



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Génie Minier

Option : Valorisation des Ressources

Minérales/Exploitation des Mines

Présenté par :

GUEHILIZ HAYAT

CHIKHI YASMINE

Thème

***Etude de la possibilité de la réutilisation
de la boue de forage de type high performance à
base d'eau***

Soutenu le 30/06 /2025 devant le jury composé de:

Président	Mme BOUZIDI.N	Pr	U.A.M.B
Promoteur	Mme KICHER.K	MAA	U.A.M.B
Examineur	Mme TAHRI.T	MCA	U.A.M.B

REMERCIEMENTS

*Toute notre gratitude et nos mercis à dieu Allah,
notre créateur qui nous a donné la force
et le courage pour effectuer ce travail .*

*nous tenons à remercier chaleureusement notre promotrice pour sa patience, sa
disponibilité , et sa compréhension .*

Mme : Kicher Kahina

Nous remercions aussi les membres de jury ;

Mme BOUZIDI .N

D'avoir accepter d'etre présidente de jury ;

Et Mme TAHRI.T

d'avoir accepter d'examiner notre travail .

Nos remerciements vont également aux membres de la société

« SONATRACH »

Et tous personnel de stage.

Dedicaces

*Tout d'abord ,je tiens à remercier **dieu** de m'avoir donné la force et le courage mener à bien ce modeste travail.*

Je dédie ce travail :

*A ma merveilleuse mère **fatiha** ,qui a toujours cru en moi et m'a encouragé à poursuivre mes rêves .sans toi ,je n'aurais pas acquis la force et la résilience nécessaires pour aboutir à ce stade.je t'aime maman et j'implore le tout puissant pour qu'elle t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.*

*A mon cher père **said** , ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours.ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation. Que dieu te garde et te protège .*

*A mon adorable petite soeur **djedjiga** et mes deux frères **wahid** et **mayas** qui ont partagé avec moi tous moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail.*

*A mon cher amour ,**Bouزيد** mon conseiller et mon soutien moral qui était présent dans les moments difficiles . tu as pris doucement ma main pour traverser ensemble des épreuves pénibles.Ton amour inconditionnel été ma sources d'inspiration et de réconfort.*

*Sans oublier ma binome **yasmine** pour son soutien moral,sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

Hayat

Dédicace

Je dédie ce travail avec tout mon amour et ma reconnaissance à ceux qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenue dans chaque étape de ma vie.

À mon cher père Kamel et ma chère mère Nassima, pour leurs sacrifices, leur amour inconditionnel et leurs encouragements constants.

À mon frère Bilal et ma sœur Kamelia, pour leur présence, leur soutien et leur tendresse.

À mes grands-parents, piliers de sagesse et de bienveillance.

À mes amies Manel et Imène, pour leur amitié fidèle, leurs sourires et leur présence précieuse durant toutes ces années.

À ma binôme Hayat, pour le travail partagé, les efforts communs et les moments de complicité.

Ce mémoire est le fruit de votre soutien, de votre patience et de votre amour. Merci du fond du cœur.

YASMINE

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : synthèse bibliographique

I.1. Généralités sur les boues de forage.....	1
I.1.1.Définition	1
I.1.2.Rôle de la boue de forage.....	1
I.1.3. Le cycle de vie de la boue de forage	2
I.1.4.Types de boues de forage.....	3
I.1.4.1Boues à base d'eau (Water-Based Muds – WBM).....	4
I.1.4.2. Les boues de forage HPWBM.....	5
I.1.4.3. Boues à base d'huile	5
I.1.4.4. Les boues synthétiques (SBM).....	6
I.1.4.5.Les boues pneumatiques.....	6
I.2. Les boues de forage High-Performance Water-Based Muds, HPWBM.....	6
I.2.1. Composition chimique et additifs.....	7
I.2.2. Caractéristiques principale	14
I.2.3. Rôle des boues HPWBM	15
I.2.4.Types de puits adaptés à l'utilisation des HPWBM	16
I.2.5.Domaines d'application.....	16
I.2.6.La comparaison entre HPWBM et WBM	17
I.2.7. Les avantages et les inconvénients	17

CHAPITRE II : Matériels et Méthodes

II.1.Préparation de la boue de forage selon la formulation donnée	19
II.2.Mode d'échantillonnage	20
II.3.Utilisation de la boue.....	21
II.4.Analyses physiques et chimiques des caractéristiques de la boue.....	21
II.4.1.Analyse physique	21
II.4.1.1. Mesure de la densité de la boue HPWBM.....	21
II.4.1.2.Les paramètres de la rhéologie.....	22
II.4.1.2Test de Filtrat Basse Température / Basse Pression (LT/LP).....	25
II.4.1.3.Le test de lubricité.....	27
II.4.2.Tests Chimiques d'un Fluide de Forage à Base d'Eau.....	28
II.4.2.1.Test Phénolphthaléine sur Filtrat (pf).....	28
II.4.2.2 .Test Méthylorange sur Filtrat (MF).....	28
II.4.2.3.Test Calcium(Ca^{2+}).....	29
II.4.2.4.Test de pH.....	29
II.4.2.5.Dosage du Chlorure de Sodium (NaCl).....	30
II.4.2.6.Test de la Concentration en KCl (Potassium).....	30
II.4.2.7.Test du Bleu de Méthylène (MBT).....	31
II.4.2.8.Hot Rolling (roulage à chaud).....	32

CHAPITRE III : Résultats et discussions

III.1.Les résultats de La densité.....	34
III.2.Les paramètres de la rhéologie.....	35
III.2. 1.Discussion des résultats rhéologiques.....	35
III.2. 2.Les gels et lowshare rate.....	36
III.2.3.Discussion des résultats.....	36
III .3.Les résultats du filtrat API	37
III.4.Les résultats de lubricité.....	39
III.4.1.Interprétation de résultats.....	39
III.5.Mesure de pH.....	40
III.6.Évolution du taux de KCl dans la boue HPWBM.....	41
III.7.Les résultats des tests de Phénolphtaléine sur Filtrat (pf) et Méthylorange sur Filtrat (MF).....	42
III.8.Le test des Ca^{2+}	43
III.9.Évolution du test au bleu de méthylène dans la boueHPWBM.....	44
III.10.Comparaison entre la boue HPWBM testée en laboratoire et celle utilisée sur chantier.....	45

Conclusion générale

Liste d'abréviation :

WBM : Boues à base d'eau

OBM : Boues à base d'huile

SBM: Boues synthétiques

HPWBM: High performance water based mud

HPHT : haute pression haute température

ROP : Rate of Penetration(le taux de pénétration)

P_v :Viscosité Plastique

Y_p :Yield Point

M_f : Méthylorange sur Filtrat

P_f : Phénolphtaléine sur Filtrat

MBT :test au bleu de méthylène

LSR :lowshear rate(faible taux de cisaillement)

API : volume de filtrat mesuré selon la méthode standardisée de l'API.

EMEC : Engineering Mud and Environmental Control (laboratoire ou département chargé du contrôle des fluides de forage et de la gestion environnementale)

Soda ash :carbonate de sodium(Na_2CO_3)

Caustic soda: soude caustique Na_2CO_3

PAC-LV :Cellulose polyanionique à faible viscosité

KCl = Chlorure de potassium

NaCl = Chlorure de sodium

Tables des figures

FIGURE II.1: Représentation d'un densimètre de type analogique	22
Figure II.2 : Illustration d'un viscosimètre électrique à lecture directe	23
Figure II.3 : Équipement de test API – Filtre à pression.....	26
Figure II.4: une image représente de lubricitytester.....	27
Figure II.5 : PH-mètre électronique	30
Figure III.1 : Représentation graphique de l'évolution du filtrat de la boue HPWBM en fonction du temps de vieillissement.....	38
Figure III.2 : Histogramme qui représente Variation du coefficient de friction de la boue HPWBM après vieillissement thermique.....	39
FigureIII.3 : Variation du pH de la boue HPWBM au cours du vieillissement thermique.....	40
FigureIII.4 : Évolution des indicateurs d'alcalinité PF et MF de la boue HPWBM avant et après exposition thermique prolongée.....	42

LISTES DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Tableau récapitulatif des types de boues et leurs utilisations.....	4
Tableau I.2 : Comparaison des caractéristiques des boues WBM et HPWBM	17
Tableau II.1 : Formulation de la boue de forage préparée.....	20
Tableau III.1: Tableau : Évolution de la densité de la boue HPWBM au cours du vieillissement thermique	34
Tableau III.2 : Synthèse des valeurs de PV et YP obtenues lors des essais.....	35
Tableau III.3 : Évolution des valeurs de Gel et de LSR suite au vieillissement.....	36
Tableau III.4 : Évolution du volume de filtrat API de la boue HPWBM au cours du vieillissement thermique	37
Tableau III.5: Les taux de KCl mesurés au sein de la boue HPWBM.....	41
Tableau III.6. : Évolution de la concentration en ions Ca^{2+} dans la boue HPWBM au fil du temps.....	43
Tableau III.7 : Résultats du test MBT appliqué à la boue HPWBM	45
Tableau III.8: Paramètres de la boue relevés dans le report de Sonatrach.....	46

Introduction générale

Introduction générale

Le forage des puits, qu'il s'agisse de l'extraction des hydrocarbures, de la recherche d'eau ou d'études géotechniques, repose sur des procédés techniques sophistiqués, nécessite l'utilisation de fluide de forage, communément appelé boue de forage. Ce fluide, loin d'être un simple liquide, est une formulation complexe composée d'une phase liquide (eau ou bien huile) et de matériaux solides et d'additifs chimiques, destinée à remplir plusieurs fonctions essentielles : remonter les déblais, stabiliser les parois du puits, refroidir le trépan, lubrifier les équipements et contrôler les pressions souterraines.[1]

Avec la profondeur croissante des forages et la complexité des formations géologiques rencontrées, les formulations de boues ont considérablement évolué. De mélanges simples à base d'eau et d'argile, on est passé à des boues performantes intégrant des polymères, des inhibiteurs, voire des huiles et des composés synthétiques, capables de répondre aux exigences des forages modernes.

Cependant, l'utilisation massive de boues de forage pose aujourd'hui de réels défis environnementaux et économiques. Une partie importante de ces boues est souvent perdue, rejetée ou dégradée au cours des opérations de forage, ce qui soulève des enjeux liés à la pollution, à la gestion des déchets, et au coût élevé de remplacement des fluides. Face à cette problématique, la recherche s'oriente vers le traitement, le recyclage et la réutilisation des boues usées, dans le but de réduire leur impact écologique tout en maîtrisant les dépenses opérationnelles [2]

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail, réalisé dans le cadre d'un stage pratique effectué au sein de la Division Forage de la Société Nationale des Hydrocarbures SONATRACH, à Hassi Messaoud. Cette entreprise, fleuron de l'économie algérienne et première compagnie pétrolière du continent africain, utilise dans certains de ses puits une boue de nouvelle génération : Boue de forage à base d'eau haute performance (HPWBM). Formulée à base de polymères, cette boue combine performance technique et respect des normes environnementales les plus strictes. [3]

Toutefois, en raison de son coût élevé, lié à sa composition riche en additifs spécialisés, la question de sa réutilisation se pose avec acuité. L'objectif principal de ce mémoire est donc d'étudier la faisabilité de la réutilisation de la boue HPWBM, à travers une analyse

Introduction générale

expérimentale réalisée en laboratoire et une comparaison avec une boue réelle utilisée puis stockée par SONATRACH.

Pour cela, une formulation de boue HPWBM a été préparée en laboratoire, soumise à des tests physiques et chimiques après vieillissement thermique, et comparée aux caractéristiques d'une boue similaire ayant été utilisée en forage, puis conservée pendant une année. Cette étude vise à évaluer les performances techniques, la stabilité chimique et les perspectives de réutilisation de cette boue dans des conditions opérationnelles réelles, en tenant compte des contraintes environnementales et économiques.

Dans ce mémoire, le premier chapitre est consacré aux généralités relatives au forage et aux boues de forage. Le deuxième chapitre traite de la méthode de préparation de la boue ainsi que des équipements utilisés pour les différents tests. Enfin, le troisième chapitre présente et analyse les résultats obtenus à l'issue des essais réalisés.

À travers cette démarche, ce travail ambitionne de fournir une évaluation complète de la réutilisation de la boue high performance a base d'eau et de proposer des recommandations pratiques susceptibles d'être appliquées dans les futures opérations de forage .

Chapitre I : synthèse bibliographique

Introduction

Dans le domaine du forage pétrolier et gazier, l'utilisation des boues de forage est essentielle au bon déroulement des opérations. Ces fluides, appelés également "drilling muds", remplissent plusieurs fonctions techniques cruciales : refroidissement et lubrification de l'outil, transport des débris de forage, maintien de la pression dans le puits, et stabilisation des parois. Leur efficacité conditionne directement la sécurité, la performance et le coût des travaux de forage.

