

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

Mémoire du Projet de fin d'étude  
2<sup>ème</sup> Année Master



742

Département : Génie des Procédés  
Spécialité : Matériaux et génie des procédés

Présenté par :  
OUCHTATI Ali.  
DJABALLAH Abdelhalim.



---

---

ETUDES ET SUIVIES DES PROPRIETES DES BOUES DE FORAGE

---

---

Sous la Direction de :  
Dr. CHRAITIA Abdallah.

Juin 2011

## Dédicaces



*Je dédie ce modeste travail à :*

- *Mes parents.*
- *Mes frères et sœurs.*
- *Ma grande famille.*
- *Mes ami(e)s et surtout Walid.*
- *Tous ceux qui me sont chers.*

*OUCHTATI Ali.*

*Je dédie ce modeste travail à :*

- *Mes parents.*
- *Mes frères et sœurs.*
- *Mes amis.*

*DJABALLAH Abdelhalim.*

## *Remerciements*

*Nombreux sont ceux qui nous ont aidé pour la réalisation de ce mémoire de fin d'études.*

*Nous tenons en premier lieu à exprimer nos vifs remerciements aux membres du jury qui nous honorent de juger ce modeste travail.*

*Nous remercions nos deux encadrateurs, Mr. CHRAÏIA, pour nous avoir dirigés tout le long de ce travail et Mr .ROUINA et Mr. HASSENA, pour nous avoir aidé avec ses conseils précieux durant notre stage pratique.*

*Enfin nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'études ainsi que tous mes ami(e)s sans oublier mon cher ami Mr. DEHIRI.*

*Al.*

## *Remerciements*

*Nombreux sont ceux qui nous ont aidé pour la réalisation de ce mémoire de fin d'études.*

*Nous tenons en premier lieu à exprimer nos vifs remerciements aux membres du jury qui nous honorent de juger ce modeste travail.*

*Nous remercions nos deux encadreurs, Mr. CHRAITIA, pour nous avoir dirigés tout le long de ce travail et Mr .ROUINA et Mr. HASSENA, pour nous avoir aidé avec ses conseils précieux durant notre stage pratique.*

*Enfin nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'études ainsi que tous mes ami(e)s.*

*Abdelhalim.*

## Sommaire

Introduction générale :

### Partie théorique :

#### Chapitre I : Généralités sur le forage

I.1. Introduction :	1
I.2. Géologie des puits :	1
I.3. Le forage (Drilling) :	3
I.3.1. L'appareil de forage (Rotary rig) :	3
I.3.2. L'outil de forage (Bit) :	5
I.3.3. Architecture d'un puits :	6
I.4. Les fonctions (Systèmes) principales dans le forage :	7
I.4.1. Système de rotation (Rotating system) :	7
I.4.1.1. La table de rotation :	7
I.4.1.2. Le top drive :	8
I.4.1.3. La tige d'entraînement :	8
I.4.1.4. La tête d'injection (Swivel) :	9
I.4.2. Système de levage (Hoisting system) :	10
I.4.2.1. Le mât de forage :	10
I.4.2.2. Le treuil de forage (Drawworks) :	10
I.4.2.3. Le mouflage :	10
I.4.3. Système de circulation d'un appareil de forage (Circulating system) :	11
I.4.3.1. But de la circulation :	12
I.4.3.2. La boue de forage (Drilling Mud) :	12
I.4.3.3. Les bacs à boue :	12
1. Fonctions des bacs à boue :	12
2. Types de bacs à boue :	13
I.5. Appareillage de récupération et Traitement des Boues :	13
I.5.1. Les tamis vibrants (shale shakers) :	13
I.5.2. Le déssableur (desander) et le déssilteur (desilter) :	14
I.5.3. Le dégazeur :	16
I.5.4. Les centrifugeuses :	16
I.6. Conclusion :	17

