

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Boudiaf - M'sila
Département de chimie



**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique LMD**

Filière : Chimie

Spécialité: Chimie des matériaux

Par : SAIED Aymen

Intitulé :

**Amélioration des performances des boues de forage pétrolier en
utilisant un matériau argileux de la région de Msila**

Soutenu devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Establishment	Qualité
BENYAHIA Azzedine	Professeur	Univ. Mohamed Boudiaf - M'sila-	Président
DEGHFEL Nadir	MCA	Univ.Mohamed Boudiaf - M'sila-	Rapporteur
MELOUKI Azzedine	MCA	Univ.Mohamed Boudiaf - M'sila-	Examineur

Année universitaire : 2023 /2024

Dédicaces

Je dédie ce travail à toutes les personnes estimées qui m'ont encouragé et soutenu dans mes études.

A mes parents pour leur patience, confiance et l'amour qui sont essentiels pour ma vie comme ils ont contribué à mon éducation.

A toutes mes sœurs :Djahida Islem et Fethia Achwak
& mes frères : Mohammed Serhane et Fares Yazid qui ont été pour moi d'un grand soutien moral.

A toute ma famille.

Remerciements

Avant tout , je tiens à remercier Allah le miséricordieux et le compatissant de m’avoir assisté et armé de la patience et puissance afin de réaliser ce modeste travail.

Je remercie plusieurs personnes qui m’ont aidé tout au long de la période où j’ai rédigé cette thèse. Ma sincère gratitude et ma reconnaissance vont chez mon directeur de recherche, Dr DEGHFEL Nadir, pour son aide, ses conseils, encouragements et sa disponibilité tout le temps. Honnêtement, sans leur soutien et confiance, la finalisation de ce projet aurait été difficile, pour ne pas dire impossible.

De même, ma profonde gratitude et appréciation vont au Pr. BENYAHIA Azzedine qui n'a jamais manqué de m'aider et de m'encourager tout au long du processus de réalisation de cette recherche.

Mes sincères remerciements s’adressent tout notamment aux les membres de jury de m’avoir fait honneur d’examiner et faire parité de ce jury de thèse, plus précisément : Dr MELOUKI azzedine encore que ses nombreuses obligations professionnelles.

Un grand merci également aux les ingénieurs de laboratoire de DFSP à Hassi Messaoud pour avoir fourni les outils et m’a aidé à faire avancer la partie pratique , plus précisément : Monsieur BELDJAZIA Abdellali

Un grand merci à mon cousin BOULIFA Rafik pour leur soutien et contribution à la réalisation de la partie pratique .

Enfin, je remercie mes parents qui n'ont jamais manqué de m'encourager. Je suis

Également redevable à ma famille pour leur aide.

Résumé :

Le fluide de forage joue un rôle crucial dans les activités de forage. Sa formulation est spécifiquement conçue pour optimiser le forage en remplissant diverses fonctions, notamment préserver la stabilité du puits face aux contraintes géologiques, évacuer les résidus de forage et assurer la lubrification. Généralement, les fluides de forage sont élaborés en combinant des substances argileuses avec de l'eau ou de l'huile. Cependant, pour répondre à des besoins techniques spécifiques et pallier les complications de forage, il est parfois nécessaire d'incorporer des additifs spéciaux au mélange.

Ce travail vise à préparer trois échantillons en mélangeant un matériau argileux local de la région de M'sila dans différentes proportions avec la bentonite utilisée dans les boues de forage pétrolier, et en comparant ces échantillons avec les boues de forage des puits pétroliers de Hassi Messaoud.

Abstract

Drilling fluid plays a crucial role in drilling activities. Its formulation is specifically designed to optimize drilling by fulfilling various functions, including preserving well stability against geological stresses, removing drilling cuttings, and ensuring lubrication. Generally, drilling fluids are made by combining clay substances with water or oil. However, to meet specific technical needs and address drilling complications, it is sometimes necessary to incorporate special additives into the mixture.

This work aims to prepare three samples by mixing a local clay material from the M'sila region in different proportions with the bentonite used in oil well drilling mud, and comparing these samples with the drilling muds from the oil wells of Hassi Messaoud.

ملخص

يعتبر طين الحفر مكوناً أساسياً في عمليات الحفر. إنه مصمم لتسهيل عملية الحفر من خلال توفير العديد من الوظائف مثل الحفاظ على ثبات البئر ضد الضغوط الجيولوجية، ونقل القطع، والتشحيم، إلخ. يتم تحضير طين الحفر عن طريق خلط مواد الطين مع الماء أو الزيت. ولكن في بعض الحالات، من أجل ضمان المتطلبات الفنية التي تهدف إلى حل المشكلات المتعلقة بالحفر، تتم إضافة بعض المواد المضافة إلى الطين. يهدف هذا العمل لتحضير ثلاثة عينات و ذلك بخلط مادة طينية محلية من منطقة المسيلة بنسب مختلفة مع البنتونايت المستعمل في طين الحفر البترولي مع مقارنة هذه العينات بطين الحفر للابار البترولية بحاسي مسعود

Mots clés :

Boue , additifs ,viscosité ,paramètres rhéologique , bentonite .

كلمات مفتاحية :

طين , مضافات , اللزوجة , خصائص الريولوجية , البنتونيت

Abréviations

API: American Petroleum Institut.

BASP: Baroid Algeria Services Aux Puits

BaSO₄ : sulfate de baryum

CMC : carboxy méthyl cellulose

DFSP : Drilling Fluids Service aux Puits

DRX : Diffraction des Rayons X

HMD : (Hassi messaoud)

OBM : (Oil Based Mud): boue à base d'huile

PAC : celluloses poly anioniques

PAG : les poly alkylène glycols

PHPA : polyacrylamide partiellement hydrolysé

SG : gravité spécifique

VP : Viscosité plastique

WBM : (water based mud): boue à base d'eau

XRF: X-ray fluorescence

Yp: Yield Point

Liste des Figures

Figure 1: Représentation schématique d'une structure d'un feuillet de kaolinite.....	17
Figure 2: Représentation schématique d'un feuillet de phyllo-silicate.	17
Figure 3 Structure des minéraux argileux.....	19
Figure 4 : Structure de la montmorillonite	22
Figure 5 : Domaines industriels d'utilisation des bentonites.	25
Figure 6 : circuit de la boue de forage	36
Figure 7 : Emplacement de DFSP	44
Figure 8 : vu générale de laboratoire DFSP	46
Figure 9: argile HODNIT	47
Figure 10: L'appareil d'IRTF/IR-4200.....	48
Figure 11 : Appareil de DRXPro PW3209.....	49
Figure 12: X-RAY FluorecenceS8.....	50
Figure 13 : Densimètre fann model 150.....	51
Figure 14: Viscosimetre cylindre fann model 35SA	52
Figure 15: filtre presse API	54
Figure 16: PH-mètre OHAUS	55
Figure 17: cellule de vieillissement	56
Figure 18: four a rouleaux	56
Figure 19: Résultat d'infrarouge	58
Figure 20: Résultat de DRX	59
Figure 21: Résultats de rhéologie d'échantillon 1.....	62
Figure 22: Résultats de rhéologie d'échantillon 2.....	64
Figure 23: Résultats de rhéologie d'échantillon 3.....	64
Figure 24: Résultats de rhéologie d'échantillon 4.....	64
Figure 25: Résultats de pH	67
Figure 26: Résultats API Filtrat.....	70

Liste des tableaux

Tableau N°1 : bentonite, spécification minimales requis pour chaque application	24
Tableau N°2 : Composition chimique de la bentonite de Maghnia.	26
Tableau N°3 : avantages et inconvénients de la boue a base d'eau	31
Tableau N°4 : avantages et inconvénients de la boue a base d'huile	32
Tableau N°5 : Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage.....	38
Tableau N°6 : données techniques et analyse de SODA ASH	40
Tableau N°7 : formulation de boue de forage a base d'eau	46

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Résumé

Liste des Figure

Liste des Tableaux

Liste des Abréviations

Chapitre I : Généralités sur les argils

I.1. Introduction :.....	15
I.2. Origine et définition des argiles :.....	16
I.3. Composition d'argiles :.....	16
I.3.1. Les Minéraux argileux :.....	16
I. 4. Classification des argiles :.....	17
I.4.1 Critères de classification :.....	18
I.4.2 Catégories des minéraux argileux :.....	18
I.4.2.1. La famille 1 :1(Les minéraux à 7Å).....	18
I.4.2.2. La famille 2:1(Les minéraux à 10Å):.....	18
I.4.2.3. La famille 2 :1 :1(Les minéraux à 14Å) :.....	18
I.5. Utilisation des argiles :.....	19
I.6. Matériaux argileux entrant dans la fabrication de la boue :.....	20
I.7 La bentonite.....	20
I.7.1.Définition	20
I.8. Origine de la bentonite.....	20
I.9 Les conditions de formation de la bentonite	21
I.10. Application de la bentonite	21
I.11 Structure de la bentonite.....	21
I.12.Les différents types de bentonites :.....	22
I.13. Les propriétés rhéologiques :.....	22
I.13.1 Viscosité :.....	22
I.13.2. Thixotropie:.....	23
I.13.3.Gel Strength (Force de gel):.....	23
I.13.4. Yield Point (Point de rendement):.....	23
I.13.5. Viscosité plastique :.....	23

I.13.6. Propriétés de filtration :	23
I.14. Les propriétés de la bentonite industrielle.	23
I.15. Principaux usages de la bentonite :	24
I.16. La bentonite en Algérie.....	26
I.17. Les avantages de la bentonite :	26

Chapitre II : la boue de forage

II. Introduction :	28
II. 1. Définition :	28
II.3. Historique de la boue de forage :	29
II.4. Les différents types de la boue de forage :	29
II.4.1. Fluides de forage gazeux	30
II.4.2. La boue à base d'eau:	30
II.4.3. Utilisation de la boue à base d'eau :	30
II.4.3. La boue à base d'huile :	31
II.4.3.1. Utilisation de la boue à l'huile	32
II.4.3.2. Composition de la boue à l'huile	32
II.5. Le rôle des fluides du forage.....	33
II.5.1. Nettoyage des puits.....	33
II.5.2. Maintien des déblais en suspension	33
II.5.3. Sédimentation des déblais fins en surface	33
II.5.4. Refroidissement et lubrification de l'outil et du train de sonde	33
II.5.5. Prévention du cavage et des resserrements des parois du puits	33
II.5.6. Dépôt d'un cake imperméable.....	34
II.5.7. Prévention des venues d'eau, de gaz, ou d'huile	34
II.5.8. Augmentation de la vitesse d'avancement	34
II.5.9. Entraînement d'outils (turbine, MWD, etc.)	34
II.5.10. Diminution du poids apparent du matériel de sondage.....	34
II.5.11. Apport de renseignements sur le sondage.....	34
II.5.12. Contamination des formations productrices	35
II.5.13. Corrosion et usure du matériel.....	35
II.5.14. Toxicité et sécurité.....	35
II.6. Circuit de la boue.....	35
II.7. Caractéristiques des fluides de forage :	36
II.7.1 Filtration	36
II.7.2 Teneur en solides, en eau et en huile :	36

II.7.3 Densité et masse volumique :	37
II.7.4 Rhéologie:	37
II.7.5 L'alcalinite :	37
II.8.Composition des différents types de la boue de forage :	38
II.9.Quelques produits additifs dans la boue (water based mud) :	38
II.9.1. PAC-LV :	38
II.9.1.1.Les principales fonctions dans le forage horizontal.....	39
II.9.1.2.Stabilité du trou de forage :.....	39
II.9.1.2.Réduction des dommages à la formation :.....	39
II.9.2. Soda Ash:.....	39
II.9.2.1. Role de Soda Ash :	39
II.9.2.2.Contrôle du pH :	39
II.9.2.3. Amélioration des propriétés de la boue :	39
II.9.3. Caustic soda :	40
II.9.3.1. Le rôle de caustic soda dans la boue de forage :.....	40
II.9.3.2. Contrôle du pH :	40
II.9.3.3. Amélioration des propriétés de la boue :	40
II.9.4. Le Barazan D :	40
II.9.4.1. Le role de Barazan D :.....	41
II.9.4.2. Viscosification :.....	41
II.9.4.3. Suspension des agents de pontage :.....	41
II.9.4.4. Propriétés thixotropes :.....	41
II.9.4.5. Stabilité à haute température :.....	41
II.9.5. Le chlorure de potassium (KCl) :	41
II.9.5.1.Le rôle de chlorure de potassium (KCl) :.....	41
II.9.5.2.Stabilisation des argiles et des schistes sensibles à l'eau :.....	41
II.9.5.3. Contrôle de l'instabilité des schistes :.....	41
II.9.6. Le CS STARCH :	41
II.9.6.1. Le rôle de CS STARCH :	42
II.9.6.2. Contrôle de la viscosité :.....	42
II.9.6.3. Réduction des pertes de fluide :.....	42
II.9.7. Carbonate de calcium (CaCO ₃) :	42
II.9.7.1. Le rôle de CaCO ₃ :.....	42
II.9.7.2. Réduction des pertes de fluide :.....	42
II.9.7.3. Augmentation de la densité de la boue :.....	42
II.9.7.4. Écologique et économique :.....	42

Chapitre III : Partie Expérimentale Matériels et méthodes

III.1. Présentation de l'ENSP:.....	44
III.1.1. Présentation de DFSP :.....	44
III.1.1.1. Activités principales de DFSP :.....	45
III.1.1.2. Les différents départements de DFSP :	45
III.1.1.3. Présentation de services laboratoire DFSP :.....	45
III.1.2. Formule des échantillons	46
III.2. Modes opératoire :.....	47
III.2. 1. La Spectroscopie Infrarouge.....	47
III.2.2. La Diffraction de Rayons X (DRX)	48
III.2. 3. Spectrométrie de fluorescence X :.....	49
III.2.4. Mesure de la densité (Le Densimètre):.....	50
III.2.4.1. Mode d'emploi :.....	50
III.2.4. 2. Etalonnage:.....	51
III.2.4. 3. Avantage des densimètres :	51
III.2.4. 4. Densimètre pressurisé :.....	51
III.2.5. La rhéologie:.....	52
III.2.5.1. Détermination expérimentale des caractéristiques rhéologiques Dans la profession:.....	52
III.2.5. 2. Principe:.....	52
III.2.5.3. Mode d'emploi:.....	53
III.2.6. filtre presse API:.....	53
III.2.6. 1. Principe:.....	53
III.2.6. 2. Description et mode d'emploi	53
III.2.7. Mesure du ph par PH-mètre électronique:.....	55
III.2.8. Four a rouleaux (hot rolling) :	55
III.2.8.1. Application:	55
III.2.8.2. Mode d'emploi :.....	56

CHAPITRE IV: Résultats et Discussions

Conclusion:.....	59
Références	61

CHAPITRE I

Généralités sur les argiles

I.1. Introduction :

Pour bien comprendre le comportement de la boue de forage, il est essentiel d'étudier les argiles. Ces dernières peuvent être ajoutées délibérément ou se retrouver dans la boue en tant que contaminants majeurs par la dispersion des particules solides lors du forage. La maîtrise des caractéristiques physico-chimiques des argiles est cruciale pour réguler les paramètres des boues à base d'eau et gérer leurs interactions avec d'autres additifs susceptibles d'affecter la stabilité du puits.