Il existe plusieurs types de boues, principalement classés selon la nature de leur fluide de base : les boues à base d'eau (WBM), les boues à base d'huile (OBM), les boues synthétiques (SBM), les boues pneumatiques ainsi que les High-Performance Water-Based Muds (HPWBM). Chacune de ces catégories présente des avantages et des limites en fonction du contexte géologique, environnemental et économique du forage.

I.1. Généralités sur les boues de forages

I.1.1.Définition

Les boues de forage (ou *drilling muds* en anglais) sont des fluides complexes utilisés dans les opérations de forage de puits (pétroliers, gaziers, géothermiques ou hydrogéologiques). Ce sont des mélanges constitués principalement d'un fluide de base (eau, huile ou fluide synthétique), d'agents solides (comme l'argile bentonite) et d'additifs chimiques qui confèrent au fluide des propriétés physiques et chimiques adaptées aux conditions du forage.[4]

I.1.2.Rôle des boues de forage

Les boues de forage (ou fluide de forage) jouent un rôle central dans le succès et la sécurité des opérations de forage, qu'il s'agisse de forages pétroliers, gaziers, géothermiques ou hydrogéologiques. [5]

Les principales actions réalisées par les fluides de forage sont :

Chapitre 01 : synthèse bibliographique

a. Nettoyage du fond du puits

La boue de forage remonte les débris rocheux (cuttings) produits par le trépan jusqu'à la surface. Cela permet d'éviter l'accumulation de déblais qui pourraient coincer les outils ou nuire à la progression du creusement.

b. Refroidissement et lubrification

La boue refroidit le trépan et lubrifie la colonne de forage, ce qui réduit l'usure mécanique et prolonge la durée de vie des outils.

c. Contrôle de la pression de formation

En ajustant sa densité, la boue équilibre ou surpasse la pression des formations traversées, empêchant les remontées incontrôlées de fluides (kicks) ou les éruptions (blowouts).

d. Stabilisation du trou

La boue forme un ciment (fine couche filtrante) sur les parois du puits, ce qui empêche l'effondrement du trou et limite les pertes de fluide dans la formation.

e. Suspension des particules

En l'absence de circulation, la boue doit maintenir les débris en suspension pour éviter leur dépôt au fond du puits (fonction de la viscosité et du point de gel).

f. Transmission de données

Dans les systèmes MWD/LWD, la boue sert de milieu de transmission des impulsions (télé-mesure) pour envoyer les données du fond vers la surface.

g. Détection des anomalies

Les variations de débit, pression, ou densité de la boue permettent de détecter des pertes de fluide, des entrées de gaz, ou des instabilités du puits.

1.1.3. Le cycle de vie de la boue de forage :

Le cycle de vie d'une boue de forage commence par sa préparation à partir d'eau, d'additifs et, selon le type, d'huile ou de fluides synthétiques. Elle est ensuite utilisée pendant le forage, où elle circule en continu dans le puits pour remplir ses fonctions techniques (refroidissement, transport des cuttings, maintien de pression...). Au fur et à mesure, la boue se charge en solides et en contaminants, ce qui nécessite des étapes de traitement et de recyclage, via des équipements de contrôle des solides. Enfin, en fin de forage ou lorsqu'elle devient inutilisable, elle est éliminée ou traitée selon des normes environnementales strictes, parfois en étant réutilisée sur d'autres puits [6]

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.
- 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.

1.1.4. Types de boues de forage

Il existe plusieurs types de boues de forage, classées selon la nature de leur fluide de base :

- Les boues à base d'eau (WBM) sont les plus courantes, appréciées pour leur simplicité et leur faible coût.

Chapitre 01 : synthèse bibliographique

- Les boues à base d'huile (OBM), plus performantes, sont utilisées dans des conditions complexes mais présentent un impact environnemental élevé.
- Les boues synthétiques (SBM) en sont une version moins toxique.
- Enfin, les HPWBM représentent une évolution des WBM, combinant haute performance et respect de l'environnement. Des boues pneumatiques, à base d'air ou de mousse, sont aussi utilisées dans certains contextes spécifiques[7].

Tableau I.1 : Tableau récapitulatif des types de boues et leurs utilisations

Type de boue	Fluide de base	Utilisation principale
Boues à base d'eau (WBM)	Eau	Forage général ; bon marché ; écologique
Boues à base d'huile (OBM)	Huile minérale/diesel	Forage profond ; formations argileuses réactives ; lubrification élevée
Boues synthétiques (SBM)	Esters, oléfines, etc.	Alternative moins toxique aux OBM ; offshore ; bonne stabilité thermique
Boues pneumatiques	Air, mousse, azote	Alternative moins toxique aux OBM ; offshore ; bonne stabilité thermique
High performance water based mud	Eau (KCl, glycols, silicates)	Formations argileuses instables ; forage horizontal ou directionnel ; alternative à l'OBM

1.1.4.1 Boues à base d'eau (Water-Based Muds – WBM)

Les boues à base d'eau sont des boues dont la phase continue est l'eau, Éventuellement chargée en NaCl. Elles sont généralement utilisées pour forer les sections supérieures d'un puits. Pendant le forage, les matériaux des formations traverses s'incorporent dans la boue et peuvent ainsi changer sa composition et ses propriétés [7]

Elles se présentent essentiellement comme suit :

- Les boues douces dont la teneur en NaCl ne dépasse pas quelques g/l. Ces boues douces (bentonitiques) sont principalement constituées par une suspension colloïdale d'argiles, plus précisément de la bentonite sodique dans l'eau. La concentration en bentonite varie généralement de 30 à 70 kg/m³ selon le rendement de la bentonite et les caractéristiques de la boue désirées. Cependant, occasionnellement, des traitements supplémentaires pourront être faits avec des phosphates.
- Les boues salées dont la teneur en NaCl peut être comprise entre quelques dizaines deg/l et la saturation. Ces boues sont utilisées pour la traversée des zones salifères pour éviter le cavage et elles sont constituées d'eau, de sel (généralement NaCl), de colloïdes minéraux (attapulgite ou sépiolite), de colloïdes organiques (amidon), d'un fluidifiant minéral ou organique (chaux, soude).

I.1.4.2. Les boues de forage HPWBM

Les boues de forage à base d'eau haute performance (*High-Performance Water-Based Muds*, HPWBM) sont des fluides de forage avancés qui reproduisent de nombreuses qualités des boues à base d'huile telles que l'inhibition des argiles, la lubrification et la stabilité thermique tout en conservant les avantages environnementaux et économiques des systèmes à base d'eau. [8]

I.1.4.3. Boues à base d'huile :

Les boues à base d'huile (OBM) sont des fluides de forage dont la phase continue est une huile minérale, telle que le pétrole brut ou le gasoil, tandis que la phase dispersée est constituée d'eau, pouvant représenter jusqu'à 50 % du volume. Lorsque la phase externe reste majoritairement huileuse (plus de 50 %), on parle de boue à émulsion inverse. Ces boues sont particulièrement efficaces dans les forages profonds et les formations argileuses réactives, grâce à leur excellent pouvoir inhibiteur, leur stabilité thermique élevée et leur faible coefficient de friction. Toutefois, leur usage présente des contraintes environnementales importantes, notamment en raison de leur toxicité potentielle et des défis liés à la gestion des déchets. Pour cette raison, leur emploi est strictement encadré, surtout en milieux sensibles comme les zones offshores. [9]

I.1.4.4. Les boues synthétiques (SBM)

Les boues synthétiques (SBM) sont des boues de forage dont la phase continue est un fluide synthétique, tel que les esters, les oléfines ou les paraffines. Elles constituent une alternative aux boues à base d'huile (OBM), en offrant des performances techniques similaires – notamment une excellente inhibition des argiles, une faible friction, et une bonne stabilité thermique – tout en étant moins toxiques et plus biodégradables. Grâce à leur faible impact environnemental, les SBM sont particulièrement utilisées dans les forages offshore, où la réglementation sur les rejets est stricte. Elles permettent de concilier efficacité opérationnelle et respect des normes environnementales, bien qu'elles restent plus coûteuses que les boues à base d'eau classiques[10].

I.1.4.5. Les boues pneumatiques

Les boues pneumatiques désignent une catégorie particulière de fluides de forage dans lesquels la phase continue n'est pas liquide, mais gazeuse. Elles utilisent de l'air, du gaz (azote) ou de la mousse comme fluide de forage. Ce type de boue est principalement employé dans les formations très perméables ou instables, où l'usage de fluides liquides entraînerait des pertes de circulation importantes. Les boues pneumatiques permettent de réduire la pression hydrostatique dans le puits, évitant ainsi les fractures de la formation. Elles sont également avantageuses pour augmenter la vitesse de forage et limiter les dommages à la formation. Cependant, leur utilisation nécessite un contrôle rigoureux des risques liés aux influx de gaz, ce qui impose des équipements de sécurité adaptés[10].

I.2. Les boues de forage High-Performance Water-Based Muds, HPWBM

Face aux exigences croissantes en matière de performance et de respect de l'environnement, une nouvelle génération de boues a vu le jour : les High-Performance Water-Based Muds (HPWBM). Ces boues à base d'eau améliorée combinent les bénéfices écologiques des WBM avec des propriétés techniques avancées proches de celles des OBM, notamment en termes de stabilité des formations argileuses, de résistance thermique et de lubrification. Leur formulation repose sur l'intégration d'additifs spécialisés comme les inhibiteurs d'argile, les polymères, les glycols et les agents de contrôle de pertes, leur conférant un champ d'application élargi et une adaptabilité aux forages complexes. [11]

I.2.1. Composition chimique et additifs

Les HPWBM sont des boues à base d'eau enrichies avec des additifs performants comme les inhibiteurs d'argile (KCl, glycols), les polymères viscosifiants, les agents anti-filtration et les lubrifiants. Leur formulation vise à stabiliser les formations argileuses, améliorer la portance et limiter les pertes de fluide, tout en conservant une bonne compatibilité environnementale.[11]

a. L'eau :

L'eau constitue la phase continue et le fluide de base dans la formulation des boues de forage à base d'eau (WBM – Water-Based Mud). Elle joue un rôle fondamental en tant que milieu de dispersion des additifs chimiques et des solides, permettant une circulation efficace du fluide dans le puits, ainsi que le transport des débris de forage.

L'eau utilisée peut être douce, salée ou saumâtre, en fonction de sa disponibilité sur site et de sa compatibilité avec les autres composants de la boue. Sa qualité — notamment son pH, sa dureté, sa salinité et la présence éventuelle de contaminants — influence directement la stabilité et la performance du système de boue. Ainsi, elle peut nécessiter un traitement préalable afin d'éliminer ou de neutraliser les impuretés susceptibles d'altérer les propriétés du fluide.[12]

b. Black Heal :

C'est un mélange spécial composé de particules calibrées et d'additifs liquides. Il contient une combinaison exclusive de particules de tailles variées incluant du gilsonite modifié, du glycol et des agents tensioactifs.[13]

Ce produit est conçu pour être utilisé dans tous les systèmes de boues à base d'eau afin de stabiliser et renforcer les formations faibles ou altérées. C'est un produit non toxique et respectueux de l'environnement. Black Heal permet :

- D'inhiber efficacement l'hydratation et le gonflement des argiles réactives et schistes.
- De colmater les micro-fissures grâce à une distribution granulométrique étendue (PSD), ce qui limite la perte de fluide (« *spurt loss* »).
- De stabiliser le puits et renforcer les formations géologiques fragiles.
- D'améliorer la qualité du cake filtrant et de réduire les pertes de fluide, diminuant ainsi le risque de blocage différentiel du train de tiges.

c. E-HIB :

C'est un inhibiteur de schiste à base de polyamine liquide, spécialement conçu pour les systèmes de boues polymères. Il agit en limitant l'absorption d'eau par les argiles réactives et en empêchant leur hydratation.

Le mécanisme d'action repose sur l'intercalation de la polyamine entre les feuillets d'argile, réduisant ainsi l'espace disponible pour les molécules d'eau. Cela prévient le gonflement desschistes et améliore la stabilité des formations argileuses.[13]

Il est essentiel de surveiller l'état des déblais au niveau du tamis de forage (shale shaker) :

- Des déblais secs et compacts indiquent une inhibition efficace.
- Des déblais collants ou agglomérés peuvent révéler une concentration insuffisante d'E-HIB.