## Chapitre II : les boues de forage

II.1. Introduction :	18
II.2. Fluide de forage :	19
II.3. Rôle du fluide de forage :	19
II.4. Principaux produits pour les fluides de forage :	21
II.5. Caractéristiques :	28
II.5.1. La densité :	28
II.5.2. La filtration :	29
II.5.3. Le pH :	30
II.5.4. L'alcalinité :	30
II.5.5. Paramètres rhéologiques :	31
II.6. Types de fluides :	32
II.6.1. Boues à base d'eau :	34
II.6.1.1. Base d'eau douce :	34
1. Boue bentonitique :	34
2. Boue au gypse :	35
3. Boue a faible teneur en solides :	36
II.6.1.2. Base d'eau salée :	38
1. Boue l'eau de mer :	38
2. Boue salées saturées :	38
II.6.2. Boues à base d'huile :	39
II.6.2.1. Base à l'huile :	40
II.6.2.2. Base à émulsion inverse :	40
II.6.3. Boues à base de gaz :	44
II.6.3.1. Boue à l'air :	44
II.6.3.2. Boue à la mousse :	44
II.6.3.3. La boue aérée :	44
II.7. Conclusion :	45



## Partie Expérimentale :

### Chapitre III : études et suivie des propriétés des boues de forage

III.1. Introduction :	46
III.2. Testes physiques et chimiques effectués :	47
III.3. Modes opératoires :	48
III.3.1. Testes physiques :	48
III.3.1.1. La densité :	48
III.3.1.2. Concentration en sable :	48
III.3.1.3. Filtrat et cake :	50
III.3.1.4. Distillation :	51
III.3.1.5. La viscosité :	52
III.3.1.6. La conductivité électrique :	54
III.3.2. Testes chimiques :	55
III.3.2.1. Les Tests chimiques de La boue bentonitique à base d'eau (WBM) :	55
A. Détermination de l'alcalinité :	55
B. Quantité des chlorures (Cl) :	56
C. Quantité de calcium Ca <sup>2+</sup> :	56
D. Détermination de la quantité de bentonite par le Bleu de méthylène :	57
III.3.2.2. Les Tests chimiques de la boue à base d'huile (OBM) :	57
A. Détermination de l'alcalinité phénolphtaléine PB :	57
B. La quantité des Chlorures Cl-boue :	58
C. La quantité de calcium Ca <sup>2+</sup> +boue :	58
III.4. Contrôle des boues de forage :	59
III.4.1. La phase I: (0 – 616 m) :	59
III.4.1.1. Choix de la boue :	59
III.4.1.2. Résultats des analyses :	60
III.4.2. La phase II : (616 – 1871 m) :	62
III.4.2.1. Le choix de la boue :	62
III.4.2.2. Résultats des analyses :	63
III.4.2.3. Les calculs effectués dans cette phase :	64
III.4.3. La phase III : (1871 – 2748 m) :	66
III.4.3.1. Choix de la boue :	66
III.4.3.2. Résultats des analyses :	67

III.4.4. La phase IV: (2748 – 2963 m) :	68
III.4.4.1. Choix de la boue :	68
III.4.4.2. Résultats des analyses :	69
Conclusion générale :	

## Liste des tableaux

- Tableau 1** : Echelle stratigraphique type du bassin d'IN AMENAS ENF 38.
- Tableau 2** : Les différents produits des boues de forage (rôle et utilisation).
- Tableau 3** : Les différents types de boues de forage (eau, huile) et ces rôles et utilisations.
- Tableau 4** : Différents types de boues selon la phase de forage.
- Tableau 5** : Les teste réalisé selon les phases de forage.
- Tableau 6** : Les différents types de viscosité.
- Tableau 7** : Les différents tests chimiques de la boue bentonitique et la boue à l'huile.
- Tableau 8** : Formulation de la boue : Boue bentonite.
- Tableau 9** : Propriétés de la boue sous les normes dans la phase I.
- Tableau 10** : Résultats des analyses physico-chimiques pour la phase I.
- Tableau 11** : Formulation de la boue a la phase II : Boue a base d'huile.
- Tableau 12** : Les propriétés et les normes de la boue à l'huile.
- Tableau 13** : Résultats des analyses physico-chimiques pour la phase II.
- Tableau 14** : Résultats pour la phase III
- Tableau 15** : Formulation de la boue à la phase III : Boue a base d'huile.
- Tableau 16** : Résultats des analyses physico-chimiques pour la phase III.
- Tableau 17** : Formulation de la boue à base d'huile à la phase IV.
- Tableau 18** : Propriétés de la boue sous les normes dans la phase IV.
- Tableau 19** : Résultats des analyses physico-chimiques pour la phase IV.