Dans le secteur des fluides de forage, certaines argiles, telles que la smectite, principal composant de la bentonite, sont privilégiées pour leur capacité à augmenter la viscosité, former une structure gélifiée et contrôler les fuites. La bentonite fait référence spécifiquement à la montmorillonite sodique, une variété de smectite, utilisée comme additif dans les fluides de forage.

Sur le plan géologique, la bentonite représente une strate de débris volcaniques transformés, présente depuis environ 60 millions d'années dans le nord de l'Amérique, notamment dans les régions actuellement connues sous le nom de Black Hills du Wyoming et du Dakota du Sud, ainsi que les montagnes Big Horn du Wyoming.

Le terme "argile" trouve ses racines dans deux étymologies possibles : l'une grecque, dérivée du mot "Argos" signifiant "blanc", et l'autre latine, issue du mot "argilla". L'utilisation de l'argile remonte à des temps immémoriaux. Nos ancêtres s'en servaient déjà durant le Néolithique pour confectionner des poteries primitives.

De nos jours, l'argile occupe une place de choix, soit comme ingrédient secondaire, soit comme matière première dans divers processus de fabrication. Les applications du minéral argileux se multiplient, car il est utilisé dans de nombreux secteurs industriels, notamment la céramique, l'agriculture, la pharmacie, et particulièrement dans l'industrie pétrolière où il entre dans la composition des boues de forage, sous différentes formes telles que la bentonite ou la barytine[1].

Dans ce chapitre, nous présentons, en premier lieu, la structure et les propriétés et les classifications des matériaux argileux en général, et parle en général sur les produits entrants dans la fabrication des fluides de forage.

I.2. Origine et définition des argiles :

Les argiles jouent un rôle essentiel dans divers domaines de la technologie des fluides de forage. Chimiquement, le groupe des argiles est décrit comme un silicate d'aluminium. Étant donné que les éléments constituant les argiles représentent plus de 80 % de la masse terrestre (8,1 % d'aluminium, 27,7 % de silice et 46,6 % d'oxygène), il est évident qu'à chaque étape du forage d'un puits, nous rencontrons des argiles. Les formations les plus fréquemment forées sont des argiles dans lesquelles le type et la quantité de minéraux argileux présents jouent un rôle crucial dans les caractéristiques chimiques et mécaniques de la roche. Le choix du fluide de forage est souvent lié aux réactions entre le fluide et la roche, car elles influencent la stabilité du puits. Il est donc essentiel de bien comprendre le rôle de la chimie des argiles dans la sélection des systèmes de fluides de forage et la stabilité du puits. [2] [3]

Les argiles sont des aluminosilicates plus ou moins hydratés et la majorité des minéraux argileux appartiennent au groupe des silico-aluminates phylliteux. Ils sont organisés en couches planes infinies constituées d'unités structurales tétraédriques et octaédriques reliées par leurs sommets. Ce type de structure ayant très grande surface spécifique associée à des caractéristiques physico-chimiques très particulières, explique la capacité des argiles à admettre de nombreux échanges de cations et d'anions dans le réseau ou adsorbés en surface. La structure de base des silicates phylliteux, comme de tous les silicates, est l'ion SiO_4^{4-} , où le silicium est tétra coordonné par rapport à l'oxygène.

Fréquemment de faible granulométrie, les argiles sont des minéraux, souvent mal cristallisés et hydratés, de forme lamellaire ou fibreuse. Elles sont souvent présentes en mélanges complexes d'espèces. Les minéraux argileux sont formés par l'empilement de feuillets, eux même constitués d'un empilement de couches. [4]

I.3. Composition d'argiles :

Les argiles sont majoritairement composées de silicates d'alumine

I.3.1. Les Minéraux argileux :

Ce sont des phyllo-silicates d'aluminium dont les feuillets sont constitués de couches d'octaèdres (d'alumine Al_2O_3) et de couches de tétraèdres (silice SiO_4) reliées par les atomes O et OH mis en commun. Outre ces couches formant des feuillets, la structure argileuse s'entrecoupe d'espaces inter foliaires qui comme leur nom l'indique, sont les espaces entre séparant les feuillets. D'après la structure du feuillet, on distingue principalement les argiles 1/1 (1 couche tétraédrique+1 couche octaédrique) et les argiles 2/1 (2 tétra. Pour 1 octaédrique). Les différents groupes de minéraux argileux se différencient par l'arrangement de leurs couches tétraédriques et octaédriques représentés sur la figure 1 et figure 2

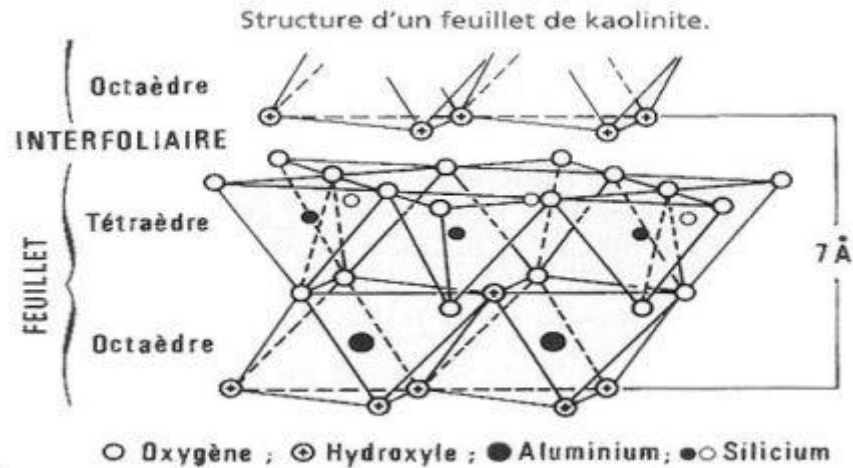


Figure 1: Représentation schématique d'une structure d'un feuillet de kaolinite [11]

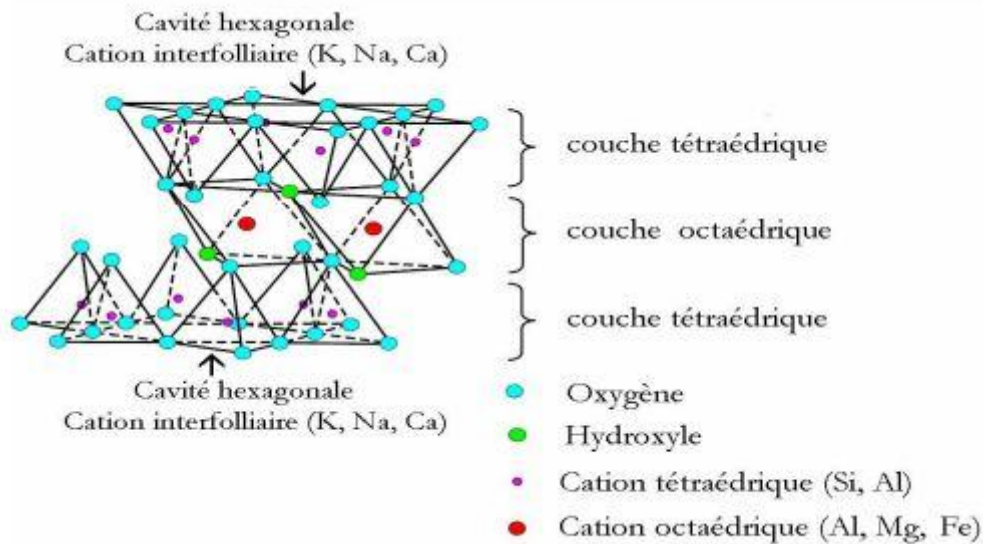


Figure 2: Représentation schématique d'un feuillet de phyllo-silicate [11].

Les phyllo-silicates sont également appelés plus simplement silicates lamellaires.

I. 4. Classification des argiles :

On trouve dans la littérature des modèles différents pour la classification des phyllo-silicates.

- La première classification, établie par le comité international de Classification et de Nomenclature des Minéraux argileux en 1966, est basée uniquement sur la charge du feuillet et sur le nombre d'atomes métalliques en couche octaédrique.
- La deuxième, établie par Mering et Pedro(1969) , prend en compte la localisation des substitutions, leur distribution et le type de cations compensateurs. Cette classification ne prend pas en compte les silicates synthétiques, parfois utilisés dans

l'élaboration de nano composites, que sont la fluoro-hectorite, le fluoro-mica ou la laponite.

- Une troisième classification établie par Eslinger et Peaver (1988) est basée sur le mode de combinaison des feuillets silicates.
- Une dernière classification introduite par Jozja(2003) se base en plus des critères établis par Eslinger et Peaver en 1988 sur l'épaisseur du feuillet silicate.

I.4.1 Critères de classification :

Les principaux critères de classification sont basés sur les paramètres suivants :

- La combinaison de feuillets (T/O ou T/O/T);
- Le type de cations dans l'octaèdre ;
- La charge de la couche ;
- Le type de matériel dans l'espace inter foliaire (cations, molécules d'eau, ...).

Quelques critères secondaires sont le polytypisme (ou mode d'empilement), la composition chimique, le type d'espèces argileuses et le mode d'empilement pour les inters stratifiés.

I.4.2 Catégories des minéraux argileux :

Les terres argileuses se répartissent alors en trois familles structurales :

I.4.2.1. La famille 1 :1(Les minéraux à 7Å)

: Ils sont constitués de feuillets comprenant une couche tétraédrique, accolée à une couche octaédrique, Son épaisseur est d'environ 7 Å, l'exemple le plus cité est la kaolinite.

I.4.2.2. La famille 2:1(Les minéraux à 10Å):

Cette structure comporte trois couches: deux tétraédriques encadrant une couche octaédrique, elle est variable en fonction du contenu de la couche inter foliaire de 9Å à 15Å, elle est de (9 Å si l'espace est vide (groupe à pyrophyllites-talcs) - 10 Å si les cations inter foliaires sont anhydres (cas de K⁺ pour le groupe des micas et micas durs) - 12,5 Å si les cations échangeables inter foliaires sont entourés d'une couche d'eau (cas de Na⁺ pour le groupe des smectites et celui des vermiculites) – 15 Å si les cations échangeables inter foliaires sont entourés de deux couches d'eau).

I.4.2.3. La famille 2 :1 :1(Les minéraux à 14Å) :

Cette famille est caractérisée par un feuillet à quatre couches (Te, Oc, Te, Oc) constitué en plus des trois couches de la série 2/1, par une couche octaédrique qui s'insère dans l'espace inter foliaire ; les chlorites, par exemple appartiennent à cette famille.

Et il trouve autre classe qui est le Minéraux inters stratifiés : L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus.