Dans ce cas, une concentration initiale supérieure aux recommandations du programme de boue peut être utilisée comme tampon pour compenser la forte consommation lors du forage dans des formations très actives.

d. BU Latex

C'est une solution aqueuse contenant du latex styrène-butadiène, spécifiquement formulée pour être utilisée dans les systèmes de fluides de forage à base d'eau. Cet additif agit comme agent d'étanchéité de paroi du puits, en formant une membrane semi-perméable à l'interface avec la formation rocheuse.[4]

Le rôle de cet additif est :

- La membrane semi-perméable formée à la surface du schiste améliore l'efficacité osmotique et réduit la transmission de pression vers la formation.
- Elle colmate mécaniquement les micro-fractures présentes dans les schistes et diminue la pression dans la matrice de la roche, contribuant ainsi à :
 - Stabiliser et renforcer le puits,
 - Réduire le lessivage (washout),
 - Limiter les pertes instantanées de fluide (spurt loss),

Chapitre 01 : synthèse bibliographique

- Améliorer la qualité du cake de filtration (texture et compaction),
- Protéger la boue de forage et le cake contre les contaminants (solides forés, impuretés...).

e. La bentonite :

La bentonite est une argile riche en montmorillonite, connue pour sa grande capacité de gonflement et d'absorption d'eau. Elle peut être sodique, calcique ou activée, selon sa composition et son traitement. Sa formule chimique varie, incluant principalement la silice, l'alumine et des oxydes de fer, de magnésium, de calcium ou de sodium.[4]

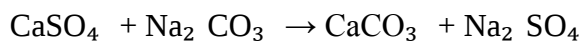
Elle est largement utilisée dans les boues de forage pétrolier pour :

- améliore la viscosité du fluide, ce qui facilite le transport des débris, la suspension des solides et la stabilité du forage.
- La bentonite dans les boues de forage forme un cake filtrant qui stabilise les parois du puits, réduit les pertes de fluide et empêche l'effondrement des formations fragiles.
- la bentonite assure la lubrification des outils et leur refroidissement pendant l'opération de forage.

f. Carbonate de sodium (Soda Ash) :

Le Soda Ash est un additif utilisé dans les boues de forage à base d'eau pour réduire la dureté calcique de l'eau de préparation et traiter les contaminations calciques (comme le gypse ou l'anhydrite) pendant le forage .[4]

Il agit en précipitant le calcium soluble en carbonate de calcium insoluble, selon la réaction suivante :



g. Soude caustique (NaOH) :

La soude caustique, sous forme de poudre ou de perles blanches, est un agent fortement alcalin (pH = 14) utilisé dans les boues de forage à base d'eau pour augmenter l'alcalinité, réduire la dureté de l'eau **et** améliorer le rendement de l'argile bentonitique. Elle précipite les ions calcium et magnésium sous forme d'hydroxydes insolubles, ce qui améliore l'efficacité

Chapitre 01 : synthèse bibliographique

des polymères, des amidons et des additifs organiques, tout en limitant la corrosion dans le système. [4]

h.Le Polytrex :

Le Polytrex est un polymère synthétique appartenant à la famille des copolymères modifiés à base d'acrylamide, largement utilisé dans la formulation des boues de forage à base d'eau (WBM ; HPWBM). Ce produit est spécialement conçu pour améliorer les propriétés rhéologiques du fluide de forage, en assurant une bonne portance des cuttings, une réduction efficace de la filtration, ainsi qu'une stabilisation des formations argileuses, limitant leur gonflement et leur dispersion. Grâce à sa grande efficacité à faibles concentrations, sa résistance à la salinité et sa stabilité en conditions thermiques modérées, le Polytrex est particulièrement adapté aux opérations de forage complexes et aux environnements géologiques instables. [4]

Ce produit joue un rôle essentiel dans :

- Le contrôle de la viscosité, en maintenant une bonne portance des cuttings (débris de forage) ;
- La stabilisation des formations argileuses, en limitant leur gonflement et leur dispersion ;
- La réduction de la perte de filtration, en formant un cake de boue de qualité sur les parois du puits ;
- L'encapsulation des particules, ce qui évite leur désintégration dans le fluide ;

h. Cellulose polyanionique à faible viscosité (PAC-LV)

Le PAC-LV est un polymère anionique dérivé de la cellulose. Grâce à sa faible viscosité, il permet de former un cake mince et peu perméable sur les parois du puits sans épaissir excessivement la boue, ce qui en fait un additif idéal pour les systèmes nécessitant un bon contrôle de filtration sans altération des propriétés rhéologiques. Le PAC-LV est également compatible avec les milieux salins (chlorures, potassium, calcium), efficace dans une large gamme de pH, et présente l'avantage d'être biodégradable, non toxique et respectueux de l'environnement, répondant ainsi aux exigences des normes environnementales en vigueur dans l'industrie pétrolière.[4]

Les fonctions principales du PAC-LV :

Chapitre 01 : synthèse bibliographique

- Réduction de la perte de filtration : il forme un cake mince et peu perméable sur les parois du puits, limitant les pertes de fluide dans la formation.
- Stabilisation du puits : en réduisant les infiltrations de fluide, il contribue à la stabilité des formations fragiles ou perméables.
- Effet minime sur la viscosité : contrairement au PAC-R (Regular), le PAC-LV n'épaissit pas significativement la boue, ce qui permet de contrôler la filtration sans augmenter la viscosité.

J .Le xanthan :

Le xanthan (ou xanthane) est un polymère naturel de haute masse moléculaire, obtenu par fermentation bactérienne, généralement à partir de *Xanthomonas campestris*. Utilisé principalement comme agent viscosifiant dans les boues de forage à base d'eau (WBM), il permet d'améliorer la portance des cuttings et la stabilité des solides en suspension. Le xanthan se distingue par son efficacité à faible concentration, sa grande stabilité thermique, sa résistance au cisaillement, ainsi que sa compatibilité avec une large gamme de pH et la présence de sels ou de contaminants. Il peut être combiné sans problème avec d'autres additifs tels que le PAC, le Polytrex ou la bentonite, ce qui en fait un composant essentiel dans les formulations de boues haute performance (HPWBM) .[4]

Les fonctions principales du xanthan sont:

- Augmenter la viscosité du fluide, en particulier à basse vitesse de cisaillement, ce qui améliore la capacité de suspension des cuttings et leur remontée en surface.
- Stabiliser les solides en suspension, même en cas d'arrêt de la circulation.
- Améliorer la performance en forages directionnels ou horizontaux, où le transport des déblais est plus difficile.

k. Desco Deflocculant :

Le Desco Deflocculant est un additif en poudre à base de tannin, utilisé dans les boues de forage à base d'eau pour le contrôle de la rhéologie. Il est particulièrement efficace dans les environnements de forage profonds et à haute température (jusqu'à 204 °C), où il agit sans nécessiter l'activation par la soude caustique.[4]

Les fonctions principales du Desco Deflocculant :

Chapitre 01 : synthèse bibliographique

- Défloculation des particules solides : réduit la force de cisaillement et la viscosité à faible concentration.
- Stabilité thermique élevée : conserve son efficacité à des températures où les défloquants à base de lignosulfonates se dégradent.
- Polyvalence chimique : reste actif indépendamment du pH, de la salinité ou de la dureté de la boue.
- Protection du système de forage : agit comme inhibiteur de corrosion, antioxydant et limite les effets de la contamination au ciment.
- Applications secondaires: peut servir d'anti mousse dans les boues salines et de fluide de préflush avant cimentation.

L .Le Lubricant « LUB » :

Le LUB est un additif lubrifiant couramment utilisé dans les boues de forage à base d'eau (WBM). Son rôle principal est de réduire les frottements entre les équipements de forage (tiges, trépan) et les parois du puits, ce qui permet de faciliter la progression du forage et de limiter l'usure mécanique.[13]

Le LUB présente plusieurs caractéristiques avantageuses :

- Il est totalement compatible avec les formulations à base d'eau ;
- Il est formulé à partir de composés biodégradables et non toxiques, conformes aux normes environnementales et de sécurité (HSE) ;
- Il reste stable et efficace à des températures modérées à élevées.

Les fonctions principales du LUB sont :

- Réduction du couple de rotation et du torque, en particulier dans les forages directionnels ou complexes.
- Diminution de l'usure mécanique des outils, prolongeant ainsi leur durée de vie.
- Prévention du collage différentiel (*differential sticking*), phénomène fréquent en milieux perméables.
- Amélioration du nettoyage du puits, en facilitant la circulation et le transport des cuttings

.

m. La Barite «BAR »:

Le BAR désigne la barytine, un sulfate de baryum (BaSO_4) naturellement dense, largement utilisé comme agent de pondération dans les boues de forage. Grâce à sa densité élevée (environ $4,2 \text{ g/cm}^3$), le BAR permet d'augmenter efficacement la densité du fluide de forage, ce qui est essentiel pour équilibrer la pression des formations souterraines, prévenir les éruptions (blowouts) et assurer la stabilité du puits.[4]

Le BAR présente plusieurs avantages techniques :

- Il est chimiquement inerte, ce qui garantit une bonne compatibilité avec les autres additifs de la boue.
- Sa granulométrie contrôlée permet de limiter l'abrasion des équipements et de réduire les risques de sédimentation.
- Il peut être utilisé aussi bien dans les boues à base d'eau (WBM) que dans les boues à base d'huile (OBM), ce qui en fait un additif polyvalent et indispensable dans la formulation des boues de forage.

n. Le chlorure de sodium NaCl

Le NaCl est un sel minéral cristallin hautement soluble dans l'eau, largement utilisé dans la formulation des boues de forage à base d'eau (WBM). Il est principalement employé pour ses propriétés inhibitrices et stabilisantes, notamment vis-à-vis des formations argileuses sensibles.

Le NaCl agit en réduisant le gonflement et la dispersion des argiles (comme la montmorillonite), ce qui contribue à stabiliser les parois du puits et à prévenir les problèmes liés à l'hydratation des shales. Il est également compatible avec de nombreux polymères utilisés dans les boues, tels que le PAC ou le xanthan, et peut être utilisé en solution saturée dans des environnements particulièrement réactifs. Grâce à sa disponibilité, son efficacité et son faible coût, le NaCl reste un additif de base incontournable dans les formulations de boues inhibitrices. .[4]

Les fonctions principales du NaCl :

- Inhibition des argiles hydratables, notamment les smectites (comme la montmorillonite), en limitant leur gonflement et leur dispersion dans le fluide.
- Stabilisation des formations sensibles, en réduisant les interactions eau-argile.
- Amélioration de la qualité du cake de boue, en diminuant la perméabilité et la perte de fluide.
- Réduction de la floculation des solides dans certaines conditions, en régulant la salinité du système.

o.Le chlorure de potassium KCl :

Le KCl est un sel minéral couramment utilisé comme inhibiteur d'argiles dans les boues de forage à base d'eau (WBM). Il est particulièrement efficace pour stabiliser les formations argileuses, notamment celles riches en smectite (montmorillonite), en réduisant leur gonflement et leur dispersion. [14]

Les fonctions principales du KCl :

- Inhibition de l'hydratation des argiles : le potassium (K^+) se fixe entre les feuillets des argiles, empêchant leur expansion.
- Prévention de l'instabilité des shales : particulièrement utile dans les formations sensibles aux interactions eau-argile.
- Amélioration de la qualité du cake de boue et réduction de la perte de fluide.
- Compatible avec d'autres inhibiteurs et polymères comme le PAC, le xanthan, et le Polytrex.

I.2.2. Caractéristiques principales

Les boues HPWBM se distinguent par leurs propriétés avancées qui leur permettent d'assurer une excellente stabilité en forage. Elles présentent une forte capacité d'inhibition des argiles, une bonne lubrification, une résistance thermique améliorée et un faible impact environnemental. Grâce à une formulation optimisée en additifs, elles offrent des performances proches des boues à base d'huile tout en conservant la sécurité et la simplicité des systèmes à base d'eau[15].

- Stabilité thermique élevée : jusqu'à 180 °C, adaptée aux environnements HPHT (haute pression, haute température).
- Excellente inhibition des argiles, offrant une stabilité du puits équivalente aux boues à l'huile.
- Lubrification améliorée, réduisant le couple et les frottements dans les forages horizontaux ou déviés.
- Transport efficace des cuttings et taux de pénétration (ROP) élevés.
- Faible perte de fluide, grâce à la formation d'un cake de filtration de qualité.
- Conformité environnementale : possibilité de rejet direct dans certains cas, avec peu de risques.

I.2.3. Rôle des boues HPWBM

Les HPWBM sont conçues pour allier les avantages écologiques des boues à base d'eau (WBM) à des performances techniques proches de celles des boues à base d'huile (OBM). Leurs rôles principaux sont : [16]

1. Stabilisation des formations argileuses : Elles forment une barrière protectrice à la surface des schistes, réduisant leur gonflement et dispersion (shale inhibition) – ce qui permet de maintenir l'intégrité du puits.
2. Réduction des émissions environnementales : Contrairement aux OBM, les HPWBM émettent moins de composés organiques volatils (COV) et sont plus faciles à traiter et recycler.
3. Amélioration de l'efficacité de forage : Elles augmentent le taux de pénétration (ROP) tout en maintenant une bonne performance de nettoyage du puits.
4. Réduction des coûts opérationnels : Moins coûteuses à éliminer et plus faciles à gérer sur site que les OBM, elles permettent une économie notable en termes de logistique et de traitement.
5. Compatibilité avec les outils de diagraphie : Elles n'interfèrent pas avec les outils LWD/MWD (Logging While Drilling / Measurement While Drilling), contrairement aux OBM qui atténuent les signaux.