## Liste des figures

- Figure 1.** Schéma d'un appareil de forage à terre.
- Figure 2.** Outil Poly Cristal Diamant utilisé dans la 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> phases.
- Figure 3.** Outil tricône à molettes utilisé dans la première phase.
- Figure 4.** Schéma d'un puits en fin de réalisation.
- Figure 5.** Schéma type d'un assemblage de train de tiges.
- Figure 6.** La table de rotation.
- Figure 7.** Le top drive.
- Figure 8.** Tiges d'entraînement.
- Figure 9.** La tête d'injection.
- Figure 10.** Schéma du système de mouflage.
- Figure 11.** Circuit de la boue.
- Figure 12.** Tamis vibrant.
- Figure 13.** Schéma du désableur (a) et du déssilteur (b).
- Figure 14.** Principe de fonctionnement de l'hydro-cyclone.
- Figure 15.** Le dégazeur.
- Figure 16.** Principe de fonctionnement de la centrifugeuse.
- Figure 17.** Schéma représente les différents types des boues Forage.
- Figure 18.** Densimètre à boue.
- Figure 19.** Schéma d'elutriomètre.
- Figure 20.** Schéma de Filtre-presse.
- Figure 21.** Distillateur.
- Figure 22.** Schéma d'un viscosimètre Marsh.
- Figure 23.** Rhéomètre de type Fann.
- Figure 24.** Testeur de stabilité électrique.

## Liste des abréviations

- TRSO 1** : Le nom de puits de bassin d'IN AMENAS.
- F.C.L.cf** : Lignosulfonates de fer sans chrome.
- L.C.cf** : Lignites sans chrome.
- PHPA** : Poly-acrylamide partiellement hydrolysé.
- PAC** : Poly Anioniques de la Cellulose.
- CMC** : Carboxy-méthyl-cellulose.
- A.P.I** : American Petroleum Institute.
- PB** : Phénolphtaléine boue.
- PF** : Phénolphtaléine filtrat.
- MF** : Méthylorange filtrat.
- Sec/qt** : Seconde par quantité.
- cP** : Centipoise.
- T/mn** : Tour par minute.
- PV** : Viscosité plastique.
- 17''1/2** : Dix sept pouces et demi.
- $\rho_s$**  : La densité de brine (saumure).
- $V_s$**  : Volume de brine.
- $V_o$**  : Volume d'huile.
- $V_s$**  : Volume des solides corrects (pourcentage).
- $V_{LGS}$**  : Volume des solides (pourcentage).
- LGS** : Low gravity solids.

**% Huile** : Rapport d'huile.

**% Eau** : Rapport d'eau

**% NaCl** : Rapport de sel

**BARABLOCK**: Additif de perte de fluide.

**DEXTRID** : Additif de perte de fluide.

**DURATONE HT**: Additif de perte de fluide.

**B LUBE** : Additif pour éviter le coincement de l'outil et les tiges.

**GELTONE** : Améliorant de viscosité.

**GELTONE-II** : Améliorant de viscosité.

**INVERMUL NT**: Emulsifiant.

## **INTRODUCTION GENERALE**

Le pétrole et le gaz jouent un rôle très important et capital dans l'industrie des pays de monde.

Le pétrole brut et le gaz naturel se sont formés au cours de millions d'années par décomposition de végétaux et d'organismes marins, comprimés sous le poids des sédiments. Comme ils sont plus légers que l'eau, ils ont migré pour combler les vides existant dans ces formations sous-jacentes. Ce mouvement vers le haut s'est arrêté lorsqu'ils ont atteint des couches denses imperméables ou des roches non poreuses.

Le pétrole brut est présent, en général, dans des formations géologiques particulières, telles que les anticlinaux, les pièges de faille et les dômes de sel, que l'on trouve sous divers types de terrains et dans des climats très divers. En pratique, le lieu d'accumulation appelé "piège" constitue une nouvelle couche imperméable formant le plus souvent une espèce au-dessus de la roche poreuse dans laquelle le pétrole circule. La roche qui contient le pétrole s'appelle un réservoir.

Le forage est resté jusqu'à maintenant le seul moyen et la seule méthode pour extraire et exploiter ces sources d'énergie.