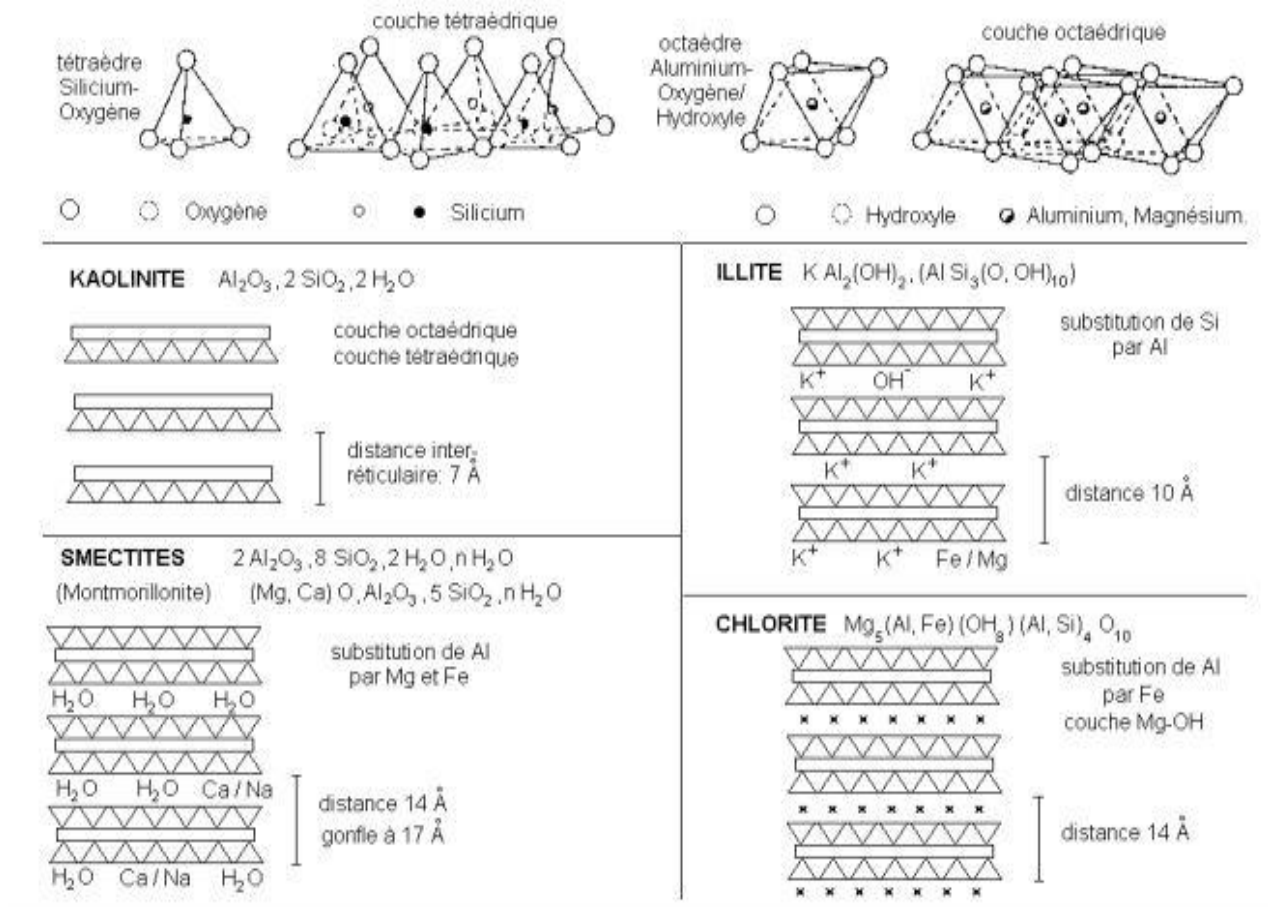


Figure 3 Structure des minéraux argileux [11].

I.5. Utilisation des argiles :

Depuis des millénaires, l'argile est une ressource essentielle pour les potiers, et elle est toujours utilisée aujourd'hui pour fabriquer des récipients destinés à la conservation des aliments et des boissons, tels que les vases et pots en argile. Actuellement, l'argile trouve des applications variées dans plusieurs secteurs à savoir :

- **Domaine pharmaceutique et médical**, l'argile est largement employée et sert de composant principal dans les pansements destinés aux traitements stomacaux et intestinaux. Elle est également un ingrédient actif dans des médicaments reconnus, comme le Smecta.
- **Cosmétique**, l'argile est appréciée pour ses propriétés d'excipient neutre et d'absorbant. Les smectites, en particulier, sont utilisées dans la production d'une multitude de produits cosmétiques, tels que les savons, shampoings, pommades, crèmes et dentifrices, où elles remplacent avantageusement les matières grasses.

* **Industrie**, l'argile est un élément clé dans la fabrication de matériaux comme le ciment, la céramique, les briques et les tuiles. Elle est également employée comme pigment et joue un rôle de catalyseur, notamment en tant que catalyseur acide dans le processus de conversion du toluène.

I.6. Matériaux argileux entrant dans la fabrication de la boue :

Les matériaux argileux présentent un intérêt dans les différents domaines industriels notamment les argiles utilisées dans le forage pétrolier d'une façon générale, comme les micas et les montmorillonites, la bentonite, la baryte minéral de base $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+) $n\text{H}_2\text{O}$, ils sont de structure fine et de haute plasticité, comprennent tous les phyllo-silicates ainsi que des espèces d'une structure assez semblable aux phyllo-silicates mais de caractéristiques physico-chimiques différentes. Le mélange de ces matériaux après leur traitement est utilisé dans la boue de forage pétrolier et gazier qui nécessite une qualité adéquate et résistant ou opération hydraulique et pétrolière pour avoir un rendement efficace.

I.7 La bentonite

I.7.1. Définition

La bentonite, une variété d'argile, se présente sous une forme friable et douce, offrant une sensation lisse au contact. Sa couleur varie du blanc au gris, parfois avec une nuance de jaune, influencée par les minéraux et les impuretés qui lui sont intimement liés. Cette roche est reconnue pour ses propriétés remarquables d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement. Par définition, les bentonites sont des argiles constituées principalement de montmorillonite, un silicate d'alumine hydraté. Elles se caractérisent par une structure en couches superposées, avec des cations échangeables, principalement du calcium (Ca) ou du sodium (Na), logés entre ces couches. Ces argiles sont reconnues pour leurs capacités d'hydratation exceptionnelles, ce qui leur vaut l'appellation d'argiles gonflantes.

Formule chimique générale: $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Al}, \text{Mg})_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})_3(\text{OH})_6n\text{H}_2\text{O}$ On en trouve de nombreuses variétés chimiques ou le Mg est remplacé par différents cation divalent, Fe, Mn, Cr.

I.8. Origine de la bentonite

L'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riches en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux, qui font partie principalement du groupe des smectite. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming, Etats-Unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de Vienne (France) [5,6]. En Algérie, les gisements de

bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'oranie (ouest algérien). On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et de celle de Mostaganem (M'sila) avec des réserves de deux millions de tonnes [6,7].

I.9 Les conditions de formation de la bentonite

La montmorillonite se trouve dans divers contextes géologiques :

- **Dans les sédiments** riches en magnésium avec un pH allant de légèrement à fortement alcalin, où un surplus de potassium peut entraîner la formation de micas.
- **Dans les sols**, spécifiquement les chernozems et les rendzines.
- **Comme produit d'altération** de :
 - Roches éruptives acides telles que les pegmatites.
 - Cendres volcaniques, comme celles de Fort Benton aux États-Unis.
 - Rhyolites, comme celles trouvées à Maghnia en Algérie.
 - Roches vitreuses acides, comme la smectite du sud de l'Espagne.

La montmorillonite peut aussi se former par altération hydrothermale, se localisant aux abords des gisements tandis que la kaolinite se développe à l'intérieur. Elle résulte également de la synthèse hydrothermale en présence de magnésium et dans des conditions de pH élevé.

I.10. Application de la bentonite

Les bentonites sont utilisées dans une multitude de secteurs, tels que le forage, la fonderie, la céramique, la peinture, la pharmacie et comme agents décolorants, parmi d'autres. La plus grande part de la bentonite extraite à l'échelle mondiale sert de liant pour le sable de fonderie et d'épaississant pour les boues de forage dans l'industrie de la fonderie. [8-10].

I.11 Structure de la bentonite

La montmorillonite, illustrée dans la Figure4 , représente le composant majeur de la bentonite. Il s'agit d'un phyllosilicate de type 2:1, appartenant à la famille des smectites, où la charge négative présente dans les couches est contrebalancée par une charge positive équivalente provenant de cations échangeables. Ces cations, qui incluent le (Ca^{+2} , Mg^{+2} , H^+ , K^+ , NH_4^+ et Na^+), se situent principalement entre les couches de silicate. Ils ne sont pas intégrés de manière fixe à la structure, ce qui leur confère une mobilité certaine.

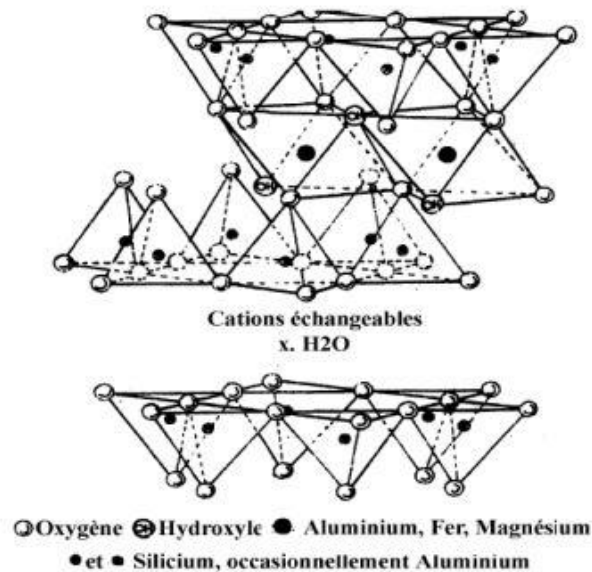


Figure 4: Structure de la montmorillonite [11].

I.12. Les différents types de bentonites :

Il existe trois catégories principales de bentonites qui sont disponibles sur le marché :

Les bentonites calciques: représentent la majorité des gisements extraits à l'échelle globale. Elles se caractérisent principalement par la présence d'ions calcium (Ca^{2+}) entre les couches de leurs structures. Ces argiles ont la capacité de gonfler, augmentant leur volume de 3 à 7 fois par rapport à leur taille originale [12].

Les bentonites sodiques : sont des argiles peu communes. Elles se distinguent par la présence d'ions sodium (Na^+) dans les espaces inter lamellaires. Ces argiles possèdent une capacité de gonflement considérable, pouvant atteindre de 12 à 18 fois leur volume initial [12].

Les bentonites sodiques artificielles: disponibles sur le marché sont produites par l'incorporation de carbonate de sodium (Na_2CO_3).

I.13. Les propriétés rhéologiques :

Les propriétés rhéologiques de la bentonite utilisée dans la boue pétrolière incluent les caractéristiques suivantes :

I.13.1 Viscosité :

La viscosité est une mesure de la résistance d'un fluide à l'écoulement. La bentonite dans la boue pétrolière aide à maintenir une viscosité adéquate, ce qui est essentiel pour transporter les déblais de forage à la surface.

I.13.2. Thixotropie:

La bentonite présente des propriétés thixotropiques, c'est-à-dire que sa viscosité diminue lorsqu'elle est agitée et augmente lorsqu'elle est au repos. Cela permet à la boue de rester fluide pendant la circulation et de se gélifier lorsqu'elle est statique, aidant ainsi à suspendre les particules solides.

I.13.3. Gel Strength (Force de gel):

La force de gel est la capacité de la boue à développer une structure gélifiée lorsqu'elle est au repos. Une bonne force de gel est importante pour éviter la décantation des particules solides dans le puits de forage lorsque la circulation de la boue est arrêtée.

I.13.4. Yield Point (Point de rendement):

Le point de rendement est une mesure de la capacité de la boue à transporter les déblais de forage. Il représente la force initiale nécessaire pour commencer à faire couler la boue.

Une bentonite efficace aide à obtenir un point de rendement élevé, favorisant ainsi le transport efficace des particules solides.

I.13.5. Viscosité plastique :

La viscosité plastique est une mesure de la résistance à l'écoulement sous contrainte continue. Elle est influencée par la concentration de solides dans la boue. Une bentonite de bonne qualité aide à maintenir une viscosité plastique adéquate, équilibrant la résistance et la facilité d'écoulement de la boue.

I.13.6. Propriétés de filtration :

La bentonite aide à réduire la perte de fluide de la boue dans les formations poreuses. De bonnes propriétés de filtration sont cruciales pour maintenir la stabilité du puits et minimiser les pertes de fluide.

Ces propriétés rhéologiques sont essentielles pour assurer une performance optimale de la boue de forage, en garantissant la suspension et le transport des déblais, en contrôlant la pression du puits et en stabilisant les parois du trou de forage.

I.14. Les propriétés de la bentonite industrielle.

Pour qu'une bentonite soit adaptée à un domaine industriel spécifique, elle doit posséder les caractéristiques physico-chimiques appropriées à ce domaine (Tableau 1).

Tableau N°1: bentonite, spécification minimales requis pour chaque application [13].