I.2.4.Types de puits adaptés à l'utilisation des HPWBM :

Les High-Performance Water-Based Muds (HPWBM) peuvent être utilisées dans plusieurs types de puits, en particulier ceux où les contraintes environnementales, géotechniques ou économiques interdisent ou limitent l'usage de boues à base d'huile (OBM). [17]

Les types de puits dans lesquels les HPWBM sont les plus adaptées sont :

- **Puits en formations argileuses instables (schistes réactifs)**
 - Exemple : puits traversant les formations argileuses sensibles à l'eau (type *shale*).
 - Raison : les HPWBM inhibent le gonflement et la dispersion des argiles.
- **Puits terrestres (onshore) dans des zones écologiquement sensibles**
 - Exemple : forages proches des zones protégées, nappes phréatiques, zones agricoles.
 - Raison : HPWBM sont moins polluantes et plus faciles à traiter sur site.
- **Puits horizontaux et déviés**
 - Exemple : forages horizontaux en shale gas ou oil, ou puits multilatéraux.
 - Raison : bonne performance de lubrification et nettoyage du puits, similaire aux OBM.
- **Puits d'exploration ou de développement peu profond à moyennement profond**
 - Profondeurs : typiquement jusqu'à ~4000 m selon la formulation.
 - Raison : propriétés thermiques et inhibitrices suffisantes pour une large gamme de conditions de forage.
- **Puits en zones à réglementation stricte (offshore ou onshore)**
 - Exemple : zones européennes ou nord-américaines avec interdiction des OBM.
 - Raison : conformité avec les normes HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement).

I.2.5.Domaines d'application

Les HPWBM sont utilisées dans les forages horizontaux, directionnels, en formations argileuses instables et en zones écologiquement sensibles, offrant une alternative performante et moins polluante aux boues à base d'huile[18].

- Formations argileuses réactives, où le gonflement pose problème.
- Puits HPHT, à haute pression et température.

Chapitre 01 : synthèse bibliographique

- Forages horizontaux, directionnels, à grande portée, nécessitant une bonne lubrification.
- Zones écologiquement sensibles, où les boues à base d'huile sont interdites.

I.2.6. La comparaison entre HPWBM et WBM

La principale différence entre les boues aqueuses (WBM) et les boues aqueuses hautes performances (HPWBM) réside dans leur formulation et leurs caractéristiques de performance. Ces différences sont présentées dans le tableau suivant : [19].

Tableau I.2 : Comparaison des caractéristiques des boues WBM et HPWBM

Caractéristique	Boues WBM classiques	HPWBM
Inhibition des argiles	Modérée (KCl uniquement)	Excellente (polymères + sels)
Stabilité thermique	Jusqu'à ~120 °C	Jusqu'à ~180 °C
Lubrification	Faible	Bonne à excellente (avec lubrifiants)
Contrôle de la filtration	Basique	Avancé
Performance ROP	Moyenne	Optimisée
Impact environnemental	Faible	Très faible (similaire aux boues à base d'eau)

I.2.7. Les avantages et les inconvénients

Les boues de forage haute performance à base d'eau (HPWBM) présentent à la fois des avantages et des inconvénients. Elles peuvent offrir de bonnes performances dans certaines situations, mais ne sont pas toujours la solution idéale. Comme pour toute technologie, il est important de prendre en compte les points positifs et négatifs avant de faire un choix. [20]

Les avantages du HPWBM

- Réduction de l'utilisation de fluides de forage et de la production de déchets
- Lubrification améliorée du puits et ROP accru
- Réduction du temps et des coûts de forage

Chapitre 01 : synthèse bibliographique

- Réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂
- Excellente inhibition et lubrification du schiste
- Compatible avec l'eau produite
- Durable, efficace et respectueux de l'environnement
- Additifs préférés pour les puits non conventionnels et à portée étendue

Les inconvénients des HPWBM

- Coût plus élevé que les boues à base d'eau classiques (WBM)
- Formulation complexe nécessitant une expertise technique
- Sensibilité accrue à la contamination par les solides ou les ions
- Lubrification parfois inférieure à celle des boues à base d'huile (OBM)
- Moindre tolérance aux conditions extrêmes de pression et de température (comparé aux OBM)
- Nécessité d'un suivi rigoureux des propriétés du fluide sur le terrain
- Possibilité de performance réduite en cas de mauvaise gestion des additifs

Conclusion

Les boues de forage jouent un rôle fondamental dans la réussite des opérations de forage pétrolier et gazier. À travers leur diversité de formulation – eau, huile, fluides synthétiques ou gaz elles permettent d'adapter les conditions de forage à une grande variété d'environnements géologiques.

Introduction :

Dans le cadre du stage pratique effectué au sein du laboratoire EMEC, nous avons eu l'opportunité de travailler sur la formulation et l'évaluation d'une boue de forage à base d'eau dite HPWBM (*High Performance Water-Based Mud*). Cette boue a été spécialement conçue à partir de composants sélectionnés pour leur résistance aux hautes températures, en vue de répondre aux exigences des forages profonds et complexes.

L'objectif principal de ce travail a été de préparer cette boue en laboratoire, puis la soumettre à une série de tests physiques et chimiques normalisés (densité, viscosité, filtrat API, stabilité thermique, lubrlicité, etc.) afin d'évaluer ses performances et sa durabilité dans le temps. Ces analyses ont été effectuées avant et après vieillissement thermique, dans le but de simuler les conditions réelles du fond de puits. Dans ce chapitre nous décrivons le processus de formulation de la boue, mode d'échantillonnage ainsi que les différents tests effectués.

II.1. Préparation de la boue de forage selon la formulation donnée

La préparation de cette boue de forage à base d'eau (WBM) débute par l'ajout de 0,581 m³ d'eau par m³ de boue finale dans le réservoir de mélange. L'eau est d'abord conditionnée par l'ajout de 0,72 kg/m³ de SODA ASH (carbonate de sodium) pour précipiter les ions calcium et ajuster la dureté. Ensuite, 1,72 kg/m³ de soude caustique (NaOH) est introduit pour ajuster le pH à un niveau optimal favorisant la dispersion des argiles et des polymères.

Une fois l'eau conditionnée, on procède à l'hydratation de la bentonite en y ajoutant progressivement 15 kg/m³, en maintenant une agitation continue pour assurer une bonne dispersion. Après une période d'hydratation suffisante, on incorpore les polymères : 14 kg/m³ de Polytrex, 2,15 kg/m³ de PAC LV, et 0,9 kg/m³ de gomme de xanthane, qui permettent d'optimiser la viscosité, la suspension des solides et la stabilité du fluide.

Par la suite, on ajoute les inhibiteurs : 60 kg/m³ de KCl, 149,63 kg/m³ de NaCl et 30 kg/m³ d'EMEC HIB afin de limiter l'hydratation des argiles et de stabiliser les formations sensibles. Le Black Heal (11 kg/m³) est incorporé comme agent de colmatage, suivi de 5,25 kg/m³ de BU Latex, qui forme une membrane semi-perméable pour renforcer le cake filtrant.

chapitre II : Matériels et méthodes

L'agent de pondération EMEC BAR est ajouté à raison de 1165 kg/m³ pour atteindre la densité souhaitée, en veillant à maintenir une agitation homogène pour éviter toute sédimentation. Enfin, 4,3 kg/m³ de DESCO sont incorporés pour améliorer la lubrification et réduire le couple et le torque pendant le forage.

Tableau II.1 : Formulation de la boue de forage préparée

Composé	Unité	Quantité (kg)
Eau	Kg/m ³	581
SODA ASH	Kg/m ³	0,72
CAUSTIC SODA	Kg/m ³	1,72
BENTONITE	Kg/m ³	15
POLYTREX	Kg/m ³	14
EMEC PAC LV	Kg/m ³	2,15
XANTHAN GUM	Kg/m ³	0,9
BLACK HEAL	Kg/m ³	11
EMEC BU LATEX	Kg/m ³	5,25
EMEC HIB	Kg/m ³	30
EMEC BAR	Kg/m ³	1165
KCl	Kg/m ³	60
DESCO	Kg/m ³	4,3
NaCl	Kg/m ³	149,628

II.2.Mode d'échantillonnage

Dans le but de la réalisation une étude représentative, la boue a été répartie en quatre cellules distinctes, puis placée dans un Hot Rolling à 250 °C afin de simuler les conditions thermiques du fond de puits. Une cellule a été retirée tous les trois jours, et les mêmes tests physiques et chimiques ont été répétés pour évaluer l'évolution des propriétés de la boue dans le temps, en particulier sa stabilité thermique et sa performance en conditions prolongées.

Après la préparation de cette boue, des analyses physiques et chimiques ont été réalisées pour déterminer ses caractéristiques initiales.

II.3.Utilisation de la boue

La boue HPWBM formulée dans cette étude est principalement destinée à la phase de forage en diamètre 16'', caractérisée par un important volume de consommation et le franchissement de plusieurs formations géologiques hétérogènes. Cette phase initiale du forage requiert une boue présentant une bonne stabilité physique et chimique, d'où le recours à une formulation bentonitique renforcée. En revanche, dans les phases plus profondes, notamment à l'approche du réservoir, l'utilisation de cette même boue devient inadaptée. En effet, les polymères constitutifs de la HPWBM peuvent subir une dégradation thermique significative sous l'effet des hautes températures, compromettant ainsi les propriétés rhéologiques et la stabilité de la boue. Par conséquent, des formulations spécifiques, thermorésistantes, sont privilégiées dans les sections profondes du puits.

II.4.Analyses physiques et chimiques des caractéristiques de la boue

II.4.1.Analyse physique

II.4.1.1. Mesure de la densité de la boue HPWBM

1. Principe de fonctionnement :

Le densimètre, de type analogue à la balance romaine, est un appareil utilisé pour mesurer la densité (ou le poids volumique) des boues de forage. Il est conçu pour une utilisation sur le chantier et couvre une plage de densité allant de 0,95 à 2,20.



Figure II.1 : Densimètre analogique de marque STDE

2. Mode opératoire :

- Remplir complètement le godet avec la boue à analyser ;
- Fermer hermétiquement avec le couvercle et laisser l'excédent de fluide s'échapper par l'orifice central prévu à cet effet ;
- Nettoyer soigneusement l'extérieur avec de l'eau, en maintenant l'orifice du couvercle obstrué durant cette étape ;
- Placer les couteaux du bras sur le support prévu à cet effet sur le socle ;
- Faire coulisser le curseur le long du bras jusqu'à atteindre l'équilibre horizontal, vérifié à l'aide du niveau à bulle intégré ;
- Lire directement la densité sur l'échelle graduée au niveau de la position du curseur.

II.4.1.2. Les paramètres de la rhéologie

Les paramètres rhéologiques d'une boue de forage, en particulier la viscosité plastique (PV) et le point d'écoulement ou Yield Point (YP), sont essentiels pour évaluer sa capacité à transporter les déblais de forage, à assurer une bonne circulation dans le puits, et à maintenir la stabilité du trou. Ces paramètres reflètent la structure interne de la boue et l'état de dispersion de ses solides.

1. Équipements nécessaires :

- 1.1. Viscosimètre à lecture directe, alimenté électriquement.
- 1.2. Chronomètre pour le contrôle des temps de repos.
- 1.3. Coupe viscosimétrique thermostatique (thermocup) permettant de chauffer le fluide au-dessus de la température ambiante.
- 1.4. Thermomètre avec une plage de mesure de 0 °C à 105 °C (32 °F à 220 °F), précision : ± 1



Figure II.2 : *Illustration d'un viscosimètre électrique à lecture directe*

2. procédure de mesure :

a) Préparation de l'échantillon :

- Verser le fluide de forage dans la thermocup en laissant un vide de 50 à 100 ml pour compenser le déplacement du fluide par le manchon et le rotor ;
- Immerger le manchon du rotor jusqu'à la ligne de repère ;
- Réaliser les mesures rapidement après le prélèvement ;
- La température du test doit être de 50 ± 1 °C (120 ± 2 °F) ou 65 ± 1 °C (150 ± 2 °F) pour les comparaisons de référence ;
- Des essais à basse température (ex. : 4 ± 1 °C ou 40 ± 2 °F) peuvent être effectués pour évaluer le comportement à froid ;
- Mentionner le lieu de prélèvement dans le rapport.

La température maximale de fonctionnement recommandée est de **90 °C (190 °F)**. Au-delà, un bob en métal massif est requis pour éviter l'explosion due à la vaporisation des fluides internes.

chapitre II : Matériels et méthodes

b) Mise en température

- Chauffer ou refroidir l'échantillon tout en le cisillant à 600 ou 300 tr/min pour garantir une température homogène ;
- Une fois la température cible atteinte, insérer le thermomètre pour vérification, puis enregistrer la température.

c) Mesure des lectures :

- À 600 tr/min, attendre la stabilisation de l'aiguille, puis noter R600 ;
- Réduire à 300 tr/min, attendre une nouvelle stabilisation, puis noter R300 ;
- D'autres lectures peuvent être réalisées : R200, R100, R60, R30, R6, R3 (dans l'ordre décroissant de vitesse).

d) Mesure de la force de gel à 10 secondes :

- Arrêter le rotor et laisser reposer l'échantillon 10 secondes ;
- Redémarrer le rotor à 3 tr/min et noter la lecture maximale comme force de gel initiale (10s), exprimée en lbf/100 ft².

e) Mesure de la force de gel à 10 minutes :

- Agiter à 600 tr/min, puis arrêter et laisser reposer 10 minutes ;
- Reprendre la mesure à 3 tr/min comme précédemment et noter la valeur obtenue comme force de gel à 10 minutes.

