 0 et Gel 10 doivent être contrôlés avec une addition d'un polymère. Cependant, des précautions doivent être prises pour éviter un Yield point très élevé en raison de ses effets néfastes sur : l'hydraulique, solides abandon à la surface, les pressions excessives lors d'une tentative de briser la

circulation qui peut conduire à la perte de circulation. Ceci améliore l'efficacité des transports et assure un bon nettoyage du trou.

✓ Une viscosité maximale améliore la mise en suspension des déblais et réduit l'infiltration et l'érosion, tandis qu'une faible viscosité facilite le pompage du fluide, améliore la lubrification et réduit les pertes de charges, accélérant ainsi l'avancement du forage.

✓ Dans tous les cas, les pilules visqueuses devraient être distribuées périodiquement pour vérifier le nettoyage du trou et devraient être sur place en bas avant de faire des voyages et du tubage.

La connaissance des propriétés rhéologiques est d'une grande importance pour la résolution des problèmes de forage et permet de recommander et de prévoir le comportement des fluides au cours du forage.

**RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE :

- [1] GARCIA C., PARIGO P., « Boues de Forage », Institut Français du Pétrole (I.F.P), société des éditions Technip, 1968.
- [2] Forage Rotary, « La boue de Forage », Edition Technip 1972.
- [3] NGUYEN J., P., « fluide de forage », Technique d'exploitation pétrolière, le Forage Technip, 1993.
- [4] RYEN CAENN, GEORGE V. CHILLINGAR, « Drilling fluids: state of the art », journal of petroleum science and engineering 14, 1996, 221-230.
- [5] LANDRIOT G., « Fluide de forage », édition Technip 1968.
- [6]: J.P. NGUYEN ; technique d'exploitation pétrolière, le forage. Livre, Institut Français du Pétrole, (1993)
- [7] DE LAMBALLERIE G., « Boue à base d'huile », Collection Colloques et Séminaires I.F.P, Edition Technip, 1969.
- [8] ADAM T., BOURGOYNE Jr, et al., " Applied drilling engineering", SPE Textbook series. Vol 2. 1991, pp. 41.
- [9] MICHAEL J. ECONOMIDES, et al., " Petroleum well construction", édition John wiley & sons. 1988. pp. 199 – 204.
- [10] HERZHAFT B., « Les fluides de forage : un exemple de fluides complexes industriels », 36ème colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie (GFR 2001), Marne-la-Vallée France, 10-12 octobre 2001.
- [11] : Ragouilliaux Alexandre ; Etude rhéophysique de systèmes émulsions inverses / argile organophile. Applications aux boues de forage pétrolier. Thèse de doctorat, de l'Université pierre et Marie Curie, Spécialité Physique des liquides (2007).
- [12] : KHODJA Mohamed ; les fluides de forage : Etude des performances et considérations environnementales. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Science des procédés, Génie des Procédés et de l'Environnement (2008).
- [13] : Nevila JOZJA ; Etude de matériaux argileux albanais. Caractérisation multi-échelle d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la

- perméabilité. Thèse Doctorat, Université d'Orléans, École doctorale : Sciences et Technologies, Discipline : Sciences des Matériaux (2003).
- [14] : Hélène GAILHANOU ; Détermination expérimentale des propriétés thermodynamiques et étude des nanostructures de minéraux argileux. Thèse de Doctorat, Université de Aix-Marseille, Spécialité : Physico-chimie des minéraux et thermodynamique (2005).
- [15] : Koffi Léon KONAN ; Interactions entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium. Thèse de Doctorat, Université de Limoges Discipline : Matériaux Céramiques et Traitements de Surface (2006).
- [16] : Kouloughli salim ; etude experimentale des melanges sable bentonite- Leurs Performances comme Barrières de Confinement dans les CET. Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Génie Civil (2007).
- [17] : Ali ASSIFAoui ; Etude de la stabilité de barbotines a base d'argiles locales. Application aux formulations céramiques industrielles. Thèse Doctorat, Université Hassan ii Ain-Chock, Faculte des Sciences, Casablanca (2002).
- [18] : Nicolas TIXIER ; Approche des propriétés rhéologiques de suspensions biologiques floculées. Thèse Doctorat, Université de Limoges Discipline : Chimie et Microbiologie de l'Eau (2003).
- [19] : Firmin Moingeon ; Synthèse de polymères dendronisés par polymérisation anionique vivante et fonctionnalisation de leur surface. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I, Discipline : Chimie (2006).
- [20] : M. GARECHE, N. ZERAIBI & M. AMOURA ; Etude rhéologique et comparative de fluide de forage par les modèles classiques et structuraux. 16ème Congrès Français de Mécanique Nice, (1-5 septembre 2003).
- [21] : MILPARK-CKS-Thimonnier ; Manuel Technique des Fluides de Forage - Vol.1, Edition 1990.