Qualité	Propriétés	Le marché	Production
Bentonite de 1^{ère} qualité			
Q1	-Na ₂ O supérieur à 2% -Indice de Gonflement (IG) supérieur à 20 -Al ₂ O ₃ Inférieur à 2% -SiO ₂ entre 55-65% -Ca O supérieur à 2%	-Pelletisation du minerai de fer. -Boue de forage -Fonderie. -Génie civile	-séchage à 10% d'humidité pour bouletage, vendu en Vrac ; -séchage à moins de 5% d'humidité et pulvérisation à 90% -Moins de 74µm, pour forage, fonderie et génie civil
Bentonite de 2^{ème} qualité			
Q2	-IG supérieure à 15 -Na ₂ O supérieur à 1% -Al ₂ O ₃ Inférieur à 20% -MgO inférieure 3% -Ca O inférieure à 4%	-Fonderie. -Génie civile -Bentonite de charge	- séchage à 10% d'humidité -maximum pulvérisation à 85-90% - Moins de 74µm en séchage
Bentonite de 3^{ème} qualité			
Q3	-IG entre 10 à 15 -Propriétés chimiques ne répondent pas aux classes 1 et 2 et au terres décolorantes	-traitement des eaux -bentonite de charge -Génie civil -applications modérées -Fonderie 2 ^{ème} qualité	- séchage à 10% d'humidité -maximum pulvérisation à 85-90% - Moins de 74µm en séchage
Bentonite 4^{ème} qualité : Terres décolorantes, huiles végétales			
Q4	-MgO Supérieure à 4% -IG supérieure à 8 -SiO ₂ Entre 55-65% -Al ₂ O ₃ inférieure à 18-21% -Fe inférieure à 4%	-Décoloration des huiles végétales. -Catalyseurs. -Milieu d'absorption d'insecticides	-séchage à 10% d'humidité -Classification ; -Digestion à l'acide sulfurique 44% en poids, -matières solubles, moins de 1% à l'état sec, -aires de surface 200 minimum
Bentonite de 3^{ème} qualité : Terres décolorantes, huiles minérales			
Q5	-MgO Supérieure à 3%. -IG supérieure à 10. -SiO ₂ Entre 55-65%. -Al ₂ O ₃ inférieure à 8-20%. -Fe inférieure à 2%.	Décoloration des huiles minérales. Milieu d'absorption d'insecticides. Désodorisant.	-séchage à 10% d'humidité -Classification ; -Digestion à l'acide sulfurique 28% en poids, -matières solubles, moins de 1% à l'état sec, -aires de surface 100 minimum

La bentonite est classée parmi les adsorbants inorganiques et les agents de dispersion minéraux, en raison de ses attributs physico-chimiques. Elle se distingue par une importante capacité de gonflement, rendue possible grâce à la présence de liaisons non saturées et à l'aptitude des interstices entre les feuillets à s'élargir par absorption d'eau. La distance inter lamellaire dans la montmorillonite anhydre est d'environ 9.5 Å. Cette distance peut s'accroître jusqu'à environ 20 Å dans un environnement à 99 % d'humidité relative [13].

I.15. Principaux usages de la bentonite :

Les bentonites sont polyvalentes et trouvent leur utilité dans de nombreux secteurs. Elles sont principalement employées comme liant dans le sable de moulage pour la fonderie et pour densifier les fluides de forage. Voici quelques-unes de leurs applications :

La bentonite est largement utilisée dans de nombreux secteurs industriels, Elle possède d'excellentes propriétés adsorbants, souvent utilisée en catalyse dans l'industrie du pétrole [14]. A l'état brut, sa plus importante application, après cuisson au dessus de 1000 °C, est la production de céramiques (porcelaine, faïence...etc). A l'état modifié, l'argile est utilisée dans l'industrie du papier, des produits cosmétiques, dans l'industrie pharmaceutique (fabrication des médicaments, tels: Smecta et Bedelix)[15,16]. Elle est utilisée pour la réalisation de barrières étanches pour les déchets industriels et ménager (géo membranes bentonitiques) et les déchets radio actifs (barrières ouvragées; poudres compactées) [17]. Pour la stabilité des forages de fait, de ses propriétés rhéologiques [18] ainsi que le confinement des métaux lourds dans le traitement de seaux contaminés par ces dernières [19]. A un degré moindre, la bentonite est utilisée dans de nombreux autres processus industriels tels que la fabrication des peintures, l'aménagement des routes en travaux publics [20]. En agriculture, la bentonite contribue à l'augmentation de la teneur en azote assimilable dans le sol, la bentonite améliore aussi les paramètres chimiques des sols sableux, l'application de la bentonite augmente la production agricole, l'économie de l'eau et les éléments fertilisants [21]

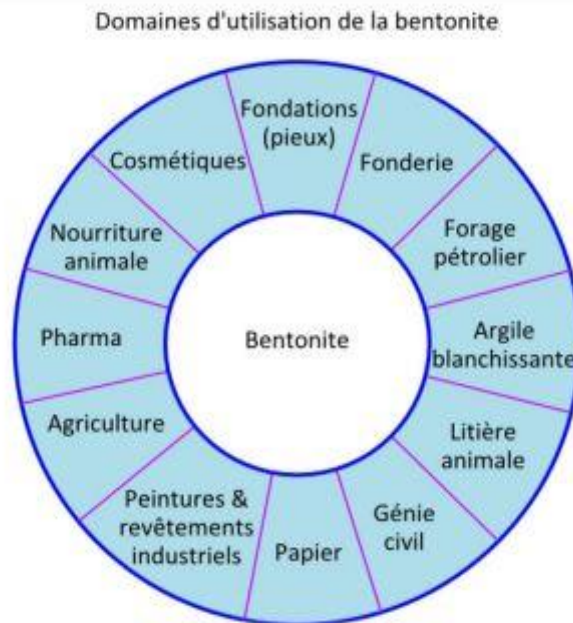


Figure5: Domaines industriels d'utilisation des bentonites.

I.16. La bentonite en Algérie

En Algérie, les gisements de bentonite ayant la plus grande valeur économique sont situés dans la région ouest du pays. Notamment, la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) se distingue avec des réserves estimées à un million de tonnes, tandis que le site de Mostaganem (M'zila) possède des réserves évaluées à deux millions de tonnes [22].

Tableau N°2 : Composition chimique de la bentonite de Maghnia[23].

Élément	%
SiO ₂	65.2
Al ₂ O ₃	17.5
Fe ₂ O ₃	2.1
MgO	4.25
TiO ₂	0.28
MnO	0.06
BaO	0.10
CaO	1.07
Na ₂ O	1.77
K ₂ O	0.72
PF	10.33
TOTAL	93.05
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3.72

I.17. Les avantages de la bentonite :

- Non toxique
- Dilution rapide et efficace dans de l'eau claire et saline
- Stable durant le forage
- Recyclable
- Faible coût de mise au rebut

CHAPITRE II

La boue de forage

II. Introduction :

Ce chapitre présente une vue d'ensemble de la boue de forage, en expliquant son rôle et son importance dans le processus de forage. Il aborde les différents types de boues de forage utilisées dans l'industrie pétrolière et gazière, ainsi que leurs caractéristiques et propriétés principales. De plus, il discute des composants de base de la boue de forage, tels que les fluides de base, les additifs et les agents de viscosité, et explique comment ces composants interagissent pour assurer le succès du forage.

II. 1. Définition :

La boue de forage, aussi appelée fluide de forage, est une substance fluide ou une suspension épaisse employée durant les opérations de forage dans les industries du pétrole et du gaz. Jouant un rôle clé dans le forage, elle remplit plusieurs fonctions essentielles. Composée principalement d'eau, d'additifs chimiques variés, et de substances de base telles que l'argile ou la bentonite, elle peut également contenir des particules lourdes pour en réguler la densité. Ses fonctions vitales incluent la consolidation des parois du puits, l'évacuation des déblais, la réfrigération et la lubrification des outils de forage, ainsi que la régulation de la pression du puits pour éviter les jaillissements de gaz ou de pétrole. Sa formulation et ses propriétés sont modulables selon les spécificités géologiques du site de forage pour en maximiser l'efficacité et la performance [24].

Les boues de forage constituent un ensemble de substances liquides (comme l'eau ou l'huile) et/ou gazeuses (telles que l'air ou le gaz naturel), enrichies d'additifs minéraux et organiques variés, incluant polymères, agents tensioactifs, argiles, déblais et ciment. La composition de ces boues peut être personnalisée pour répondre à des exigences précises, en ajustant la densité ou la proportion des différents éléments. Présentées pour la première fois en 1933 lors du Congrès Mondial du Pétrole, les boues de forage ont été détaillées dans un traité par Evans et Reid en 1936. En 1979, l'American Petroleum Institute (API) a caractérisé les boues de forage comme étant un fluide circulant de manière ininterrompue durant l'opération de forage [25]

Le fluide de forage est concocté dans des réservoirs spécifiques, avant d'être acheminé à travers les tiges de forage jusqu'à l'outil de coupe. De là, il remonte par l'espace annulaire, transportant avec lui les déblais générés par l'action de forage.

À la surface du puits, une série de procédures incluant le tamisage, la dilution et l'ajout de substances chimiques est mise en œuvre. Ces traitements ont pour but d'évacuer les déblais véhiculés par le fluide et de restaurer les caractéristiques physico-chimiques initiales du fluide de forage pour sa réutilisation.

II.3. Historique de la boue de forage :

L'utilisation des boues de forage date de plusieurs siècles, cependant, leur emploi intensif dans le secteur pétrolier contemporain a pris son essor au cours du XIXe siècle. Voici un aperçu de l'évolution des boues de forage :

Depuis l'Antiquité, les boues de forage ont évolué à partir de compositions simples d'eau et d'argile, parfois enrichies d'additifs naturels tels que le sang ou les excréments d'animaux, utilisées pour le forage de puits d'eau et de sel. Avec l'émergence de l'industrie pétrolière au XIXe siècle, la nécessité de forer à des profondeurs accrues a stimulé le développement de boues plus élaborées. Les premières formulations commerciales, bien que principalement aqueuses et argileuses, rencontraient des difficultés liées à la stabilité et à la gestion de la pression des puits. Le XXe siècle a marqué une avancée notable avec l'introduction des boues à base d'huile, améliorant le contrôle de la pression et la stabilité des forages. Les efforts de recherche post-Seconde Guerre mondiale ont abouti à des progrès significatifs dans les technologies de forage et les compositions des boues, avec l'intégration d'additifs chimiques avancés pour optimiser la viscosité, la suspension des déblais et la réaction aux argiles.

Aujourd'hui, les boues de forage sont devenues un élément crucial de l'industrie pétrolière et gazière, employées universellement dans les opérations de forage. Les recettes de ces boues se sont complexifiées, intégrant des chimiques spécialisés pour s'adapter aux défis géologiques spécifiques des sites de forage pétrolier et gazier. L'innovation continue avec le développement de technologies de pointe telles que les systèmes de circulation automatisés et les fluides de forage non aqueux, visant à accroître l'efficacité et la sécurité des processus de forage.

II.4. Les différents types de la boue de forage :

Dans l'exercice du forage, la boue de forage doit remplir plusieurs fonctions, parfois en tension les unes avec les autres, ce qui nécessite un équilibre délicat dans sa composition. À ses débuts, elle se composait essentiellement d'eau mélangée aux débris naturels du sol, y compris une quantité variable d'argile. Toutefois, l'accroissement des opérations de forage et la complexité croissante des conditions ont mené à l'adoption de boues de forage plus élaborées. Les boues traditionnelles à base d'eau et d'argile ont dû s'adapter pour supporter des températures plus hautes dans des forages toujours plus profonds. Parfois, selon les conditions spécifiques, les boues à base d'huile sont préférées. Récemment, une innovation a vu le jour avec les boues à base d'eau enrichies de polymères, sans argile, qui gagnent en popularité sur les sites de forage. Bien que nous n'abordions pas ici les boues allégées

contenant des gaz en émulsion, nous pouvons résumer la composition des boues à base d'eau et d'argile, celles à base d'eau et de polymère, ainsi que les boues à base d'huile [26].

II.4.1.Fluides de forage gazeux

Ce sont des fluides dont la phase continue est du gaz mélangé avec de l'eau en proportions variables provenant de la formation traversée (inévitablement) ou ajoutée avec prudence. le gaz peut être de l'air ou du gaz naturel, et peut appartenir à une mousse ou à un brouillard. Dans les fluides gazeux utilisés, on trouve: forage à l'air, forage à la boue aéré, forage à la mousse [27].

II.4.2.La boue à base d'eau:

Les boues à base d'eau, communément appelées "Water-BasedMuds" ou WBM, sont généralement composées de bentonites en suspension dans l'eau, à des concentrations variant de 30 à 60 g/L. Leurs propriétés rhéologiques et de filtration sont fréquemment modifiées à l'aide de polymères. Dans la composition de ces boues, la sélection des électrolytes et de leur concentration est effectuée en tenant compte des propriétés spécifiques de la formation géologique, telles que l'activité de l'eau dans les argiles et la solubilité des formations salines. Les additifs utilisés incluent des agents viscosifiants tels que des argiles naturelles (principalement des bentonites), des polymères synthétiques ou des bio polymères, ainsi que des agents réducteurs de filtrat qui renforcent le cake de filtration pour prévenir l'invasion du fluide, comme les amidons, les carboxyméthylcelluloses (CMC), les celluloses poly anioniques (PAC) et diverses résines. Pour contrôler le gonflement et la dispersion des argiles, on utilise des inhibiteurs tels que le KCl, le glycérol, les silicates ou différents polymères, notamment le polyacrylamide partiellement hydrolysé (PHPA) et les polyalkylène glycols (PAG). Des substances alourdissant comme la barytine (aussi connue sous le nom de "barite" ou sulfate de baryum $BaSO_4$) et la calcite (carbonate de calcium $CaCO_3$) sont couramment ajoutées pour obtenir la densité désirée de la boue. D'autres matériaux comme l'hématite (Fe_2O_3) ou la galène (PbS) sont également utilisés. La calcite est souvent privilégiée pour le forage des réservoirs en raison de sa solubilité dans l'acide et de la possibilité de varier sa granulométrie pour minimiser les pertes et les dommages. Enfin, des colmatant uniques tels que des matériaux granuleux (coquilles de noix), fibreux (fibres de bois, canne à sucre) et lamellaires (coquilles d'huîtres, céréales) sont parfois ajoutés [28]. Ces boues sont adaptées à tous les types de forages où une faible concentration en solides est requise pour les boues à base d'eau.