Le forage pétrolier fait partie de l'ensemble des opérations nécessaires pour localiser et extraire de la roche réservoir les hydrocarbures présents dans le sous-sol. Plusieurs forages sont nécessaires pour aboutir à l'exploitation d'un gisement : forages d'exploitation pour confirmer la présence d'hydrocarbures, forages d'évaluation qui permettent d'estimer la viabilité économique du développement, et enfin les puits de développement qui aboutissent à la mise en production.

L'un des éléments les plus sensibles de forage est la boue de forage. Cette dernière a pris de l'importance, en répondant à un grand nombre de besoins et en résolvant des problèmes très différents tel que les pertes de circulation, les coincements et les contaminations.

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

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

Dans ce cadre, notre présent travail porte sur l'étude et le suivie des propriétés des boues lors du forage du puits TRSO 1 a IN AMENAS.

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres :

- ✓ Dans le premier chapitre on donne des notions générales sur le forage.
- ✓ Le deuxième chapitre contient une étude sur les différentes boues de forage et leurs propriétés,
- ✓ Le dernier chapitre contient la partie expérimentale et traite le suivie des propriétés des boues pendant le forage.

**Partie théorique :**

# **Chapitre I**

## **Généralités sur le forage**

## **Chapitre I : Généralités sur le forage**

### **I.1. Introduction :**

Le forage prend une part importante dans le développement des gisements et l'estimation des réserves pétrolières. Les innombrables facteurs qui jouent un rôle dans le forage d'un puits doivent être reconnus et convenablement examinés quand vient le moment de forer un puits.

Ces facteurs sont :

1. La coupe géologique : ceci concerne la nature des formations à forer.
2. La capacité de l'appareil de forage.
3. Le programme de boue.
4. L'outil de forage.
5. Les trois paramètres importants :
  - ✓ La fonction levage ;
  - ✓ La fonction rotation;
  - ✓ La fonction pompage.

### **I.2. Géologie des puits :**

La géologie est la discipline qui étudie la terre, de par les formations qui constituent sa couche superficielle (croûte terrestre). Les données géologiques sont très importantes dans le domaine du forage. Les informations recueillies sur l'emplacement du forage permettent : Un calcul pratique de l'assemblage du train de tige. D'adapter le diamètre et le type d'outil (Poly Cristal Diamant ou à molettes) pour chaque formation à forer. D'éviter de forer dans les zones dites faillées afin d'éviter le coincement de la garniture de forage.

Le bassin de IN AMENAS, dans la wilaya de ILIZZI, est un bassin sédimentaire. Ce dernier qui est exploité a fait l'objet d'études géologique approfondies. La différence des épaisseurs des couches sédimentaires varie d'un puits à un autre ; un exemple de formations de roches composant ce bassin est donné dans le tableau 1.

1875

**I.3. Le forage (Drilling) :**

Le principe est de creuser un puits en utilisant des tiges vissées les unes aux autres (train de tige) auxquelles on adjoint un outil à forer (trépan ou Bit). Le trépan doit pour accomplir son rôle être animé d'un mouvement de rotation autour de son axe et être appuyé avec une certaine force sur le fond du puits. Ces deux actions lui sont transmises depuis la surface par les tiges qui sont vissées au dessus de lui. Au fur et à mesure que la roche est réduite en petits débris (cuttings), encore appelés déblais de forage, une circulation continue de boue, descendant par l'intérieur des tiges et remontant par l'espace annulaire compris entre les tiges et le trou, les évacue vers la surface.

Cette boue peut jouer un rôle important dans le travail d'attaque de la roche par le trépan. Le forage rotary (par rotation) est un procédé très employé de nos jours, car il permet d'obtenir les meilleures vitesses d'avancement, et surtout, d'atteindre des profondeurs extrêmement importantes.

**I.3.1. L'appareil de forage (Rotary rig) :**

Une plate-forme de forage rotatif (rotary rig), tant sur la terre ou en mer, peut être considérée comme une usine conçue pour délivrer seulement un produit : un puits de pétrole. Ce trou est une voie soigneusement exécutée de la surface vers une formation poreuse et imperméable qui peut contenir des hydrocarbures (réservoir). Les installations diffèrent d'un constructeur à un autre, cependant, les fonctions assurées sont fondamentalement similaires.