Remarques :

- Les lectures du cadran sont exprimées en degrés de déviation (1/360 de tour) ;
- $1^\circ = 0,511 \text{ Pa (SI) ou } 1,067 \text{ lbf/100 ft}^2 \text{ (USC)}$;
- Pour simplifier sur le terrain, la conversion en pascals se fait souvent en divisant la lecture par 2 ;
- 1 tr/min correspond à un taux de cisaillement de $1,7023 \text{ s}^{-1}$.

3. Calculs :

3.1. Définition de la viscosité :

- Viscosité (en cP ou mPa·s) = contrainte de cisaillement / taux de cisaillement ;
- À 300 tr/min (511 s^{-1}), les degrés de déviation représentent directement la viscosité en cP.

3.2. Viscosité plastique (PV) :

Formule de calcul :

$$PV = R600 - R300$$

- PV : viscosité plastique (en cP ou mPa·s) ;
- R600, R300 : lectures du cadran à 600 et 300 tr/min.

3.3. Limite d'élasticité en unités USC (YP) :

$$YP = R300 - PV$$

YP en lbf/100 ft².

- Approximation basée sur les lectures en degrés de déviation.

II.4.1.2 Test de Filtrat Basse Température / Basse Pression (LT/LP)

Le test de Filtrat LT/LP évalue la capacité d'une boue de forage à limiter les pertes de liquide à basse pression et température. Il mesure le volume de filtrat et l'épaisseur du cake formé, permettant ainsi d'estimer l'efficacité de la boue à protéger la formation et à stabiliser le puits.

Équipement requis :

- Filtre-presse : Cellule cylindrique ($\varnothing$ 76,2 mm, hauteur $\geq$ 64 mm) ;
- Minuterie : Électronique ou mécanique (minimum 30 minutes) ;
- Éprouvette graduée : 10 ml ou 25 ml ;
- Règle millimétrée : Pour mesurer l'épaisseur du gâteau de filtration.



Figure II.3 : Équipement de test API – Filtre à pression

Procédure :

- Mesure de la température:
Relever la température initiale de l'échantillon de fluide de forage (°C).
- 1. Préparation de la cellule :
 - Vérifier que tous les composants sont propres et en bon état, en particulier les joints et le tamis ;
 - Assembler la cellule dans l'ordre suivant ;
Joint → Tamis → Papier filtre → Joint d'étanchéité → Cellule.
 - Verser le fluide jusqu'à 12 mm du bord supérieur.
- 2. Lancement du test :
 - Placer une éprouvette propre sous le tube de sortie ;
 - Fermer la soupape de vidange ;
 - Appliquer une pression de 690 ± 35 kPa (100 ± 5 psi) en moins de 30 secondes ;
 - Démarrer le chronomètre pour 30 minutes dès application de la pression.
- 3. Mesure du filtrat :
 - À la fin des 30 min, mesurer le volume de filtrat avec précision (lecture au niveau du ménisque) ;
 - Noter le volume en ml (à 0,1 ml près) et la température initiale du fluide ;
 - Conserver le filtrat pour analyse chimique si nécessaire ;

- Important : Toujours relâcher complètement la pression avant de démonter la cellule.
- 4. Nettoyage et mesure du gâteau :
 - Ouvrir la cellule et jeter le fluide restant sans perturber le gâteau de filtration ;
 - Nettoyer délicatement le gâteau avec un jet d'eau basse pression ;
 - Mesurer l'épaisseur du gâteau (en mm ou 1/32 po) ;
 - Décrire éventuellement son aspect (dur, mou, caoutchouteux, etc.).

II.4.1.3. Le test de lubricité

Le test de lubricité est un essai de laboratoire réalisé sur les boues de forage afin d'évaluer leur capacité à réduire la friction entre les équipements de forage (tiges, trépan...) et les parois du puits. Ce test est particulièrement crucial dans les forages directionnels ou horizontaux, où les contacts solides-solides sont fréquents.

1. Equipement

Ce test s'effectue à l'aide d'un lubricity tester (ou lubricomètre), un appareil spécialement conçu pour mesurer le coefficient de friction entre deux surfaces métalliques en contact, immergées dans la boue. Plus le coefficient est faible, meilleure est la lubricité de la boue.



Figure II.4 : une image représente de lubricity tester

2. Principe de fonctionnement de l'appareil :

L'appareil est composé de :

- Un anneau métallique tournant (ring) ;
- Un bloc métallique fixe (block) ;
- Un moteur électrique qui fait tourner l'anneau à une vitesse constante (en général 60 tr/min) ;
- Un bras de levier avec un poids calibré appliqué sur le bloc ;
- Un système de mesure (cadran ou balance dynamométrique) qui affiche la force de frottement.

II.4.2. Tests Chimiques d'un Fluide de Forage à Base d'Eau

II.4.2.1. Test Phénolphthaléine sur Filtrat (pf)

- But : Déterminer l'alcalinité du filtrat vis-à-vis de la phénolphthaléine.
- Procédure :
 1. Mettre 1 ml de filtrat dans un erlenmeyer de 250 ml ;
 2. Ajouter 25 à 50 ml d'eau distillée ;
 3. Ajouter 4 à 5 gouttes de phénolphthaléine à 1 % ;
 4. Agiter.
- Si aucune coloration rose n'apparaît $\rightarrow$ PF = 0.
- Si coloration rose $\rightarrow$ Titrer avec de l'acide sulfurique N/50 (0.02 N) jusqu'à disparition de la couleur.
 5. Le volume d'acide utilisé = Valeur de PF.

II.4.2.2 .Test Méthylorange sur Filtrat (MF)

- But : Mesurer l'alcalinité totale du filtrat.
- Procédure:
 1. Sur l'échantillon précédent (après le test PF), ajouter 4 à 5 gouttes de méthylorange.

chapitre II : Matériels et méthodes

2. Si la solution vire aujaune, titrer avec H_2SO_4 0.02 N jusqu'à obtention d'un rouge orangé.
3. Le volume total d'acide utilisé (pour PF + MF) = Valeur de MF.

II.4.2.3 .Test Calcium (Ca^{2+})

- But: Dosage des ions calcium dans le filtrat.
- Procédure :
 1. Dans un erlenmeyer, ajouter :
 - 1 ml de filtrat
 - 25 à 50 ml d'eau distillée
 - 20 gouttes de NaOH 5N ($\text{pH} \approx 14$)
 - Une pincée de noir au chrome (indicateur coloré)
 2. Si la solution devient mauve, titrer avec EDTA 0.01 M jusqu'à virage au bleu.
 3. Calcul :

$$[\text{Ca}^{2+}](\text{g/l}) = 40 \times \text{VEDTA} \times 0.01$$

Remarque : Si la couleur mauve n'apparaît pas après ajout de l'indicateur, augmenter le pH avec du NaOH 5N.

II.4.2.4.Test de pH

Le test de pH permet de déterminer l'acidité ou l'alcalinité d'une boue de forage, paramètre essentiel pour le bon fonctionnement des additifs chimiques (comme les polymères, inhibiteurs, agents de contrôle du filtrat, etc.).

Mesure du pH dans le filtrat :

Dans cette méthode, le pH n'est pas mesuré directement dans la boue, mais dans le filtrat obtenu après un test de filtration (LT/LP). Ce filtrat représente la phase aqueuse séparée de la boue. la mesure du pH dans le filtrat Donne une mesure plus stable et précise et Permet d'évaluer le comportement des ions solubles dans la phase liquide.

Procédure :

- Réaliser un test de filtrat basse pression (API).

- Récupérer le liquide clair (filtrat) obtenu après 30 minutes.
- Introduire une électrode de pH dans celiquide
- Lire la valeur sur le pH-mètre.



Figure II.5 : pH-mètre électronique

II.4.2.5.Dosage du Chlorure de Sodium (NaCl)

- Formule de calcul :

$$[\text{NaCl}](\text{g/l}) = 58.5 \times V_{\text{AgNO}_3} \times 0.1$$

Remarques :

- 58.5 : masse molaire du NaCl
- 0.1 : normalité du nitrate d'argent (AgNO_3) utilisé
- Le AgNO_3 N/50 (0.0282 N) est réservé à l'analyse de l'eau.

II.4.2.6.Test de la Concentration en KCl (Potassium)

- Préparation de la solution standard :
 - KCl: 14 g / 100 ml
 - Chaque 0.5 ml équivaut à 10 kg/m³ de KCl
- Solution de précipitation :
 - Perchlorate de sodium : 150 g / 100 ml
- Méthode :
 - Utiliser une centrifugeuse (1800 tr/min).
 - Dans un tube Kolmer (10 ml) :

chapitre II : Matériels et méthodes

1. Mélanger la solution standard de KCl avec de l'eau distillée (jusqu'à 7 ml) ;
2. Ajouter 3 ml de perchlorate de sodium sans agiter ;
3. Préparer un tube témoin avec 10 ml d'eau distillée pour équilibrage.
4. Centrifuger 1 minute et lire le volume du précipité.
- Répéter pour plusieurs concentrations :
 - 0.5 ml $\rightarrow$ 10 kg/m³
 - 1 ml $\rightarrow$ 20 kg/m³
 - ... jusqu'à 3.5 ml $\rightarrow$ 70 kg/m³

Pour l'échantillon réel :

7 ml de filtrat + 3 ml de perchlorate $\rightarrow$ centrifuger $\rightarrow$ lire précipité.

Tracer une courbe d'étalonnage (volume précipité vs concentration) pour déterminer la concentration réelle du filtrat.

II.4.2.7. Test du Bleu de Méthylène (MBT)

- But: Déterminer la capacité d'échange cationique (CEC), liée à la teneur en bentonite.
- Procédure :
 1. Dans un erlenmeyer de 250 ml, ajouter :
 - 2 ml de boue
 - 15 ml d'eau oxygénée à 3 %
 - 0.5 ml (10 gouttes) de H₂SO₄ 5N
 - 50 ml d'eau distillée
 2. Chauffer 10 minutes avec agitation occasionnelle ;
 3. Refroidir sous eau courante ;
 4. Ajouter 0.5 ml de bleu de méthylène (3.2 g/l), agiter 30 s ;
 5. Déposer une goutte sur papier Whatman N°1 ;
 6. Répéter en augmentant le volume de bleu de méthylène (0.5 ml à chaque fois) jusqu'à apparition d'un anneau bleu turquoise persistant après 2 min d'agitation ;
 7. Le volume total de bleu utilisé correspond au point final.
- Calcul :

$$MBT = V_{df} / V_{mb}$$

Bentonite équivalente (ppb) = $5 \times MBT$

Bentonite équivalente (kg/m³) = $14.25 \times MBT$

II.4.2.8. Hot Rolling (roulage à chaud)

Le Hot Rolling est un test thermique effectué en laboratoire pour évaluer la stabilité thermique et la résistance au vieillissement des boues de forage lorsqu'elles sont exposées à des conditions de température élevées, similaires à celles rencontrées en fond de puits.

Principe :

Le fluide de forage est placé dans une cellule fermée (cellule de vieillissement) puis soumis à une température constante (souvent 150 °F à 350 °F, soit 65 à 175 °C) pendant une durée donnée (généralement 16 ou 72 heures), à l'aide d'un four rotatif appelé Hot Rolling Oven.

Fonctionnement :

1. Préparation de la boue selon la formulation souhaitée ;
2. Remplissage de cellules de vieillissement (bombes en acier inoxydable) ;
3. Les cellules sont placées dans le four rotatif ;
4. Le four tourne lentement (environ 20 tours/min) pour simuler l'agitation ;
5. Après la durée définie, on retire les cellules pour analyser les effets de la température sur la boue.

Objectif :

- Observer les changements physiques et chimiques dans la boue après exposition à la chaleur.
- Tester la stabilité des additifs et l'évolution de propriétés comme :
 - Viscosité
 - Densité
 - Filtration
 - Valeurs de pH
 - Réaction des polymères

Conclusion :

Au terme de ce chapitre, consacré la caractérisation et à la préparation de la boue de forage HPWBM (High Performance Water-BasedMud), les résultats obtenus à partir des essais en laboratoire permettent de tirer plusieurs enseignements essentiels sur le comportement et l'efficacité du fluide étudié.

La préparation rigoureuse de la boue selon une formulation optimisée, combinant des agents inhibiteurs, des polymères performants et des additifs de contrôle de filtrat et de lubricité, a permis d'obtenir un fluide initialement stable et conforme aux exigences des forages en phase de surface.