II.4.3Utilisation de la boue a base d'eau :

Lubrification et refroidissement

Évacuation des débris

- Stabilisation des parois du puits
- Contrôle de la pression
- Transmission des données
- Protection de la formation

Tableau N°3 : avantages et inconvénients de la boue a base d'eau [29]

Avantages	Inconvénients
augmentation de la vitesse d'avancement, réduction importante des pertes de charge, augmentation de la durée de vie des outils, possibilité de travailler en eau douce, de mer ou salée saturée, faible tonnage de produits mis en œuvre possibilité de contrôler les caractéristiques avec les produits classiques (C.M.C. etc.)	filtrat A.P.I. difficilement contrôlé à moins de 10 cm ³ /30 min, dégradation du bio polymère aux environs de 150°C, le bio polymère est fermentescible, d'où la nécessité d'ajouter un antiferment, prix élevé (dépend de consommation des produits).

II.4.3. La boue à base d'huile :

L'histoire de l'emploi d'huile dans les fluides de forage remonte aux débuts de l'industrie pétrolière à Oklahoma City entre 1934 et 1937, où l'on a observé une augmentation de l'efficacité de forage suite à l'introduction de pétrole brut. Les fluides de forage à base d'huile sont caractérisés par une phase continue d'huile minérale (comme le pétrole brut, le fuel ou le gazole) et une phase dispersée d'eau. On nomme "boues de forage en émulsion inverse" les fluides contenant plus de 5% d'eau, tandis que ceux avec moins de 5% d'eau sont appelés boues à l'huile [30].

Ces fluides sont fréquemment désignés sous le terme "Oil-Based Mud" ou OBM. Bien que le gazole ait été la phase continue la plus courante par le passé, les réglementations environnementales actuelles exigent l'utilisation d'huiles minérales ou synthétiques sans composés aromatiques. Pour assurer la stabilité de l'émulsion, des agents émulsifiants et mouillants sont employés. La thixotropie, une propriété rhéologique de l'émulsion, est modifiée grâce à l'ajout d'agents viscosifiants, souvent des argiles organophiles. Les formules peuvent aussi inclure des réducteurs de filtrat, tels que des composés asphalténiques et des polymères, ainsi que d'autres additifs spécifiques. Il est important de noter que la recherche actuelle se concentre principalement sur l'amélioration des boues inverses synthétiques en raison de leurs bénéfices économiques et écologiques par rapport aux fluides traditionnels à base de gazole [27].

II.4.3.1. Utilisation de la boue à l'huile

Les boues à l'huile sont principalement utilisées:

Pour le forage et le carottage des niveaux producteurs dans les sondages d'extension;

Pour les reprises et entretiens de puits productifs.

D'une manière générale pour tous les travaux au droit des horizons productifs.

II.4.3.2. Composition de la boue à l'huile

Une phase continue huile.

Une phase aqueuse dispersée (quelques pour cent en volume).

Tableau N°4: avantages et inconvénients de la boue a base d'huile [29]

Avantages	Inconvénients
<p>Contrôle aisé des caractéristiques en l'absence de venues d'eau ou de brut.</p> <p>Insensibilité aux contaminants habituels des boues à base d'eau (NaCl, CaSO₄, ciment, argile).</p> <p>Excellentes caractéristiques de filtration statique en température et pression, cake très mince</p> <p>Forage à densité inférieure ou égale à 1,00.</p> <p>Meilleur calibrage du trou.</p> <p>Réduction des frottements de la garniture sur les parois du puits ou diminution du couple de torsion et de l'usure de la garniture</p> <p>. Réduction des risques de bourrage d'outil et d'accumulation des déblais sur les drill-collars et diminution du "pistonnage" lors des manœuvres.</p> <p>Diminution du collage par pression différentielle.</p> <p>Meilleure récupération en carottage</p> <p>Carottes sur lesquelles il est possible de mieux approcher la valeur de la saturation en eau et en huile.</p> <p>Augmentation par rapport au forage en boue à l'eau, de la productivité.</p> <p>Moindres dommages à la formation.</p>	<p>Sensibilité à l'eau et à certains bruts.</p> <p>Risque de sédimentation des alourdisant.</p> <p>Manipulation salissante.</p> <p>Risque d'incendie.</p> <p>Détérioration des caoutchoucs ne résistant pas aux hydrocarbures.</p> <p>Difficultés pour déceler la présence d'huile de formation dans les déblais.</p> <p>Prix de revient au mm³ plus élevé que les boues à l'eau.</p> <p>Logistique plus importante.</p>

II.5. Le rôle des fluides du forage

Les fluides de forage doivent avoir des propriétés telles qu'ils facilitent, accélèrent-le forage, favorisent ou tout au moins ne réduisent pas d'une manière sensible et permanente les possibilités de production des sondages.

-La plupart des manuels sur les fluides de forage énumèrent entre 10 et 20 fonctions assurées par ces fluides dans le puits.

En général, les principaux rôles du fluide de forage sont :

II.5.1. Nettoyage des puits

Il est essentiel que la boue élimine les particules découpées lors du forage, connues sous le nom de « cuttings » ou « déblais », qui sont en réalité des fragments de roche.

II.5.2. Maintien des déblais en suspension

Le fluide de forage a pour double fonction d'évacuer les déblais de forage du puits lors des phases actives de circulation et de les garder en suspension durant les interruptions de cette circulation.

II.5.3. Sédimentation des déblais fins en surface

Bien que la boue doive conserver les déblais en suspension dans le puits pendant les pauses de circulation, elle doit également permettre la sédimentation des particules fines à la surface pour leur élimination. Ces deux fonctions peuvent sembler contradictoires, mais elles sont en réalité complémentaires et non incompatibles.

II.5.4. Refroidissement et lubrification de l'outil et du train de sonde

Lors de son trajet en surface, la boue circulante est plus froide que les formations géologiques, ce qui contribue à diminuer significativement la surchauffe de l'équipement de forage et de l'outil. Cette surchauffe résulte de la conversion d'une portion de l'énergie mécanique en chaleur.

II.5.5. Prévention du cavage et des resserrements des parois du puits

Il est nécessaire que la boue ait des propriétés physiques et chimiques appropriées pour maintenir le diamètre du puits proche de celui prévu par l'outil de forage. Le rétrécissement du puits, connu sous le nom de cavage, peut survenir à cause de plusieurs facteurs : l'effondrement des parois du puits, la dissolution des sels, la dispersion des argiles, ou l'érosion provoquée par le mouvement de la boue contre des formations géologiques fragiles. De plus, le rétrécissement peut également être dû à une pression hydrostatique insuffisante dans la colonne de boue, incapable de contrebalancer la pression exercée par les roches environnantes.

II.5.6. Dépôt d'un cake imperméable

Lorsque la phase liquide de la boue filtre à travers les couches perméables, elle forme un revêtement sur les parois du forage, connu sous le nom de cake. Ce dépôt de cake joue un rôle clé dans le renforcement et la diminution de la perméabilité des parois du puits.

II.5.7. Prévention des venues d'eau, de gaz, ou d'huile

Pour prévenir l'écoulement des fluides des réservoirs traversés pendant le forage vers le puits, il est crucial que la boue génère une pression hydrostatique adéquate pour compenser les pressions existantes dans le gisement. La pression hydrostatique nécessaire est régulée en modulant la densité de la boue, en la maintenant entre des seuils maximum et minimum.

II.5.8. Augmentation de la vitesse d'avancement

Tout comme le poids exercé sur l'outil, la vitesse de rotation et le débit du fluide influencent les performances de forage, le choix et les propriétés de la boue déterminent également la rapidité de progression, la longévité des outils et l'efficacité des manœuvres. Un taux de filtrat élevé peut accélérer le forage, tandis que des viscosités très basses favorisent l'efficacité de pénétration des outils.

II.5.9. Entraînement d'outils (turbine, MWD, etc.)

Lors du turboforage, la boue est responsable de la mise en rotation de la turbine. Ce processus, qui nécessite le passage de la boue à travers une série de conduits pour actionner les pales de la turbine, exige des caractéristiques spécifiques de la boue et rend l'emploi de certains additifs, comme les agents de colmatage, soit impossible, soit extrêmement difficile à gérer.

II.5.10. Diminution du poids apparent du matériel de sondage

La présence d'un fluide de densité spécifique dans le puits, bien que principalement une conséquence plutôt qu'une fonction, contribue à alléger le poids apparent de l'équipement de sondage, y compris la garniture de forage et les tubages, ce qui a pour effet de diminuer la puissance nécessaire pour le levage.

II.5.11. Apport de renseignements sur le sondage

La boue fournit des informations continues sur les changements des formations géologiques et des fluides rencontrés. Ces informations sont recueillies de plusieurs manières :

- À travers les déblais qui remontent durant la circulation du fluide,
- Par le suivi des modifications des propriétés physiques et chimiques de la boue,
- Et grâce à l'identification de gaz ou d'autres fluides qui se mélangent à la boue.

II.5.12. Contamination des formations productrices

Lorsqu'un fluide se trouve face à des couches poreuses et perméables, il peut créer une pression hydrostatique qui dépasse la pression naturelle du gisement. Cette situation peut être préjudiciable à l'exploitation future de cette zone.

II.5.13. Corrosion et usure du matériel

Le fluide de forage peut effectivement accélérer l'usure de l'équipement de sondage par une action mécanique, notamment s'il contient des particules abrasives. De plus, il peut avoir un effet corrosif en raison d'une action électrolytique, souvent causée par la présence d'ions et un déséquilibre chimique.

II.5.14. Toxicité et sécurité

Reformulez ce paragraphe : La boue de forage ne devra pas présenter de danger pour la santé du personnel. Elle ne devra pas non plus créer de risques d'incendie, tout particulièrement dans le cas d'utilisation de boues à base d'huile [31].

II.6. Circuit de la boue

1. Après avoir été mélangée, la boue est stockée dans un réservoir de décantation.
2. Elle est ensuite pompée à travers la tige de forage, descendant jusqu'à la base du puits.
3. En sortant par l'extrémité de la tige, la boue atteint le fond du puits où elle rencontre le trépan en action.
4. La boue remonte, entraînant avec elle les déblais, ces fragments de roche détachés par le trépan.
5. Elle continue son ascension dans l'espace annulaire, situé entre la tige de forage et les parois du puits. La tige de forage mesure typiquement 10 centimètres de diamètre, tandis que le puits peut atteindre 20 centimètres de diamètre à sa base.
6. En surface, la boue est dirigée vers un tamis vibrant par une conduite spécifique.
7. Ce tamis, composé de grilles métalliques vibrantes, filtre la boue des déblais. La boue filtrée retourne au réservoir de décantation.
8. Un traitement plus complexe est ensuite réalisé grâce à divers équipements de purification mécanique.
9. Les déblais sont évacués le long d'une glissière et, selon les exigences environnementales, peuvent être nettoyés avant leur élimination. Des échantillons de déblais sont collectés pour analyse géologique, permettant d'étudier les caractéristiques des formations rocheuses au fond du puits [32].

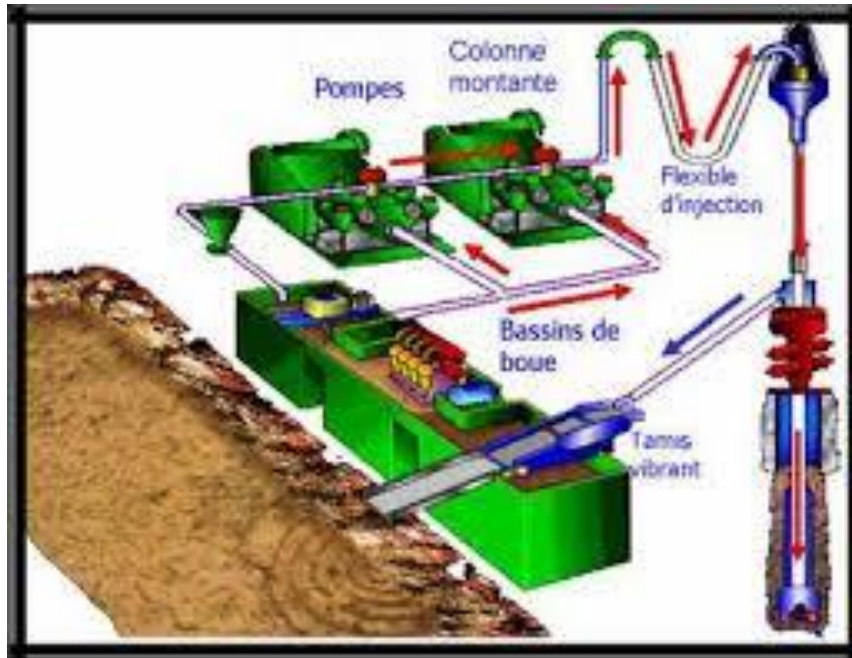


Figure 6 :circuit de la boue de forage [32].

II.7.Caractéristiques des fluides de forage :

Pour assurer efficacement sa fonction, la boue de forage doit présenter des propriétés physiques et chimiques spécifiques, qui sont soumises à une surveillance constante [34].