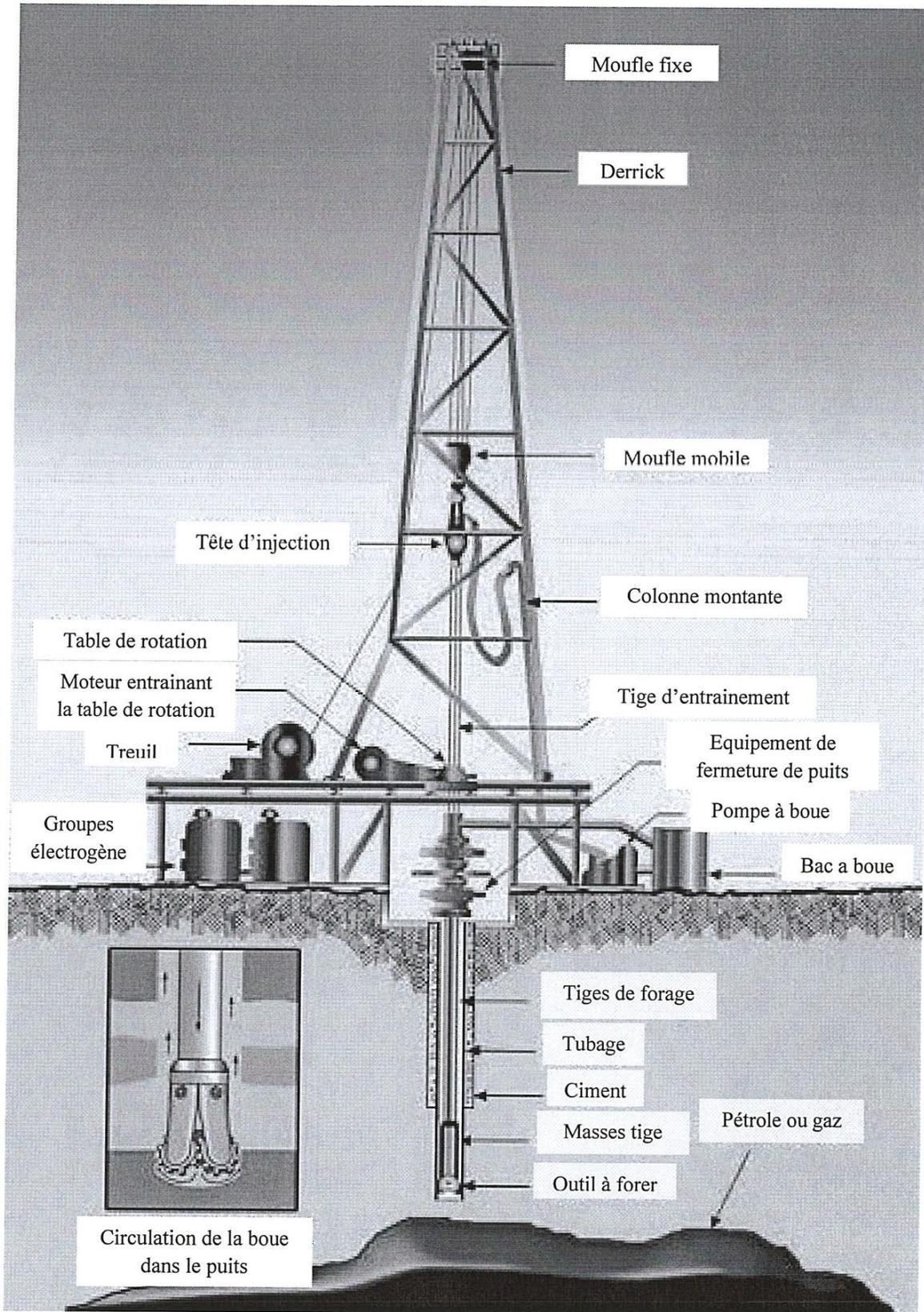
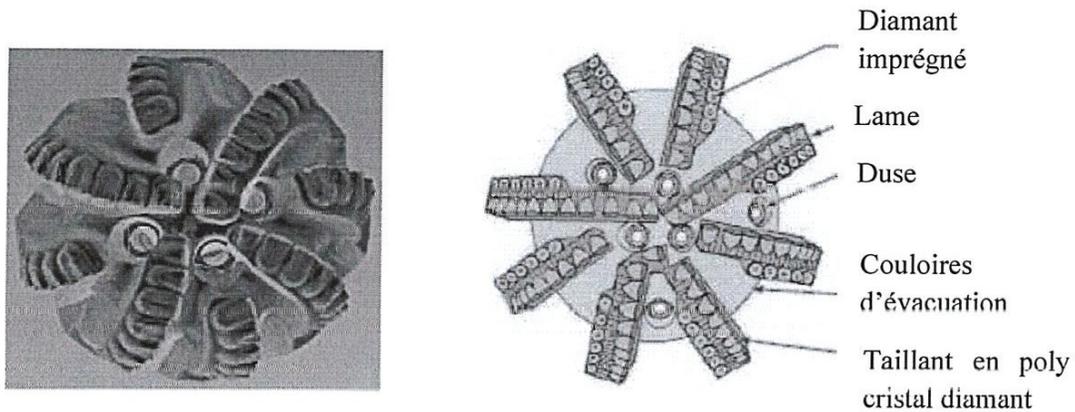