Introduction

Après avoir formulé la boue de forage HPWBM en laboratoire et réalisé les différents tests physiques et chimiques décrits dans le chapitre précédent, nous avons obtenu une série de résultats qui permettent d'évaluer son comportement sous l'effet du vieillissement thermique.

Dans ce chapitre, nous allons interpréter ces résultats en détail, comparer l'évolution des paramètres mesurés dans le temps, et discuter des performances globales de la boue par rapport aux exigences opérationnelles. Cette discussion vise à confirmer la pertinence de la formulation choisie et à identifier les atouts ou éventuelles limites en vue d'une réutilisation sur le terrain.

III.1.Les résultats de La densité

Les résultats du test de densité effectués sur la boue formulée avant et après vieillissement sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.1: Tableau : Évolution de la densité de la boue HPWBM au cours du vieillissement thermique

Temps de vieillissement (jours)	0 (boue fraîche)	3	6	9	12
Densité mesurée (g/cm ³)	1.30	1.30	1.30	1.30	1.30

La densité est l'un des paramètres les plus fondamentaux dans la formulation des boues de forage. Elle détermine la capacité de la boue à exercer une pression hydrostatique suffisante pour stabiliser les parois du puits, contrôler les venues de formation et assurer la sécurité des opérations. C'est pourquoi la densité constitue le premier test réalisé lors de la caractérisation d'une boue.

Dans le cadre de cette étude, des mesures de densité ont été effectuées sur la boue HPWBM fraîchement préparée, puis à intervalles réguliers après vieillissement thermique à 3 jours, 6 jours, 9 jours et 12 jours, afin d'évaluer sa stabilité dans le temps.

Les résultats montrent que la densité est restée constante à 1,30 g/cm³ tout au long de la période de vieillissement. Cette stabilité témoigne de la bonne tenue de la phase solide et de

Chapitre III: Résultats et Discussions

l'absence de séparation significative entre les composants, ce qui est un indicateur très positif pour envisager la réutilisation de cette boue dans les cycles suivants de forage, sans nécessiter de correction majeure.

III.2. Les paramètres de la rhéologie

Les résultats obtenus des tests de la viscosité plastique (PV) et le point d'écoulement ou Yield Point (YP) sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Synthèse des valeurs de PV et YP obtenues lors des essais

Temps de vieillissement (jour)	Yp (Pa)	Pv (pc)
0	8.14	20
3	5.75	14
6	4.31	12
9	3.35	11
12	2.87	10

III.2. 1. Discussion des résultats rhéologiques

Le tableau présenté illustre l'évolution des deux principaux paramètres rhéologiques de la boue HPWBM la limite d'élasticité (YP) et la Viscosité plastique (PV) mesurés à différents intervalles de temps (0, 3, 6, 9 et 12 jours) après un vieillissement thermique simulé. Ces paramètres sont essentiels pour évaluer la capacité de la boue à assurer le transport des déblais et à maintenir une bonne circulation dans le puits.

La limite d'élasticité est passée de 8.14Pa pour la boue fraîche à 2.87Pa après 12 jours de vieillissement. Cette diminution progressive est typique d'une dégradation thermique modérée des polymères viscosifiants (comme le XanthaneGum ou le PAC LV). Malgré cette baisse, les valeurs restent suffisantes pour garantir la suspension des solides, en particulier dans des conditions de forage vertical ou peu dévié.

Parallèlement, la Viscosité plastique a diminué de 20 cP à 10 cP sur la même période. Cette baisse régulière traduit une réduction modérée de la résistance interne au cisaillement, sans pour autant indiquer une contamination solide. En effet, une hausse de la PV aurait signalé

Chapitre III: Résultats et Discussions

une surcharge en particules fines, ce qui n'est pas le cas ici. La stabilité de la PV confirme donc que la boue reste bien dispersée, propre et homogène.

L'évolution contrôlée de ces deux paramètres montre que la formulation HPWBM conserve une stabilité rhéologique satisfaisante, même après exposition prolongée à haute température. Ces résultats confirment la résilience du système vis-à-vis du vieillissement thermique et démontrent que cette boue peut être réutilisée sans nécessiter de traitements correctifs importants, ce qui en fait une solution économique et opérationnellement viable pour les futures applications de forage.

III.2. 2.Les gels et le taux de pourcentage faible

Le tableau suivant regroupe les résultats obtenus lors des essais de gel et de LSR.

Tableau III.3 : Évolution des valeurs de Gel et de LSR suite au vieillissement

Temps (jours)	Gel 0 (G_0)	Gel 10 (G_{10})	LSR = G_{10} / G_0
0 (boue fraîche)	3	6	2
3	2	4	2
6	2	3.5	1.75
9	1.5	3	2
12	1.5	2.5	1.66

III.2.3.Discussion des résultats

La diminution progressive des valeurs de gel 0 et gel10 au fil du vieillissement thermique indique une légère perte de la structure gélifiée de la boue. Cela peut s'expliquer par la dégradation partielle des polymères viscosifiants (comme le XanthaneGum et le PAC LV), qui contribuent à la capacité de la boue à se structurer au repos.

Cependant, la valeur du LSR reste relativement stable autour de 2, ce qui traduit une bonne cohésion entre les gels de courte durée et la structure interne du fluide. Un LSR stable suggère que la boue conserve un comportement thixotrope acceptable, même après vieillissement.

Le maintien de cette stabilité est favorisé par la formulation riche en agents de stabilisation, notamment :

Chapitre III: Résultats et Discussions

- Le XanthaneGum, qui confère une viscosité stable à bas cisaillement.
- Le Polytrex et le PAC LV, qui renforcent la structure à l'état de repos.
- Le Black Heal et l'EMEC BU Latex, qui contribuent également à la cohésion du système

Malgré une légère réduction des gels au fil du temps, la boue conserve des caractéristiques gélifiantes satisfaisantes, permettant de maintenir les déblais en suspension en cas d'arrêt de la circulation. Le LSR reste dans une plage acceptable, témoignant d'une structure stable et d'un bon comportement à bas cisaillement, ce qui confirme la stabilité de la boue HPWBM et sa réutilisabilité après vieillissement thermique.

III .3.Les résultats du filtrat API

Le tableau et le graphe ci-dessous présentent les valeurs du filtrat API mesurées à différents intervalles de temps après vieillissement thermique de la boue HPWBM

Tableau III.4 : Évolution du volume de filtrat API de la boue high performance a base d'eau au cours du vieillissement thermique

Le temps de vieillissement	0	3	6	9	12
Filtrat API	2.4	2.00	2.2	2.4	2.7

Voici le graphique illustrant les résultats présentés dans le tableau précédent.

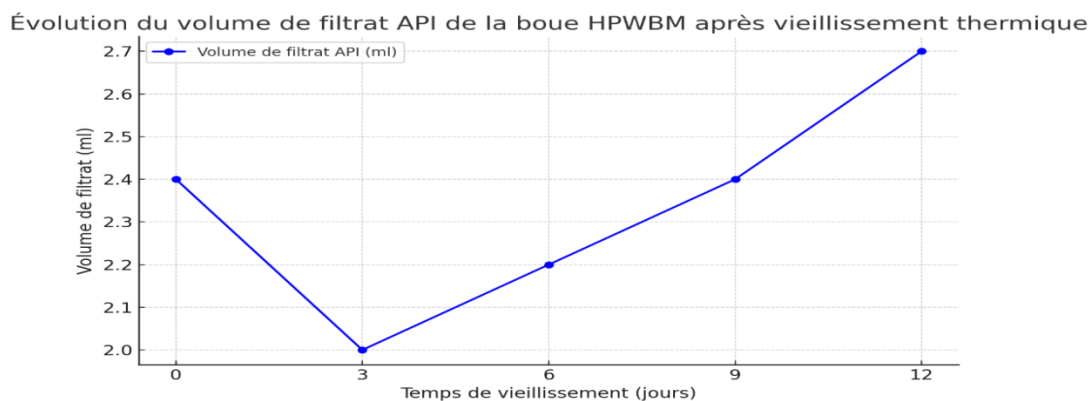


Figure III.1 : Représentation graphique de l'évolution du filtrat de la boue HPWBM en fonction du temps de vieillissement.

Dans cette étude, le volume de filtrat mesuré était de 2,4 ml pour la boue fraîche, puis de 2,0 ml après 3 jours de vieillissement thermique. Cette légère diminution est positive et démontre que le système de contrôle de filtrat est resté stable malgré l'exposition prolongée à la chaleur.

Les valeurs de filtrat mesurées sont restées quasi constantes au-delà de 3 jours, et se maintiennent autour de 2,0 à 2,7 ml jusqu'à 12 jours. Ces résultats indiquent que le réducteur de filtrat, notamment le Polytrex, a conservé son efficacité même après un vieillissement thermique prolongé. Cela prouve que le polymère utilisé est thermiquement stable, ce qui est un atout majeur pour les boues destinées aux forages profonds à haute température.

En outre, l'absence de dégradation du système de contrôle du filtrat signifie que la barrière semi-perméable formée dans la zone filtrante reste fonctionnelle, empêchant les pertes de fluide dans la formation. Cela contribue non seulement à la stabilité du puits, mais aussi à la réduction des coûts liés aux problèmes de circulation ou à la régénération fréquente de la boue.

Les résultats montrent que la boue HPWBM testée maintient un excellent contrôle du filtrat tout au long du processus de vieillissement thermique. Ce comportement confirme la bonne résistance thermique des additifs utilisés, en particulier du Polytrex, et valide la possibilité de réutilisation de cette formulation sans perte d'efficacité en matière de filtration.

III.4. Les résultats de lubricité

L'histogramme suivant illustre les résultats de mesure du coefficient de friction de la boue HPWBM sur 12 jours de vieillissement thermique.

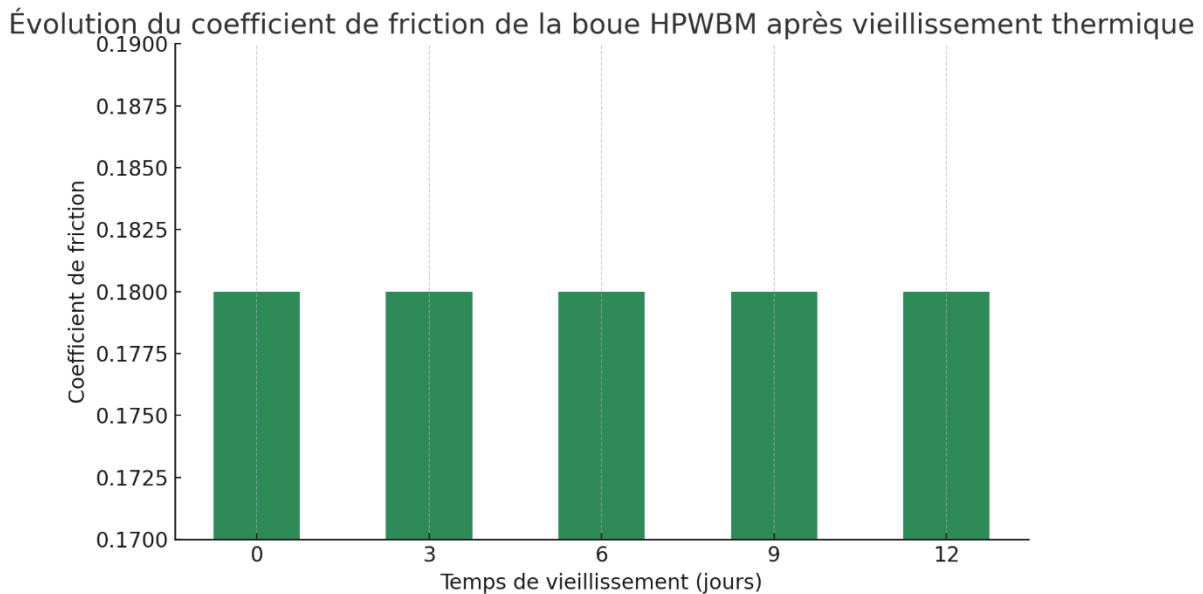


Figure III.2 : Variation du coefficient de friction de la boue high performance à base d'eau après vieillissement thermique

III.4.1. Interprétation de résultats

Dans le cas de la boue HPWBM testée, la valeur initiale du coefficient de friction était de 0,18 pour la boue fraîche, ce qui indique une lubrification efficace, notamment dans les environnements où les boues à base d'eau présentent souvent un frottement plus élevé que les boues à base d'huile.

Après vieillissement thermique, les mesures indiquent que cette valeur est restée constante à 0,18 jusqu'à 12 jours. Cette stabilité remarquable suggère que les agents lubrifiants intégrés dans la formulation (notamment le Black Heal et l'EMEC BU Latex) ont maintenu leur efficacité malgré l'exposition à haute température.

La constance de la lubricité au cours du temps démontre :

- Une bonne résistance thermique des additifs lubrifiants présents dans la boue.
- Une stabilité de la phase continue (eau + polymères), sans évaporation excessive ni dégradation notable qui pourrait altérer les propriétés lubrifiantes.
- Une absence de formation excessive de solides abrasifs, ce qui aurait pu augmenter la friction.