II.7.1 Filtration[33]

Le processus de filtration dans un milieu poreux et perméable par une suspension argileuse peut être résumé ainsi :

- Si les particules de boue sont plus petites que les pores, elles traversent complètement, agissant comme un système monophasique. Cela peut entraîner des pertes de circulation, mais peut être limité par les propriétés rhéologiques si la pression est faible.
- Si seulement certaines particules sont plus grandes que les pores, elles seront retenues, formant un film imperméable avec le temps, tandis que le liquide et les particules fines continueront à pénétrer, ce qui est le principe de la filtration.
- Si toutes les particules sont plus grandes que les pores, seul le liquide filtrera à travers, la perméabilité du cake déterminant la quantité de filtration.

II.7.2 Teneur en solides, en eau et en huile : [33]

La compréhension précise des niveaux de solides, d'eau et d'huile présents dans une boue de forage revêt une importance majeure. Cela est particulièrement vrai pour les boues qui ont été alourdies afin d'augmenter leur densité, ainsi que pour celles qui sont sous forme d'émulsion. Ces concentrations influencent directement la performance de la boue en termes de capacité de portance des déblais, de contrôle de la pression du puits et de protection des formations

géologiques. De plus, elles affectent la stabilité chimique et physique de la boue, ce qui peut avoir un impact sur l'efficacité du forage et la sécurité des opérations. Par conséquent, un suivi rigoureux et une gestion adaptée de ces composants sont essentiels pour maintenir l'efficacité du processus de forage et minimiser les risques environnementaux et opérationnels.

II.7.3 Densité et masse volumique : [35]

La densité est un nombre sans dimension qui compare la masse volumique d'une substance à celle d'un corps de référence (l'eau pour les solides et liquides, l'air pour les gaz) dans des conditions spécifiées. La masse volumique, mesurée en grammes par centimètre cube ou en kilogrammes par mètre cube, est le rapport de la masse d'une substance à son volume sous des conditions de pression et température définies. Dans les pays anglo-saxons, la densité est appelée "specificgravity" et est exprimée de la même manière.

La densité des boues de forage est déterminée en utilisant un densimètre, qui fonctionne sur un principe similaire à celui d'une balance romaine avec curseur. Ces appareils offrent une lecture directe de la densité ou de la masse volumique.

II.7.4 Rhéologie: [35]

La rhéologie est l'étude des déformations et de l'écoulement de la matière. Pour les boues de forage, cela implique des caractéristiques telles que la viscosité et la formation de gels, dont la surveillance est cruciale. Ces propriétés influencent directement l'efficacité des pompes, la pression de refoulement, la protection des zones fragiles, l'élimination des déblais en surface et le nettoyage du puits.

II.7.5 L'alcalinité : [33]

Le pH des boues de forage, qui mesure leur alcalinité, est influencé par la présence d'ions hydroxyle, carbonate et bicarbonate. Bien que les phosphates, aluminates et bases organiques puissent également affecter le pH, leur impact est moindre. Ces ions proviennent principalement de la soude, du carbonate de sodium et de la chaux éteinte. On mesure l'alcalinité à l'aide de trois indicateurs : Pf et MF pour le filtrat, et Pb pour la boue, où "P" représente la phénolphtaléine, "M" le méthylorange, "f" le filtrat, et "b" la boue. La phénolphtaléine change de couleur à un pH de 8,3, tandis que le méthylorange vire à 4,3. Le bleu de bromophénol est souvent utilisé à la place du méthylorange car il offre une indication plus claire, surtout dans les filtrats colorés.

II.8.Composition des différents types de la boue de forage :

Au fil du temps, les fluides de forage ont progressé depuis leur forme initiale, une simple boue composée d'eau et d'argile, vers des formulations de plus en plus sophistiquées. Ces systèmes modernes intègrent de l'eau ou de l'huile et sont enrichis d'une variété d'additifs conçus pour répondre à des exigences spécifiques et résoudre des problèmes particuliers. Les fluides de forage sont classifiés selon le type de substance principale qu'ils contiennent, qui peut être l'air, l'eau ou l'huile, en fonction de laquelle ils sont préparés [37].Les boues de forage doivent répondre à des critères divers, parfois même antagonistes. Elles requièrent une viscosité suffisante pour transporter efficacement les déblais à la surface, tout en maintenant cette viscosité à un niveau modéré pour réduire la résistance au flux et prévenir la rupture des formations géologiques. Pour atteindre ces propriétés spécifiques, une variété d'ingrédients multifonctionnels est intégrée dans la composition des boues. Ces ingrédients peuvent être approximativement regroupés en 20 catégories distinctes[38]

Tableau N°5: Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage[38]

1	Contrôleurs d'alcalinité	11	Lubrifiants
2	Bactéricides	12	Décoincants (ou dégrippants)
3	Anti-calcium	13	Inhibiteurs de gonflement des argiles
4	Inhibiteurs de corrosion	14	Produits facilitant la séparation
5	Anti-mousses	15	Stabilisants haute température
6	Agents moussants	16	Défloculants
7	Emulsifiants	17	Viscosifiants
8	Réducteurs de filtrat	18	Alourdissants
9	Floculants	19	Saumure
10	Colmatants	20	Huile minérale ou organique

II.9.Quelques produits additifs dans la boue (water basedmud) :

II.9.1. PAC-LV :

Le PAC-LV (Polycellulose anionique à faible viscosité) est un polymère hydrosoluble couramment utilisé comme additif dans les fluides de forage. Il est dérivé de la cellulose, un polymère naturel présent dans les plantes.

II.9.1.1. Les principales fonctions dans le forage horizontal**II.9.1.2. Stabilité du trou de forage :**

Lorsque le puits est dévié de la verticale vers l'horizontale, les formations rocheuses rencontrées peuvent poser des défis tels que l'éboulement ou l'effondrement. Le PAC-LV forme une fine couche filtrante imperméable sur les parois du puits, empêchant la migration des fluides de forage dans la formation. Cela contribue à maintenir l'intégrité du puits et à réduire les risques de problèmes de stabilité[39].

II.9.1.2. Réduction des dommages à la formation :

Les dommages à la formation se produisent lorsque les fluides de forage envahissent la perméabilité du réservoir. Le PAC-LV, avec sa faible viscosité et son contrôle élevé de la filtration, minimise cette invasion de fluide et les dommages à la formation[39].

En résumé, le PAC-LV améliore la stabilité du trou de forage et réduit les risques de dommages à la formation, contribuant ainsi à une opération de forage plus efficace.

II.9.2. Soda Ash:

Le soda ash, également connu sous le nom de **carbonate de sodium**, est un sel inorganique utilisé dans divers domaines, y compris l'industrie du forage[40].

II.9.2.1. Role de Soda Ash :**II.9.2.2. Contrôle du pH :**

Le soda ash maintient l'équilibre du pH dans la boue de forage. Cela est crucial pour protéger l'équipement de forage contre la corrosion et assurer l'efficacité du processus de forage[40].

II.9.2.3. Amélioration des propriétés de la boue :

L'ajout de soda ash à la boue de forage réduit la concentration d'ions calcium, évitant ainsi l'épaississement de la boue et le gonflement de l'argile. Cela permet des opérations de forage plus fluides, moins de problèmes en fond de puits et une vitesse de forage accrue[40].

En résumé, le soda ash joue un rôle clé dans le contrôle du pH, l'amélioration des propriétés de la boue et la prévention de la corrosion de l'équipement de forage.

Tableau N°6 : données techniques et analyse de SODA ASH[40]

Propriété	Exigences
Formule	Na ₂ CO ₃
Masse moléculaire	105.99
Densité spécifique	2.533
Point d'ébullition	Se décompose
Point de fusion	854degrés Celsius
pH	11.3
Point d'éclair	Aucun
Inflammabilité	Ininflammable
Solubilité dans l'eau	Soluble
Solubilité dans l'huile	Non soluble

II.9.3. Caustic soda :

Le caustic soda, également connu sous le nom d'hydroxyde de sodium (NaOH), est un sel inorganique utilisé dans l'industrie du forage[41] .

II.9.3.1. Le rôle de caustic soda dans la boue de forage :**II.9.3.2. Contrôle du pH :**

Le caustic soda permet de maintenir ou d'augmenter le pH de la boue de forage. En augmentant le pH, il précipite le magnésium (Mg²⁺) et supprime le calcium (Ca²⁺) dans les eaux à haute dureté telles que l'eau de mer. Cela réduit la corrosion et neutralise les gaz acides tels que le dioxyde de carbone (CO₂) et le sulfure d'hydrogène (H₂S) [41] .

II.9.3.3. Amélioration des propriétés de la boue :

L'ajout de caustic soda à la boue de forage augmente l'hydratation des argiles dispersées. Dans les boues à base de chaux, il réduit la solubilité de la chaux. En résumé, le caustic soda joue un rôle clé dans le contrôle du pH, la réduction de la corrosion et l'amélioration des propriétés de la boue de forage.

II.9.4. Le Barazan D :

Le Barazan D est un additif utilisé dans les fluides de forage [42].

II.9.4.1. Le role de Barazan D :**II.9.4.2. Viscosification :**

Le Barazan D est un polymère de gomme de xanthane en poudre. Il viscosifie les fluides à base d'eau douce, d'eau de mer et de saumure. En augmentant la viscosité, il améliore la suspension des déblais de forage, du sable grossier et du gravier[42] .

II.9.4.3. Suspension des agents de pontage :

Il permet de maintenir en suspension les agents de pontage et les matériaux de lestage dans les systèmes à base d'eau douce et de saumure.

II.9.4.4. Propriétés thixotropes :

Le Barazan D confère des propriétés thixotropes et un écoulement non newtonien sur une large plage de salinité, sans nécessiter d'argiles.

II.9.4.5. Stabilité à haute température :

Il peut être utilisé jusqu'à 250°F (121°C) sans se dégrader[42].

En résumé, le Barazan D améliore la viscosité, la suspension et la stabilité des fluides de forage.

II.9.5. Le chlorure de potassium (KCl) :

Le chlorure de potassium (**KCl**) est un sel soluble qui joue un rôle essentiel dans la boue de forage.

II.9.5.1. Le rôle de chlorure de potassium (KCl) :**II.9.5.2. Stabilisation des argiles et des schistes sensibles à l'eau :**

Le KCl est un excellent stabilisateur des schistes hydro-sensibles et des argiles lors du forage. Il agit par échange d'ions : les ions potassium pénètrent entre les plaquettes d'argile individuelles dans le schiste, les maintenant ensemble. Cela empêche l'entrée d'eau provenant du fluide de forage [43].

II.9.5.3. Contrôle de l'instabilité des schistes :

Le KCl permet de contrôler l'instabilité des schistes en échangeant les cations potassium avec la structure des schistes. Cela est bénéfique pour stabiliser les anciennes formations de schiste. De plus, le KCl inhibe le gonflement et l'adoucissement des mudstones causés par l'eau, améliorant ainsi la stabilité du puits_[44].

En résumé, le KCl est un élément clé pour maintenir la stabilité du puits et éviter les problèmes liés aux argiles et aux schistes pendant le forage.

II.9.6. Le CS STARCH :

Le CS STARCH (amidon) est un additif utilisé dans les boues de forage pour améliorer leurs propriétés.

II.9.6.1. Le rôle de CS STARCH :**II.9.6.2. Contrôle de la viscosité :**

L'amidon contribue à augmenter la viscosité de la boue de forage. Il contient deux composants importants : l'amylose et l'amylopectine. L'amylose aide à améliorer les propriétés de la boue, notamment la viscosité et le contrôle des pertes de fluide[45].

II.9.6.3. Réduction des pertes de fluide :

L'amidon aide à contrôler la perte de fluide pendant le forage. En ajoutant de l'amidon à la boue, on peut réduire la quantité de fluide perdue dans la formation géologique[45].

En résumé, le starch est un additif qui améliore la viscosité et contrôle les pertes de fluide dans les boues de forage.

II.9.7. Carbonate de calcium (CaCO₃) :

Le carbonate de calcium (CaCO₃), également connu sous le nom de "calcaire" ou "craie", joue un rôle essentiel dans les boues de forage.

II.9.7.1. Le rôle de CaCO₃ :**II.9.7.2. Réduction des pertes de fluide :**

Le carbonate de calcium aide à réduire la perte de fluide vers la formation en améliorant les propriétés de formation de gâteau de la boue de forage. Il scelle les formations perméables, empêchant ainsi la perte de fluide [46].

II.9.7.3. Augmentation de la densité de la boue :

En tant qu'agent de densification, le carbonate de calcium augmente la densité des fluides de forage. Cela permet de gérer la pression dans le puits et d'éviter les influx de fluide depuis la formation.

II.9.7.4. Écologique et économique :

Contrairement à d'autres matériaux, le carbonate de calcium n'a pas d'effets toxiques et peut être éliminé en toute sécurité après les opérations de forage. De plus, il est facilement soluble dans l'acide, ce qui permet de le retirer rapidement du puits lorsque nécessaire.

En résumé, le carbonate de calcium est un additif essentiel pour le succès des opérations de forage, contribuant à la stabilité du puits et à la gestion des fluides.