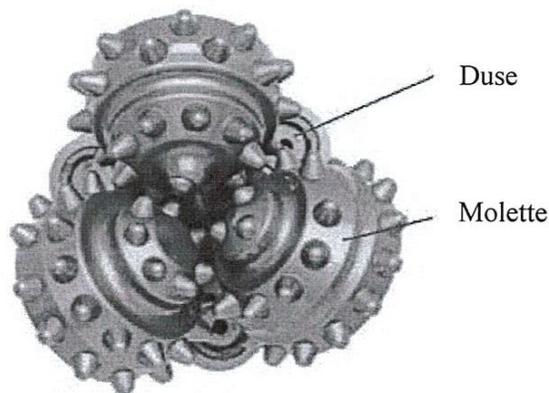
Figure 1. Schéma d'un appareil de forage à terre.

### I.3.2. L'outil de forage (Bit) :

Les différentes natures de terrains à forer ont conduit les fabricants à développer plusieurs types d'outils. On distingue les trépan tricones et les trépan monobloc (Poly cristal diamant). Les tricones peuvent, selon la nature du terrain, être garnis de dents recouvertes de métal dur. Ils peuvent également, dans le cas de terrains très durs, être pourvus de picots de carbure de tungstène. Ces derniers sont alors sertis. Enfin, pour les terrains les plus durs et les plus abrasifs, on utilise des outils monobloc, sertis de diamants naturels.



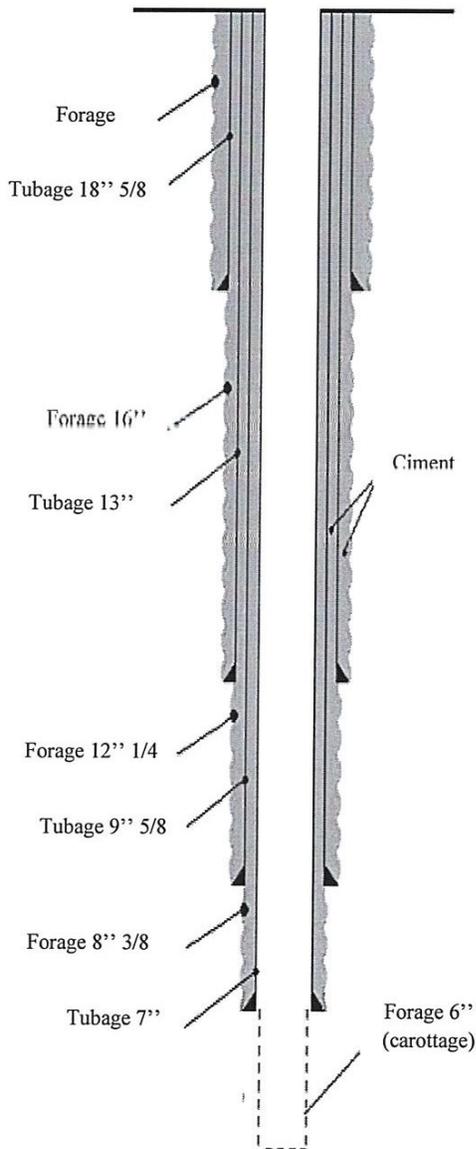
**Figure 2.** Outil Poly Cristal Diamant utilisé dans la 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> phases.