Chapitre III: Résultats et Discussions

Dans un contexte opérationnel, cela signifie que la boue peut continuer à réduire l'usure mécanique, limiter le collage des tiges et améliorer la performance du forage tout au long de son cycle d'utilisation.

La stabilité du coefficient de friction à 0,18 sur 12 jours de vieillissement thermique démontre que la boue HPWBM conserve une excellente capacité de lubrification, renforçant encore sa réutilisabilité dans des conditions réelles de forage, même à température élevée. Ce résultat témoigne de la performance durable des additifs lubrifiants et de la fiabilité de la formulation choisie.

III.5.Mesure de pH

Les résultats obtenus des mesures de l'évolution du pH de la boue HPWBM en fonction du temps de vieillissement thermique (0 à 12 jours) sont représentés dans le graphe ci-dessous :

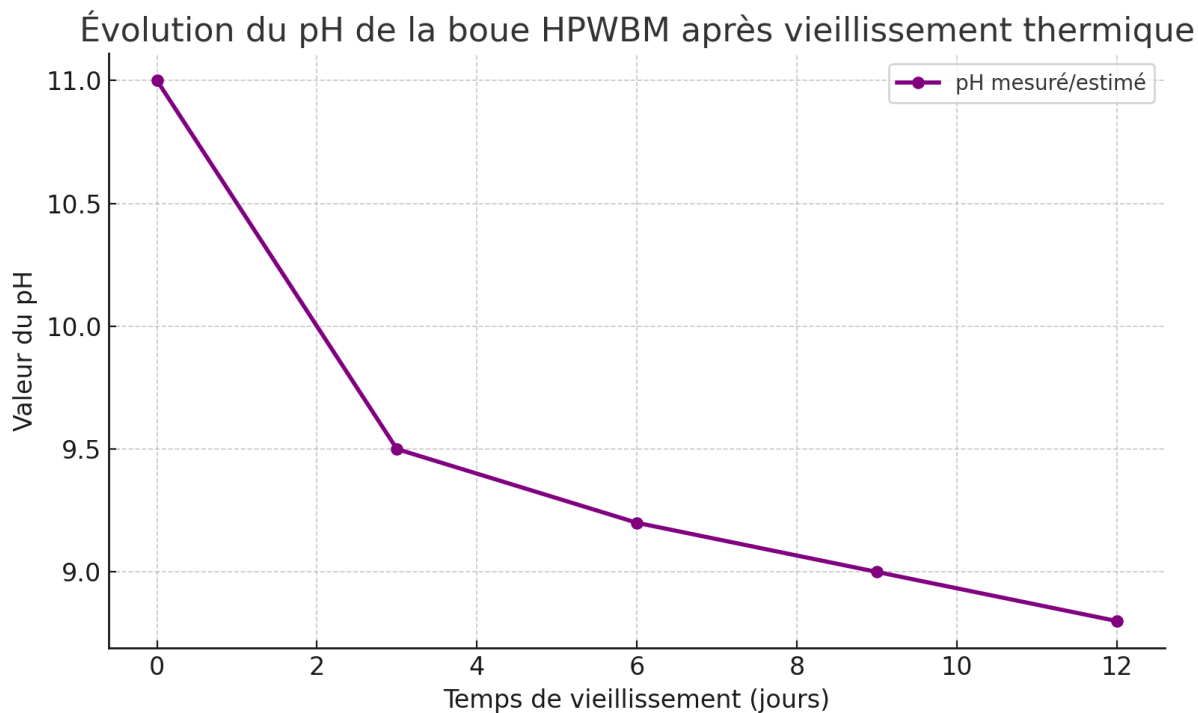


Figure III.3 : Variation du pH de la boue HPWBM au cours du vieillissement thermique.

Chapitre III: Résultats et Discussions

Interprétation du graphe de l'évolution du pH

Le graphe montre une diminution progressive du pH de la boue HPWBM, passant de 11,0 (boue fraîche) à 8,8 après 12 jours de vieillissement thermique. Cette tendance indique une perte graduelle d'alcalinité sous l'effet de la température.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette baisse :

- La dégradation thermique partielle de certains additifs organiques (comme le XanthaneGum ou le PAC LV), qui libèrent des sous-produits légèrement acides.
- La neutralisation progressive des agents alcalinisant comme le caustique soda (NaOH) et le soda ash (Na_2CO_3), surtout en présence d'ions dissous ou de CO_2 .
- Une modification de l'équilibre ionique due à la concentration ou la précipitation de sels à haute température.

Malgré cette chute, le pH reste dans une plage basique modérée (8,8–9,5) tout au long de l'expérience, ce qui est acceptable pour la stabilité des polymères et l'inhibition des argiles. Cela signifie que la formulation de la boue conserve ses propriétés chimiques essentielles sans nécessiter de correction majeure.

III.6.Évolution du taux de KCl dans la boue HPWBM

Les résultats obtenus des mesures de l'évolution du taux de KCl au sein de la boue HPWBM sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.5: les taux de KCl mesurés au sein de la boue HPWBM

Temps de vieillissement (jours)	KCl mesuré (°/°)
0(boue fraîche)	5
3	5
6	4.9
9	4.8
12	4.7

Les données montrent que le taux de KCl reste stable à 5 % jusqu'au 3^e jour, puis une légère décroissance est estimée à partir du 6^e jour. Cette baisse progressive peut s'expliquer par :

- Une solubilisation accrue à température élevée.
- Une légère dilution due à l'éventuelle absorption d'humidité ou aux échanges ioniques.
- Une adsorption partielle du KCl par les solides argileux, réduisant la concentration libre en solution.

Cependant Le taux de KCl dans la boue HPWBM reste quasi constant malgré l'exposition prolongée à la chaleur. Cela montre que l'inhibition des argiles est maintenue, et que la formulation offre une excellente stabilité ionique, ce qui renforce l'idée que la boue est réutilisable même après plusieurs jours de circulation thermique.

III.7. Les résultats des tests de Phénolphthaléine sur Filtrat (pf) et Méthylorange sur Filtrat (MF)

Les résultats des tests à la phénolphthaléine (PF) et au méthylorange (MF) sur le filtrat sont illustrés dans le graphique ci-dessous.

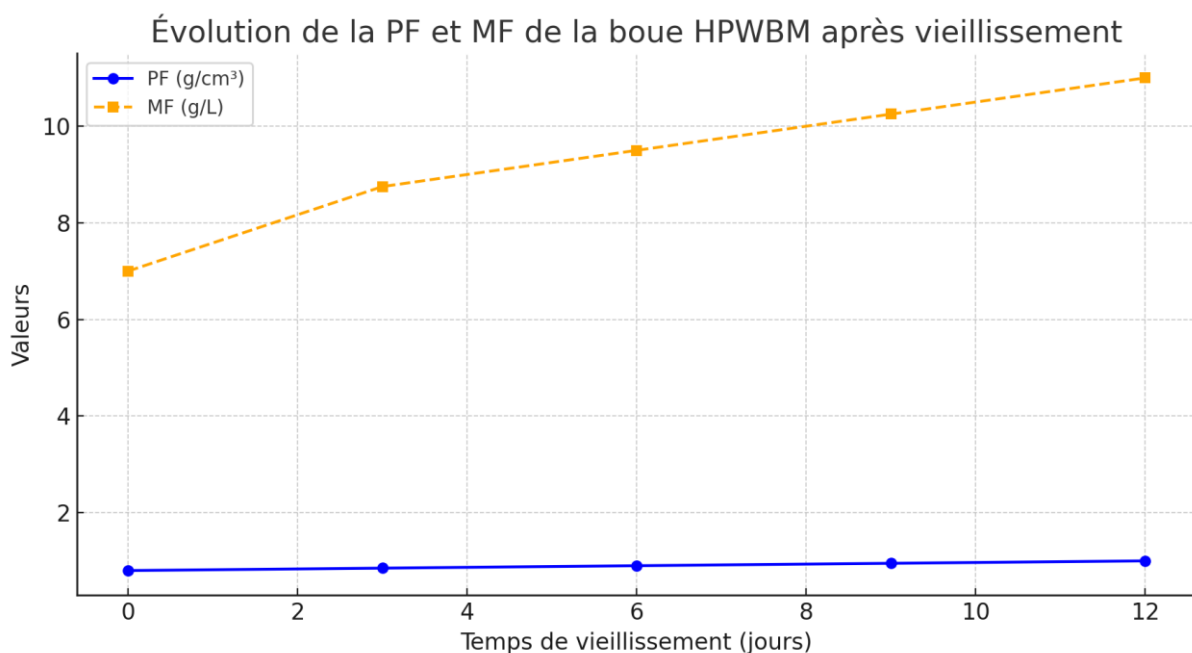


Figure III.6 : Évolution des indicateurs d'alcalinité PF et MF de la boue HPWBM avant et après exposition thermique prolongée.

Le graphe présenté illustre l'évolution du Point de Filtrage (PF) et des Matières Filtrées (MF) de la boue HPWBM sur une période de 12 jours de vieillissement thermique. Le PF,

Chapitre III: Résultats et Discussions

initialement mesuré à 0,8 g/cm³, augmente légèrement jusqu'à 1,0 g/cm³ au 12^e jour. Cette variation modérée peut s'expliquer par une légère concentration des sels dissous (comme NaCl et KCl), probablement due à l'évaporation partielle de l'eau ou à la libération d'ions par dégradation thermique des polymères. Malgré cela, les valeurs restent dans une plage acceptable, témoignant d'un bon contrôle du filtrat tout au long du vieillissement.

En parallèle, les matières filtrées (MF) évoluent plus sensiblement, passant de 7 g/L (boue fraîche) à environ 11 g/L après 12 jours. Cette hausse progressive reflète une accumulation de solides fins et de composés issus de la dégradation thermique des additifs organiques (comme le XanthaneGum et le PAC LV), qui traversent le média filtrant avec le liquide. Bien que ces résultats ne remettent pas en cause l'efficacité globale de la boue, ils indiquent une charge croissante dans le filtrat, pouvant à terme nécessiter une filtration mécanique ou un reconditionnement partiel avant réutilisation.

Ainsi, cette évolution faible de la PF et de la MF confirme que la boue HPWBM garde des propriétés stables malgré le vieillissement, mais qu'un suivi régulier des solides dans le filtrat est indispensable pour garantir sa performance continue lors d'une réutilisation en conditions réelles de forage.

III.8.Le test des Ca²⁺

Le tableau ci-après synthétise l'évolution de la concentration en ions calcium (Ca²⁺) dans la boue HPWBM au cours du vieillissement thermique :

Tableau III.6. : Évolution de la concentration en ions Ca²⁺ dans la boue HPWBM au fil du temps

Temps de vieillissement (jours)	Concentration en Ca ²⁺ (mg/L)
0	0
3	0
6	40
9	90
12	150

La concentration en ions calcium (Ca²⁺) dans la boue HPWBM évolue progressivement au cours du vieillissement thermique. Elle reste nulle (0 mg/L) aux jours 0 et 3, ce qui reflète

Chapitre III: Résultats et Discussions

une bonne stabilité chimique de la boue dans les premiers jours. À partir du 6^e jour, une légère présence de calcium commence à apparaître, avec une concentration atteignant 40 mg/L, puis augmentant à 90 mg/L au 9^e jour, et atteignant 150 mg/L au 12^e jour. Cette augmentation progressive peut être liée à plusieurs facteurs :

- Une solubilisation de minéraux présents dans certains additifs (ex. : bentonite contenant du carbonate de calcium).
- Une contamination thermique lente provenant soit du matériel de vieillissement, soit d'interactions chimiques dans la phase liquide.
- Une dégradation de certaines structures qui libèrent des ions calcium à mesure que la température agit sur la boue.

Malgré cette apparition progressive, la concentration reste inférieure à la limite maximale de 200 mg/L recommandée par SONATRACH, ce qui signifie que la boue reste conforme aux normes opérationnelles ; donc Les résultats montrent que la formulation HPWBM reste chimiquement stable jusqu'à 3 jours. L'apparition modérée des ions calcium au-delà de cette durée reste acceptable, mais justifie une surveillance continue lors d'une réutilisation prolongée. Si la tendance à l'augmentation se poursuit, un traitement correctif par ajout desoda ash (Na_2CO_3) peut être appliqué pour précipiter les ions Ca^{2+} et préserver les propriétés chimiques et rhéologiques de la boue.

III.9.Évolution du test au bleu de méthylène dans la boue HPWBM

Les résultats du test au bleu de méthylène appliqué à la boue HPWBM sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1II.7 : Résultats du test MBT appliqué à la boue HPWBM

Temps (jour)	Valeur de MBT (mg/g)
0(boue fraiche)	21.75
3	21
6	20.3
9	19.5
12	18.8

Chapitre III: Résultats et Discussions

Le tableau présente l'évolution de la valeur du test MBT au fil du temps. La boue fraîche montre une valeur initiale de 21,75 mg/g, indiquant une présence significative d'argiles gonflantes actives. On observe une baisse progressive de cette valeur avec le temps : 21 mg/g après 3 jours, puis 20,3 mg/g à 6 jours, 19,5 mg/g à 9 jours et enfin 18,8 mg/g après 12 jours.