CHAPITRE III

Partie Expérimentale

Matériels et méthodes

III.1. Présentation de l'ENSP:

L'ENSP est un groupe de services parapétroliers elle été créée en août 1981, issue de la restructuration dusecteur de l'énergie et des industries pétrochimiques. Elle regroupe une grande partie des services se rapportant à la fonction puits. L'ENSP à comme objectif satisfaire durablement, par l'innovation et l'action, les besoins de SONATARCH et de ses associés étrangers. Au delà de son professionnalisme, l'ENSP est un groupe animé par une volonté de dialogue et de transparence. La compétence et la richesse des expériences de 2700 agents sont des atouts majeurs de l'ENSP.

Avec plus d'une trentaine d'activités, le groupe ENSP est un groupe solide, centré sur ses métiers de base et disposant de perspectives de croissance importante. "

III.1.1. Présentation de DFSP :

DFSP est l'abréviation de DrilingFluids Services aux Puits Elle a été nationalisée en institution nationale en 2022 après avoir été baptisée BASP est l'abréviation Baroid Algeria de Services aux Puits. Elle est la Joint- venture entre ENSP 40% et BAROID (Halliburton) 60%, elle a été créée en 2003.



Figure 7 :Emplacement de DFSP

III.1.1.1. Activités principales de DFSP :

- Fournit des solutions techniques des fluides de forage.
- La distribution des produits de la boue de forage
- La mise à disposition de techniciens hautement qualifiés
- La mise à disposition des Cabines répondante aux exigences de nos clients
- Services Epuration mécanique & gestion des déchets de forage
- Central à boue (Fabrication et livraison de la boue)

III.1.1.2. Les différents départements de DFSP :**• Département des opérations:**

- centrale à boue fixe.
- centrale à boue mobile.
- solide contrôle.
- service technique

Département du transport

Département approvisionnement.

Département finance et comptabilité.

Département moyen généraux.

Département HSE.

III.1.1.3. Présentation de services laboratoire DFSP :

L'Entreprise DFSP possède plusieurs départements (mentionnées dans la première partie de ce rapport), et chacun de ces départements assurent des tâches bien spécifiques pour un unique objectif qui est la satisfaction de client en matière de produits et d'équipements et d'offrir une variété de services liés à la boue de forage.

Parmi ces départements on trouve le département des opérations qui inclue plusieurs services y compris le service technique (service laboratoire) qui est dirigé par un ensemble de personnels qualifiés, dont les tâches :

- Fabrication des échantillons de boue (dévers formulations) pour les tenders.
- Faire des tests (Classiques et spéciaux) sur des échantillons de boue selon la demande du client.
- Investigation sur des nouvelles formules.
- Optimisation des formules de boue (selon des conditions bien spécifiques).



Figure 8:vu générale de laboratoire DFSP

III.1.2. Formule d'échantillons :

Dans ce travail on a préparé quatre échantillons de la boue de forage pétrolier selon les proportions suivantes tableau :

Tableau N°7 : formulation de boue de forage a base d'eau[46]

	Materiel	SG	Concentration	Montant de test (g)	Temp de mixage
1	Eau (DZ-HME)	1.00	0.86 m ³ /m ³	431.00 g	00 min
2	Soda Ash (DZ-HME)	2.50	1.00 kg/m ³	0.50 g	5 min
3	Bentonite (DZ-HME)	2.50	30.00 kg/m ³	15.00 g	5 min
4	Caustic soda(NAOH) (DZ-HME)	2.13	1.80 kg/m ³	0.90 g	5 min
5	KCl (Potassium chloride)	1.99	30.00 kg/m ³	15.00 g	5 min
6	CS STARCH	1.50	20.00 kg/m ³	10.00 g	10 min
7	PAC-L (DZ-HME)	1.60	8.60 kg/m ³	4.30 g	5 min
8	Barazan (DZ-HME)	1.60	1.00 kg/m ³	0.50 g	10 min
9	CaCO ₃ (Calcium Carbonate)	2.71	246.05 kg/m ³	123.02 g	15 min
	Somme			600.22 g	60 min

Dans ces échantillons on a remplacé progressivement la bentonite par un matériau argileux inorganique de la région de Msila (**HODNITE**) figure 16 :



Figure 16 : Argile HODNIT

échantillon 1 : 100 % bentonite

échantillon 2 : 3/2 bentonite + 1/3 hodnite

échantillon 3 : 50% bentonite + 50% hodnite

échantillon 4 : 100% hodnite

III.2. Modes opératoire :

III.2. 1. La Spectroscopie Infrarouge

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) est une technique d'analyse physico-chimique qui examine les liaisons entre les noyaux atomiques et leur disposition. Cette méthode permet de déterminer qualitativement les dépôts générés par plasma sur des substrats faiblement absorbants, comme le silicium cristallin intrinsèque ou faiblement dopé. Elle offre un accès direct aux informations moléculaires et à la nature chimique du matériau analysé, ce qui permet de corrélérer les propriétés physiques du film déposé avec les conditions de traitement.

Les spectres infrarouges ont été enregistrés à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier de type JASCO FT/IR-4200, fabriqué en France. Les spectres IRTF sont obtenus en

mélangeant les échantillons avec du KBr et en préparant des plaquettes classiques à l'aide d'une presse de laboratoire. La plage d'absorption est comprise entre 4000 et 400 cm^{-1} . L'appareil d'IRTF est présenté dans la figure XX.



Figure 10 : L'appareil d'IRTF/IR-4200

III.2.2. La Diffraction de Rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une méthode de caractérisation physico-chimique permettant de décrire la structure d'une substance. Cette technique est particulièrement puissante pour l'étude des solides cristallins, mais elle est également utilisée pour analyser les verres et les liquides. Grâce à cette méthode, il est possible de déterminer la structure (symétrie du cristal, paramètres du réseau, distribution des atomes dans la maille élémentaire), la texture (dimensions des cristallites, contraintes internes du réseau) et la composition qualitative, en se basant sur la position et l'intensité des pics de diffraction.

L'état cristallin se caractérise par une distribution périodique des unités atomiques dans l'espace sur trois dimensions. Cette distribution ordonnée forme des plans parallèles et équidistants appelés plans réticulaires (h, k, l). La distance interréticulaire, qui varie entre 0,15 et 15 Å, dépend de la disposition et du diamètre des atomes dans le réseau cristallin. Ces distances sont des constantes caractéristiques du cristal et peuvent être déterminées par diffraction des rayons X. La longueur d'onde des rayons X ($0,2 < \lambda < 2 \text{ \AA}$) est de l'ordre de grandeur des distances interatomiques. La diffraction repose sur l'interaction entre les rayons X et le matériau cristallin. Lorsque le faisceau de rayons X est dirigé vers un cristal, une partie

est absorbée et une autre partie est réfléchiée par les plans réticulaires. Cette interaction provoque un déplacement des nuages électroniques autour des noyaux, entraînant une diffusion de type Rayleigh, c'est-à-dire une réémission d'ondes électromagnétiques de même nature. Ces ondes réémises interfèrent les unes avec les autres de manière constructive ou destructive. L'intensité des flux de photons X recueillis dépend de la direction spatiale, ce qui forme le phénomène de diffraction des rayons X

L'analyse a été effectuée à l'aide d'un diffractomètre à haut score X'Pert (Pro PW3209, PANalytical, fabriqué en France). Le diagramme de diffraction équatoriale (2θ) a été enregistré de 0° à 100° avec un rayonnement $\text{CuK}\alpha$ sous 40 kV et 20 mA(**Figure 9**):



Figure 11 :Appareil de DRXPro PW3209

III.2. 3. Spectrométrie de fluorescence X :

L'analyse par fluorescence X est une technique permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques présents dans un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour une variété de matériaux tels que les minéraux, les céramiques, le ciment, les métaux, les huiles, l'eau et le verre. L'échantillon peut se présenter sous forme solide ou liquide. L'échantillon est placé sous un faisceau de rayons X. Sous l'action de ces rayons, les atomes qui composent l'échantillon passent de l'état fondamental à un état excité. Cet état excité étant instable, les atomes tendent à revenir à l'état fondamental en émettant de l'énergie

sous forme de photons X. Chaque atome, avec sa propre configuration électronique, émet des photons d'une énergie et d'une longueur d'onde spécifiques. Ce phénomène, appelé fluorescence X, est une émission secondaire de rayons X, caractéristique des atomes présents dans l'échantillon. L'analyse de ces radiations X secondaires permet de déterminer à la fois les propriétés des éléments chimiques présents dans l'échantillon et leurs concentrations massiques



Figure 12: X-RAY FluorecenceS8

III.2.4. Mesure de la densité (Le Densimètre):

Au niveau de laboratoire, la densité des boues de forage se mesure à l'aide d'un densimètre dont le principe est analogue à celui de la balance romaine à curseur.

Certains de ces densimètres permettent de lire directement les densités, les poids volumiques en livres/gallon, livres par cubic foot et les pressions exercées par la colonne de boue en PSI par 1000 Feet.

III.2.4.1. Mode d'emploi :

Remplir le godet de boue à mesurer.

Mettre le couvercle et évacuer l'excès de boue qui sort par le trou central du couvercle prévu à cet effet.

Nettoyer à l'eau et sécher en prenant soin de maintenir le trou du couvercle obstrué en permanence.

- Placer les couteaux du fléau dans le porte-couteau du socle.

Déplacer le curseur jusqu'à obtenir l'horizontalité du fléau. Cette horizontalité doit être contrôlée à l'aide du niveau du bulle situé au dessus des couteaux. Lire la densité ou le poids volumique directement sur le bras du fléau, au droit de la position du curseur.

III.2.4. 2. Etalonnage:

Remplir le godet d'eau pure.

Placer le curseur sur la densité 1,00 ou le poids volumique correspondant à celui de l'eau pure si l'horizontalité n'est pas obtenue, ajuster en modifiant la tare prévue à cet effet à l'extrémité du bras du fléau.

Cet étalonnage nécessaire n'est pas suffisant. Il est indispensable de renouveler l'opération précédente avec un liquide de densité connue (contrôlée sur une balance au laboratoire par exemple) d'une valeur égale ou supérieure à 1, 50.

Si le premier étalonnage est correct et que le second ne l'est pas, il faut renvoyer ce densimètre au laboratoire, l'étalonnage devant s'avérer délicat ou impossible.

III.2.4. 3. Avantage des densimètres :

Ce sont des appareils de chantier robustes, permettant de mesurer des densités de 0,95 à 2,20.

Les résultats ne sont pas affectés par les changements de températures (étant donné la précision requise).

III.2.4. 4. Densimètre pressurisé :

Ce densimètre peut aussi être utilisé avec profit pour les boues. Sa mise en œuvre ne diffère de celle du densimètre classique que par la présence d'une pompe manuelle qui permet de comprimer le gaz dans la coupe.



Figure 13 :Densimèrefann model 150

III.2.5. La rhéologie:

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

Une force appliquée à un corps lui fait subir une déformation. Pour un solide, il y aura déformation élastique si le corps revient à son état premier dès qu'on cesse d'appliquer cette force (c'est le cas de l'élastique que l'on étire) ou déformation plastique s'il revient à son état premier sous l'action d'autres forces (c'est le cas de la boule de mastic que l'on déforme). Pour un fluide, l'action d'une force donne un écoulement. [6]

III.2.5.1. Détermination expérimentale des caractéristiques rhéologiques Dans la profession:

L'appareils utilisé est :

Viscosimètre Fann:

III.2.5. 2.Principe:

Le Fann est l'appareil qui permet de déterminer le rhéogramme du fluide de forage. c'est-à-dire la loi d'écoulement qui est représentée par la fonction: $t = f(y)$



Figure 14 : Viscosimetre cylindre fann model 35SA

III.2.5.3. Mode d'emploi:

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

III.2.6. filtre presse API:

III.2.6. 1. Principe:

On soumet la boue à une pression de 100 PSI (7 bar) dans un cylindre normalisé doté d'une surface perméable, de section et perméabilité normalisées. On note la quantité de liquide qui filtre en 30 minutes, à température ambiante, c'est le filtrat API.

Les solides déposés pendant la filtration constituent ce que l'on appelle le cake, l'épaisseur du cake est mesurée et notée.

La filtration s'effectue donc en statique, à température ambiante ce qui ne reflète qu'imparfaitement les conditions de filtration dans le sondage.

III.2.6. 2. Description et mode d'emploi

Le filtre-presse se compose essentiellement d'un étrier muni d'une vis de serrage permettant le blocage des trois parties du corps du filtre (Figure 111.6). Ce corps se compose:

d'une embase percée d'un trou et dotée d'un ajutage par lequel s'écoule le filtrat. Cette embase supporte un tamis métallique de 60 à 80 mesh sur lequel est placé le papier filtre de 90 mm de diamètre (surface de filtration 7 pouces carrés) du type WHATMAN no 50 dont l'équivalent est le type Durieux bleu no 3.

L'ensemble tamis et papier est placé entre deux joints plats qui assurent l'étanchéité entre l'embase et le cylindre.

- d'un cylindre de diamètre intérieur 3 pouces (76,2 mm) et de hauteur 5 pouces (128 mm).

L'A.P.I recommande au moins 2 ½ pouces de hauteur (64 mm).

- d'un couvercle muni d'une arrivée de gaz comprimé dont l'étanchéité avec le cylindre est assuré à l'aide d'un joint plat du même type que ceux placés sur l'embase.

Pour utiliser le filtre-presse

- poser le joint sur l'embase,

- poser le tamis sur le joint,

poser le second joint sur le papier filtre.

- emboîter le cylindre sur l'embase et verrouiller le système à baïonnette.