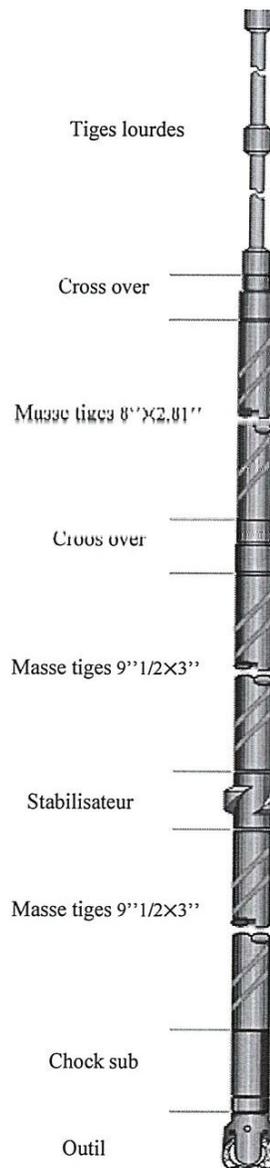
**Figure 3.** Outil tricône à molettes utilisé dans la première phase.

**I.3.3. Architecture des puits :**

La réalisation d'un puits de pétrole s'effectue en plusieurs phases dont le diamètre décroît au fur et à mesure de l'approfondissement du puits. Une phase est caractérisée par un diamètre de forage ; celui-ci est égal au diamètre de l'outil utilisé pour sa réalisation (la phase prends pour nom le diamètre de l'outil).



**Figure 4.** Schéma d'un puits en fin de réalisation.



**Figure 5.** Schéma type d'un assemblage de train de tiges.

#### I.4. Les fonctions principales dans le forage (Systèmes) :

##### I.4.1. Système de rotation :

C'est la partie caractérisant le forage rotary qui permet la transmission du mouvement de rotation à travers le train de tige au trépan. Il existe deux types d'appareils d'entraînement dans le système de rotation : la table de rotation et/ou le top drive (se dit aussi moteur suspendu). L'avancement de l'outil (trépan) dans l'opération de forage est assuré par le système de rotation qui comprend :

- ✓ La table de rotation et/ou la Top Drive ;
- ✓ La tige d'entraînement ;
- ✓ La tête d'injection.

Dans le forage, la vitesse de rotation est un paramètre important. Elle est choisie en fonction des formations géologiques traversées, de l'outil et de la charge appliquée.

##### I.4.1.1. La table de rotation :

La table de rotation (rotary table) est la pièce caractéristique qui donne à l'installation son nom « rotary ». L'appareil rotary apporte aux outils de forage la rotation induite par le moteur de la table de rotation.

La table de rotation est une machine extrêmement robuste et d'une longévité importante. Opérant à l'aide des gaines ou carré d'entraînement, elle entraîne la tige d'entraînement, et par suite la garniture et l'outil.



**Figure 6.** La table de rotation.

Elle a également deux autres fonctions :

- ✓ Elle sert comme table pour les cales lors de la descente et de la remontée des tiges. En d'autres termes, la table de rotation soutient les cales qui supportent les tiges quand le crochet et les élévateurs sont dégagés ;
- ✓ La table de rotation sert également à dévisser les joints des tiges lors de la remontée de la garniture.

#### I.4.1.2. Le top drive :

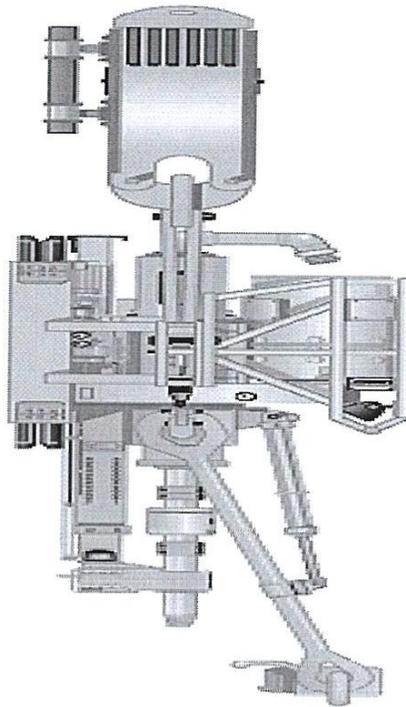


Figure 7. Le top drive.