ANNEXES

100
100
100

Annexe 1 : Rhéomètre FANN 35 :

Le viscosimètre employé est le type FANN 35, il s'agit d'un appareil à cylindres coaxiaux dont le rotor est entraîné à l'aide d'un moteur électrique, on mesure la résistance au cisaillement de la boue continue dans un godet dans lequel on immerge les cylindres coaxiaux, on lit sur cadran gradué la résistance au cisaillement à différentes vitesses de rotation du rotor.

➤ Calcul des viscosités et la Yield point :

Viscosité apparente en centpoises (Cps) : $V_a = (L600) / 2$

Viscosité plastique en centpoises (Cps) : $V_p = (L600 - L300)$

Yield point en lb/100ft²

$$Y_v = 2.L300 - L600$$

Viscosité = contrainte/taux de cisaillement

Alors que la technique à vitesse imposée applique une vitesse constante et mesure la contrainte appliquée, la technique plus sophistiquée de mesure à contrainte imposée applique une contrainte constante et mesure la vitesse.

De très faibles contraintes peuvent être imposées, ce qui permet la mesure de consistance de produit au repos.

Les analyses rhéologiques permettent principalement la quantification des propriétés suivantes :

➤ Comportement rhéofluidifiant :

Ce comportement non newtonien se caractérise par une diminution de viscosité lors de l'augmentation de la vitesse de cisaillement. La mesure de viscosité à de nombreuses vitesses de cisaillement permet d'obtenir un profil de viscosité qui peut alors révéler d'importantes caractéristiques de l'écoulement d'un produit qui resteraient invisibles par les techniques classiques de mesure de viscosité en 1 seul point.

➤ Détermination du seuil d'écoulement :

De nombreux produits tels que gels, crèmes, pâtes, présentent une structure propre leur permettant de résister à l'écoulement. Passé ce seuil, les produits se déstructurent et commencent à s'écouler. Cette force minimale, appelée seuil d'écoulement, est un facteur important dans un grand nombre de procédés industriels : pompage, pulvérisation, application, coulure...

➤ Quantification de la thixotropie :

Après déstructuration par cisaillement d'un produit pseudoplastique thixotrope, sa viscosité atteint une valeur limite caractéristique de son profil de viscosité.

Après arrêt du cisaillement, le produit reprend progressivement sa structure et la

➤ **Propriétés viscoélastiques :**

Les produits semi-liquides ou semi-pâteux sont en partie liquide (comportement visqueux) et en partie solide (comportement élastique). Par l'application d'une force très faible, sans déstructuration du produit, l'essai de fluage permet de déterminer de nombreuses caractéristiques d'un produit.

Annexe 2 : Filtre-presse standard API

C'est une caractéristique physique des fluides de forage. Les boues de forage sont constituées d'une phase liquide et de phase solides en suspension. Ces dernières sont soumises à la pression hydrostatique en contact avec des formations poreuses et perméables :