- remplir de boue (jusqu'à environ 1 em du haut du cylindre),

- poser le couvercle sur le cylindre en intercalant un joint,

- placer l'ensemble dans l'étrier et bloquer à l'aide de la vis de serrage

- disposer une éprouvette graduée sous l'ajutage,

- appliquer (assez progressivement pour ne pas rompre le papier filtre) une pression de 7 bar (100 psi) et simultanément déclencher le chronomètre.

- après 30 minutes lire le volume de fluide recueilli dans l'éprouvette, exprimé en cm³ c'est la valeur du filtrat api.

- fermer et purger le circuit de gaz comprimé, démonter l'appareil et recueillir le papier filtre qui est recouvert d'une couche de solides, c'est le cake. Après un lavage superficiel, mesurer l'épaisseur de ce cake, exprimer la valeur en millimètre.

Nota important

L'alimentation en gaz comprimé ne doit jamais être faite avec de l'oxygène ou avec de l'air, une boue contenant des hydrocarbures peut provoquer une explosion, Sources d'erreurs

- pression instable durant la mesure.
- papier filtre non normalise.



Figure 15: filtre presse API

III.2.7. Mesure du ph par pH-mètre électronique:

C'est un indicateur de concentration en ions hydrogène avec lequel on mesure le potentiel électrique d'une pile où s'effectue une réaction faisant intervenir les ions H.

C'est un appareil fonctionnant sur pile ou secteur. On lit directement sur un cadran la valeur du PH de la solution (boue ou filtrat).

Il existe un grand nombre de types d'appareils sur le marché, il est nécessaire de se référer à la notice du fournisseur pour l'utilisation de chacun d'eux.

Le principe consiste à immerger une ou deux électrodes dans la solution à mesurer.



Figure 16 : pH-mètre OHAUS

III.2.8. Four a rouleaux (hot rolling) :

Le four a rouleaux est utilisés dans le domaine de la boue de forage afin de simuler les conditions de travail de la boue à l'intérieur du puits.

III.2.8.1. Application:

- Tests de vieillissement des fluides de forage
- Chauffage et roulage
- Chauffage - séchage et vieillissement
- Laminage - rouleau de broyeur à boulets, mélange homogène,
Mélange chimique, désaération des fluids

III.2.8.2. Mode d'emploi :

- Verser l'échantillon dans la cellule de de vieillissement
- Régler la température de four
- Mettre la cellule dans le four

Les cellules de vieillissement à haute température contenant des échantillons de fluide sont placées dans un four rotatif où elles sont soumises à une chaleur modérée et à une agitation (roulage) sur des rouleaux motorisés. Les échantillons peuvent également être chauffés sans rouler (vieillissement statique).



Figure17: cellule de vieillissement



Figure18: four a rouleau

RESULTATS
ET
DUSCUSSIONS

Conclusion :

En résumé, l'augmentation de la rhéologie de la boue pétrolière à base de bentonite après **hot rolling** est due à une combinaison de facteurs incluant la modification de la structure des particules, l'augmentation des interactions interparticulaires, les effets sur les additifs et les composants, ainsi que les conditions de température et de temps. Ces changements conduisent à une boue plus visqueuse et structurée, ce qui est souvent souhaitable pour améliorer les propriétés de transport et de suspension des déblais de forage.

La rhéologie d'une boue pétrolière reste presque constante à 600 rpm ou à 300 rpm, avant et après **hot rolling**, lorsqu'elle présente un comportement newtonien ou quasi-newtonien, souvent dû à une composition optimisée et à des conditions physico-chimiques contrôlées. Cela signifie que la viscosité de la boue est stable et indépendante des variations de vitesse de cisaillement, ce qui est crucial pour des performances constantes et prévisibles lors des opérations de forage.

Mesurer le pH de la boue de forage avant le processus de hot rolling dans différents mélanges de bentonite et d'argile est une étape cruciale pour évaluer la compatibilité des matériaux et optimiser la formulation. Cette mesure aide à comprendre les interactions chimiques, la stabilité de la boue et les effets des additifs, permettant d'ajuster les proportions pour obtenir les propriétés rhéologiques et de performance souhaitées.

Des valeurs de pH similaires après hot rolling dans différents échantillons de boues de forage indiquent une bonne stabilité chimique, une compatibilité adéquate des additifs et une résilience aux températures élevées. Cela signifie que les formulations de boues de forage sont bien équilibrées et efficaces, ce qui est crucial pour des opérations de forage réussies. Ces résultats permettent également d'optimiser et de contrôler plus facilement les formulations des boues de forage pour des performances constantes.

Des valeurs similaires de l'API Filtrat pour des échantillons de boue de forage avec différentes proportions de bentonite et d'argile indiquent une stabilité et une uniformité des propriétés de filtration. Cela suggère que les formulations de boue de forage sont robustes, compatibles et performantes, même avec des variations dans les proportions de composants. Ces résultats facilitent l'optimisation des formulations, simplifient le contrôle de qualité et peuvent conduire à des économies de coûts tout en assurant une performance efficace et stable des boues de forage.

La diminution de l'API Filtrat suite à l'ajout d'argile à la bentonite indique une amélioration de la capacité de la boue de forage à contrôler la filtration. Cela signifie que la boue de forage devient plus efficace pour retenir le fluide et former un cake de boue plus dense et moins perméable. Cette observation suggère une synergie positive entre la bentonite et l'argile, permettant une optimisation des formulations de boue de forage pour améliorer les performances, réduire les pertes de fluide et maintenir la stabilité du puits de forage.

Référence

Références

- [1] -Dahmoune Karima (2020) thèse de fin d'étude(Elaboration et caractérisation d'un matériau Inorganique (destiné à la Préparation des matériaux Composites)) université mohamedboudaif-M'sila
- [2] KHERFELLAH, N.; BEKKOUR, S.; & BENHADID, K., (2005). « Utilisation de systèmes argileux pour le colmatage des pertes de boues de forage en circulation ». *Rhéologie*, 7 : 48–54.
- [3] KHODJA, M. & KHODJA, S., (1999). « Etude comparative du pouvoir inhibiteur des fluides de forage à base d'eau sur le champ de Hassi Messaoud ».
- [4] PAUMIER, S., (2006). « Facteurs déterminant l'organisation et la rhéologie du système argile – eau pour des suspensions de smectites ». Thèse d'école Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, France.
- [5] C. Airoidi, S. A. M. Critter., «Thermodynamic study involving Cu, Zn, Cd, Hg, Pb, Ca and Na', *Clays and clay Minerals*» 45 (2) , P125, (1997).
- [6] W.J. Weber, J.C. Morris., «Kinetics of Adsorption on carbon from solution. *Journal of Sanitary Engineering*», Division ASCE 89, 31, (1963).
- [7] B. Makhokhi, M. Djab, M.A .Didi., «Adsorption of Telon dyes onto bis-imidazolium modified bentonite in aqueous solutions, *Journal of Environmental Chemical Engineering*», 3 1384–1392, (2015).
- [8]H.Chambley: *Clay sedimentology*, (1989), p 36.
- [9]G.Didier: *Gonflement cristallin et macroscopique de bentonite*. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon, France, (1972), 217p.
- [10]A.Decarreau: *Matériaux argileux. Structures, propriétés et applications*, (1990), 179p.
- [11]S. Caillère et al : *Minéralogie des argiles*, 1ère édition, Masson, Paris, (1963),217p.
- [12] N.BOUGDAH, *Etude de l'adsorption de micropolluants organique sur la bentonite*, mémoire de magisters Université 20 Août 55, Skikda 2007, pp 30-32.
- [13]ABISMAIL DJ., 1999 -Effet de la bentonite sur les caractéristiques chimiques des sols sableux de la région de Mostaganem, étude du comportement d'une variété de tomate industrielle. *Mém. Ing. Etat, Université de Mostaganem*, 32-52.
- [14] :SWARNAKER R.; BRANDTAND; KYDD A., 1996 – *Applied Catalysis A :General*142 61-71 [15] : JULIA BERGER., 2008- Thèse de Doctorat, de l'Université Louis Pasteur de

Références

Strasbourg, et Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre .Thème :«Hydratation des argiles gonflantes et influence des bactéries. Etude expérimentale de réaction in situ».

[16] JULIENLAURENT., 2009 ,de l'Université ENSIL Limoges. Thème : «Modifications de la répartition d'espèces métalliques (Cd,Cu) induites par des prétraitements physique (ultrasons), chimique (ozone) et thermique au sein des procédés à boues activées».

[17] :JOZJA N., 2003 - « Etude de matériaux argileux Albanais. Caractérisation multiéchelle d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec lenitrate de plomb sur la perméabilité».Thèse de doctorat de l'Université d'Orleans.

[18] :BESQA.,2000-« Ecoulement laminaires de suspensions de bentonite industrielles. Caractérisation rhéométriques- Ecoulements en conduites axi symétriques. Application aux activités du Génie Civil ». Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers

[19] :HAJJAJI M. et El ARFAOUI H., 2009 - «Adsorption of méthylène blueand zinc ions on raw and acid-activated bentonite fromMorocco ». AppliedClayScience46, 418-421.

[20] :KUN SU., 2005 - Mémoire d'Habilitation, de l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL) .Thème: «Contribution à l'étude du comportement mécanique et thermo-hydro-mécanique des argilites du Callovo-Oxfordien».

[21] :HALILAT M.T. et TESSIER D., 2006 - Amélioration de la rétention en eau de matériaux sableux par l'ajout de bentonite. Cahiers Agricultures, Vol. n°4,347-353.

[22] C.Abdelouhab: Elimination sur quelques argiles bentonitiquesalgériennes de métaux lourds présents dans les eaux résiduaires industrielles cas du Cd(II) et Zn (II). Thèse de Magister, U.S.T.H.B, Alger, (1987), 217p

[23] Anonyme : Rapport de laboratoire de L'ENOF de Mostaghanem.

[24] Darley, H.C.H. et Gray, G.R. (1988) Composition and properties of drilling and completion fluids. 5th Ed., Gulf Professional Publishing, Houston, TX, 630p

[25] Ahmed Draïa Adrar (2020) thèse de fin d'étude(1,,efficacité,,argiles entrant dans la fabrication des boues de forage pétrolier) université mostaganem

[26] MARTIN (M.) et LE FUR (B.). - Etude de l'écoulement laminaire d'un fluide non newtonien dans un tube de section circulaire. Application aux boues de forage. Rev. I.F.P. 18, n° hors-série, p. 32 (1963)

[27] .Khodja Mohamed ,2008 " Etude des performances et considérations environnementales" Toulouse - France -2008; P 4, 5, 11, 12.

Références

- [28].Herzhaft, B. 2001 , Les fluides de forage : un exemple de fluides complexes industriels, 36ème colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie (GFR 2001), Marne-la-Vallée . France, 10- 12 Octobre
- [29] MelazLwiza et Guessoum Amer. Comportement des boues de forage à base d'eau et d'huile dans la phase 121/4 pour le puits GBF-5 et HMN-4 .mémoire master II Mines et Géologie Option : Valorisation des Ressources Minérales Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2015,p04.P2P59.p61.
- [30] IDF 1988, Product data manual Lausanne p60. L'environnement, Edition DUNOD, Paris 1170P.
- [31] Division forage, les fluides du forage, école nationale supérieure du pétrole et des moteurs.
- [32] Selma Soltani, Analyse du comportement des fluides de forage à travers les formations géologiques de Gassi Touil, Université Larbi Ben M'hidi - Oum El Bouaghi, mémoire dumaster, en 2017.
- [33] : Publication de l'institut français du pétrole : « les fluides de forage »; Edition TECHNIP - 1968.
- [34] : BMI Octobre et novembre 1978: La production du pétrole
- [35] : Boue de forage par C. GARCIA et P. PARIGOT Société des éditions TECHNIP
- [36] : Manuel Technique de fluides de forage IDF (1u" partie)
- [37] Ryaen, C., G. et Chillingar, V. (1996) Drilling fluids : state of the art, Journal of petroleum science and engineering 14, 221-230
- [38] Economides, M. J. et al. (1988) Petroleum well construction, édition John wiley and sons. pp. 199 – 204.
- [39] Article sur PAC LV horizontal drilling (09/06/2024):
<https://basekim.com/en/pac-lv-horizontal-drilling/>
- [40] Article sur le soda ash (05/12/2023) :
<https://www.petronaftco.com/soda-ash-for-drilling/>
- [41] Article sur le caustic soda (2024) :
<https://www.slb.com/products-and-services/innovating-in-oil-and-gas/well-construction/drilling-fluids/drilling-fluid-additives/alkalinity-control/caustic-soda>
- [42] Article sur le barazan D (15/3/2024) :
<https://www.shaletechsolutions.com/2023/10/barazan-d-plus/>

Références

[43] Article sur le chlorure de potassium (01/09/2017) :

<https://amcmud.com/wp-content/uploads/sites/2/2017/10/POTASSIUM-CHLORIDE-PDS.pdf>

[44] Article sur le chlorure de potassium (15/06/2023) :

<https://typeset.io/questions/what-are-the-effects-of-potassium-chloride-on-drilling-fluid-25akdg46ma>

[45] Article sur le CS STARCH (31/10/2020) :

<https://link.springer.com/article/10.1007/s13202-020-01026-9>

[46] Article sur le carbonate de calcium (28/06/2023) :

<https://www.petronaftco.com/calcium-carbonate-for-drilling/>

[46] formule suggéré par laboratoire DFSP