Cette diminution modérée traduit une stabilisation croissante des argiles, probablement sous l'effet combiné de la température et de l'action prolongée des inhibiteurs chimiques présents dans la formulation (comme le KCl et EMEC HIB). Le comportement du MBT confirme donc que la boue conserve sa capacité à inhiber efficacement les argiles réactives au fil du vieillissement thermique, sans dégradation chimique majeure.

III.10.Comparaison entre la boue HPWBM testée en laboratoire et celle utilisée sur chantier

Le tableau suivant regroupe les résultats de mesure des paramètres de la boue HPWBM réutilisée dans des conditions réelles lors de forage sur chantier par la société Sonatrach. Cette boue a été utilisée puis stockée par Sonatrach pour une durée d'une année. La formulation de cette boue correspond à la même formulation de boue étudiée en laboratoire :

Tableau III.6 : Paramètres de la boue relevés dans le report de Sonatrach

Paramètres	Après 5h de forage	Après 10 h de forage	Après 15 h de forage	Après 20h de forage
Ph	9	8.5	9	9
Viscosité Plastique (PV) (cP)	31	36	33	34
Yield Point (YP) (Pa)	10.05	10.05	9.58	9.58
Filtrat API (ml)	2.80	2.40	3	2.80
Gel 0 min (Pa)	2.87	2.87	2.87	2.87
Gel 10 min (Pa)	8.62	9.58	9.10	7.66
LSR	4	5	5	6
Pression de filtration (PF)	0.3	0.3	0.2	0.3
Masse filtrée (MF)	0.6	0.7	0.6	0.6
MBT (mg/g)	35.6	35.6	35.6	35.6
Teneur en KCl (%)	4.6	4.2	5	5

Chapitre III: Résultats et Discussions

L'analyse comparative entre la boue HPWBM testée en laboratoire et celle utilisée sur chantier par Sonatrach révèle des performances globalement satisfaisantes. La boue conservée pendant un an par Sonatrach a pu préserver d'excellentes propriétés rhéologiques (Yield Point, Plastic Viscosity, gels), parfois même supérieures à celles observées dans la boue fraîchement préparée après vieillissement thermique. Cela témoigne d'une stabilité remarquable malgré le temps de stockage.

De son côté, la boue préparée présente une bonne stabilité globale, notamment en termes de densité, de contrôle du filtrat et de lubricité. Toutefois, une légère dégradation des propriétés rhéologiques est constatée au fil du vieillissement thermique, ce qui reste attendu dans ce type de condition.

Ces résultats confirment la robustesse de la formulation HPWBM, aussi bien sur le plan chimique que mécanique. Ils valident sa réutilisation potentielle en opérations de forage, à condition d'assurer un suivi régulier des paramètres sensibles tels que le pH, le taux de MBT et la concentration en ions Ca^{2+} .

Conclusion

La boue HPWBM a montré une excellente stabilité après 12 jours de vieillissement thermique. Les paramètres essentiels comme la densité, la rhéologie, la lubricité, le contrôle du filtrat, le pH et la stabilité chimique sont restés dans des plages acceptables, confirmant la performance durable de la formulation. Malgré quelques variations modérées (baisse du pH, légère augmentation des ions Ca^{2+} ou du MBT), aucun ajustement majeur n'est requis. La comparaison avec la boue utilisée sur le terrain par Sonatrach renforce la fiabilité de cette formulation, qui peut être réutilisée efficacement en forage réel.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'Algérie, en tant que l'un des principaux producteurs et exportateurs d'hydrocarbures à l'échelle mondiale, se doit d'adopter des techniques d'exploitation de plus en plus performantes pour répondre aux besoins croissants en énergie. Le forage constitue une étape cruciale dans le processus de production des hydrocarbures, et le choix du fluide de forage y joue un rôle déterminant, tant sur le plan technique qu'environnemental.[5]

Traditionnellement, les boues à base d'huile (OBM) ont été largement utilisées pour leurs excellentes performances. Cependant, leur impact environnemental a conduit à une évolution vers des formulations plus respectueuses, notamment les boues à base d'eau de haute performance (HPWBM), capables d'offrir des caractéristiques similaires à celles des OBM tout en réduisant les risques de pollution.[21]

Dans cette optique, ce travail s'est intéressé à l'étude de la réutilisation possible de la boue HPWBM. Une formulation a été préparée en laboratoire, puis soumise à des conditions de vieillissement thermique simulant l'environnement réel du forage. Les résultats des essais physiques et chimiques ont démontré que cette boue conserve des propriétés stables et efficaces même après plusieurs jours d'exposition à haute température.[4]

Les résultats du vieillissement thermique de la boue HPWBM sur 12 jours ont montré une bonne stabilité globale. La densité est restée constante à 1,30 g/cm³, sans signe de séparation ou de dégradation. Sur le plan rhéologique, bien que le Yield Point et la Plastic Viscosity aient diminué, leurs valeurs sont restées acceptables pour assurer le transport des déblais et la stabilité du puits. Les gels et le LSR ont également conservé une stabilité satisfaisante, maintenant un bon comportement thixotrope.

Le filtrat API est resté stable entre 2,0 et 2,7 ml, montrant l'efficacité continue des additifs comme le Polytrex. La lubricité est demeurée constante avec un coefficient de friction de 0,18, indiquant une bonne performance des agents lubrifiants. Le pH a légèrement baissé mais est resté dans une plage basique convenable ($\geq 8,8$), suffisante pour la stabilité chimique de la boue.

Les valeurs du KCl, du MBT, du Ca²⁺, ainsi que les indicateurs PF et MF ont montré des variations modérées mais maîtrisées, témoignant d'une bonne résistance chimique. Ces

Conclusion gènèrale

évolutions restent compatibles avec une réutilisation de la boue, sous réserve d'un suivi régulier.

À la lumière des résultats obtenus à travers les différents tests, il ressort que la boue HPWBM peut être réutilisée efficacement jusqu'à une profondeur d'environ 2400 mètres. Cette estimation est cohérente avec les besoins de la phase 16'', qui représente la section la plus consommatrice en volume de fluide, avec environ 600 m³ requis.[22]

La réutilisation de cette boue présente plusieurs avantages majeurs. D'une part, elle contribue à la préservation de l'environnement, notamment lors du forage de la phase 16'', qui traverse des nappes phréatiques sensibles telles que les nappes Albienne et Aptienne. D'autre part, le coût de revient de la HPWBM reste nettement inférieur à celui des boues à base d'huile (OBM), puisque sa phase continue est l'eau, contrairement à l'OBM dont la phase continue est généralement le gasoil un fluide plus coûteux et moins respectueux de l'environnement.[23]

Ainsi, l'étude menée a permis de conclure que la boue HPWBM peut être réutilisée sans altération majeure de ses performances, ce qui représente un avantage considérable en termes de réduction des coûts opérationnels et de protection de l'environnement. Ces résultats ouvrent la voie à une adoption plus large de ce type de fluide dans les futures opérations de forage, tout en répondant aux exigences techniques et écologiques du contexte algérien.

En définitive, il apparaît essentiel de généraliser l'utilisation de la HPWBM dans les futures campagnes de forage, tout en développant un protocole rigoureux de contrôle et d'ajustement permettant d'assurer sa réutilisation optimale, tant du point de vue technique qu'économique et environnemental.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Aadnani, M., & Benkahla, A. (2018). Technologie des fluides de forage. Alger : Office des Publications Universitaires
- [2] Growcock, F. B., & Patel, A. D. (2011). *Recycling and reuse of drilling fluids: Environmental and economic considerations*. SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. Society of Petroleum Engineers.
- [3] American Petroleum Institute. (2019). API Recommended Practice 13B-1: Field Testing Water-Based Drilling Fluids. API Publishing.
- [4] Caenn, R., Darley, H.C.H., & Gray, G.R. (2011). *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids* (6th ed.). Gulf Professional Publishing.
- [5] Bourgoyne, A.T. et al.(1991). *Applied Drilling Engineering*. Society of Petroleum Engineers.
- [6] Abbas Hadj Abbas: " Les borbiers des forages petroliers et des unités de production Impact sur l'environnement et technique de traitement" ; mémoire Magister Spécialité : Génie pétroliers, Université Kasdi Merbah Ouargla, Année : 2010/2011.
- [7] API Standard 13B-1: *Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids*, American Petroleum Institute.
- [8] Dobbi & Derriche (2023), mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [9] Wolfgang F. Prassl, Drilling Engineering, Curtin University of Technology.
- [10] IADC (International Association of Drilling Contractors) – Guidelines and publications on drilling fluid management.
- [11] Kaneshima, T. (2019). *Development of High Performance Water Base Mud and Estimation of Downhole Swelling*, Texas A&M University (Thèse de doctorat).(ROLE)

Références bibliographiques

- [12] Darley, H. C. H., & Gray, G. R. (1988). *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids* (5th ed.). Houston, TX: Gulf Publishing Company.
- [13] M-I SWACO. (2020). *Drilling Fluid Manual* (Technical publication). Houston, TX: Schlumberger.
- [14] Chilingarian, G. V., & Vorabutr, P. (1983). *Drilling and drilling fluids*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- [15] Ali, S. M., & Smith, B. (2012). Drilling fluid additives and their applications: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 81, 1–10
- [16] Dye, B., Clapper, D., Hansen, N., Leaper, R., Shoults, L., Otto, M., Xiang, T., & Gusler, B. (2004, April 6–7). AADE-04-DF-HO-14: Drilling fluids conference. Texas, USA
- [17] Khodja, M. (2008). Étude des performances et considérations environnementales (Mémoire de fin d'études, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France).
- [18] Prassl, W. F. (2007). *Drilling Engineering*. Curtin University of Technology. Khodja, M. (2008). Étude des performances et considérations environnementales (Mémoire de fin d'études, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France).
- [19]. Veil, J. A. (2015). Drilling waste management: Strategies for minimizing environmental impact. *Journal of Petroleum Environment & Engineering*, 7(3), 145–159
- [20] Mohammed CHERIFI "Drilling Waste Management for Environmental Protection in Hassi Messaoud Field", Faculty of Design and Technology, School of Engineering, the Robert Gordon University, Aberdeen, June 2006"
- [21] Growcock, F. et al. (2009). "High-Performance (water-Based Muds)sPE *Drilling & Completion fluids*
- [22] Engineering. data for 16'' section volumes SPE199872
- [23] Price comparison WBM vs OBM. Oil & gaz journal, 2021

Références bibliographiques

Résumé

Ce mémoire, réalisé au sein de la Société Nationale SONATRACH – Division Forage, étudie la réutilisation d'une boue de forage HPWBM après vieillissement thermique. Il vise à évaluer la stabilité de ses propriétés physico-chimiques pour déterminer sa réutilisabilité. Le travail couvre les boues de forage et leurs fonctions, les méthodes de préparation et les essais en laboratoire (densité, viscosité, filtration, pH, MBT, etc.), ainsi que l'évolution des résultats après vieillissement. Les résultats montrent une bonne stabilité grâce aux additifs, permettant une réutilisation partielle et contribuant à une meilleure gestion technique et environnementale des boues .

Mots clés : Boue de forage HPWBM, Réutilisation de boue

Abstract

This thesis, conducted at the National Society SONATRACH – Drilling Division, investigates the reuse of HPWBM drilling mud after thermal aging. It aims to assess the stability of its physico-chemical properties to determine its reusability. The study covers drilling muds and their functions, preparation methods, and laboratory tests (density, viscosity, filtration, pH, MBT, etc.), as well as the evolution of results after aging. The findings indicate good stability due to the additives used, allowing partial reuse and contributing to improved technical and environmental management of drilling muds.

Key words : HPWBM (High Performance Water-Based Mud), Drilling mud reuse

ملخص:

هذه الأطروحة، التي أجريت ضمن قسم الحفر في الشركة الوطنية سوناطراك، تدرس إعادة استخدام طين الحفر HPWBM بعد التعتيق الحراري. وتهدف إلى تقييم استقرار خصائصه الفيزيائية والكيميائية لتحديد مدى قابليته لإعادة الاستخدام. ويغطي العمل طين الحفر ووظائفه، وطرق تحضيره، واختباره العملية (الكثافة، واللزوجة، والترشيح، ودرجة الحموضة، ومعامل التكلس، وغيرها)، بالإضافة إلى تطور النتائج بعد التعتيق. وتُظهر النتائج استقرارًا جيدًا بفضل الإضافات، مما يسمح بإعادة الاستخدام الجزئي، ويساهم في تحسين الإدارة الفنية والبيئية للطين.

الكلمات المفتاحية: طين حفر HPWBM، إعادة استخدام الطين