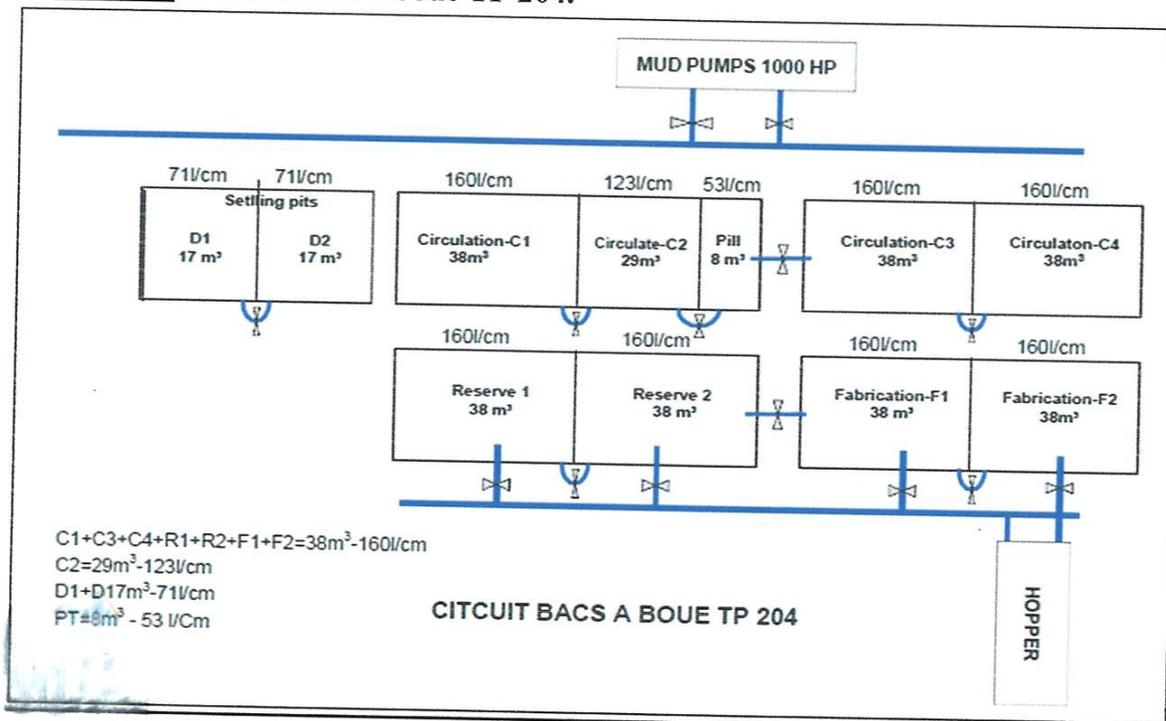
✓ Si le diamètre des pores est supérieur à celui des grains de la phase solide en suspension. La formation absorbera le fluide dans son intégralité. Le cas extrême est celui des pertes totales où le débit de fluide est entièrement absorbé par la formation. Il n'y a donc aucun retour de la boue en surface.

✓ Si le diamètre des pores est inférieur à une partie des éléments de la phase solide en suspension ; il y a filtration, c'est-à-dire dépôt de ces éléments sur la paroi (construction d'un cake) et envahissement par le liquide de bas (filtrat) de la formation. C'est la perméabilité du cake qui conditionne la filtration.

➤ **Principe :**

On soumet la boue à une pression de 7 bars dans un cylindre normalisé muni d'une surface semi-perméable on note la quantité d'eau à travers cette plaque filtrante (imperméable aux colloïdes mais perméable aux liquides) pendant une durée de 30 mn.

Annexe 3 : Le circuit de la boue TP 204.



Annexe 4 : Fiche technique du CMC HV :

➤ **Caractéristiques :**

- CMC HV est un carboxyméthyle cellulose de sodium de haute viscosité
- MW : 700 Kg /mol
- DS : 0,65- 0,85

➤ **Précaution :**

- Eviter tout contact et inhalation.

➤ **Propriétés de CMC HV:**

Properté	Rating
Ion actif	Anionique
Surface active	Très faible
Solubilité	Dans l'eau a tout température
rétenion d'eau	bonne (dépend du pH)
effet de température	viscosité diminue lorsque la température augmente
Effet du pH	augmentation de la viscosité dans l'intervalle de pH3.5 à 12
Effet des ions métalliques monovalent	négligeable
Effet des ions métalliques polyvalents	floculation possible

Annexe 5: Centrifugeuses

Les centrifugeuses actuelles permettent d'éliminer les solides ayant une taille > 4".