Dans le cas d'un forage vertical, la rotation est assurée par une table tournante (table de rotation) actionnée par un moteur électrique, cette table est munie d'une fourrure pour éviter l'usure de sa matrice.

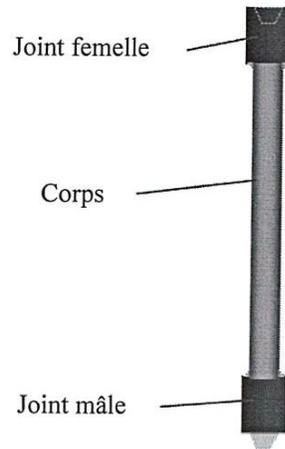
Dans le cas d'un forage vertical, et même actuellement l'horizontal, la fonction rotation est assurée par la Top Drive. Cette dernière est actionnée par de l'huile pressurisée à 4000 psi (27580 KPa) délivrée par un compresseur hydraulique incorporé dans son bloc énergétique.

La Top Drive est équipé d'un arbre fileté et évidé pour permettre la fixation des garnitures et l'injection du fluide de forage à travers l'évidement. Une extrémité conique est prévue pour faciliter le guidage.

#### I.4.1.3. La tige d'entraînement :

La tige d'entraînement de section carrée, hexagonale ou triangulaire, est entraînée en rotation par la table et par l'intermédiaire du carré (Kelly drive bushing) monté autour de sa longueur courante. Ce carré est constitué de quatre rouleaux à axe horizontal de forme appropriée pour transmettre le couple à la tige et par conséquent à la garniture de

forage vissée sous le raccord inférieur. L'ensemble peut coulisser longitudinalement. De longueur totale de 12,19 m ou de 16,46 m, elle dispose respectivement d'une longueur utile de 11,28 m ou de 15,54 m.



**Figure 8.** Tiges d'entraînement.

#### 1.4.1.4. La tête d'injection (Swivel) :

La tête d'injection appartient autant à l'outillage de circulation de boue qu'à l'outillage de rotation. En effet, elle joue un double rôle :

- ✓ Elle sert de palier de roulement à l'ensemble du train de sonde pendant le forage ;
- ✓ Elle assure le passage de l'injection de boue venant d'une conduite fixe (flexible d'injection) dans une conduite animée d'un mouvement de rotation (train de sonde).



**Figure 9.** La tête d'injection.

### I.4.2. Système de levage (Hoisting system) :

C'est un ensemble d'appareils de levage, de câblages, de poulies et de structures en treillis (mât) qui permet la décente dans le puits du trépan vissé au train de tige ou encore de les en extraire. Tout cet ensemble d'équipements se trouve sur le planché (rig floor) de l'appareil de forage.

Le système de levage dans un appareil de forage assure la manœuvre de remontée et la descente du train de sonde et, éventuellement, la descente d'une colonne de tubes (tubage du puits). Il est composé principalement :

- ✓ De la structure de la tour de forage (derrick) ou le mât (mast) ;
- ✓ Du treuil de forage (drawworks) ;
- ✓ Du mouflage (moufle fixe et moufle mobile) ;
- ✓ Et du poste de commande et de contrôle.

#### I.4.2.1. Le mât de forage :

Le mât est une structure en forme de A très pointu. Il a la particularité d'être articulé à sa base ce qui lui permet d'être assemblé ou démonté horizontalement puis relevé en position verticale. Le mât de forage sert aux manœuvres des garnitures de forage ou des tubages

#### I.4.2.2. Le treuil de forage (drawworks) :

C'est le cœur de l'appareil de forage, car c'est la capacité du treuil de forage qui caractérise un appareil de forage (drill rig) et indique la classe de profondeur des forages que l'on pourra effectuer. Le treuil de forage sert à remonter les tiges du trou et à les y descendre et à manœuvrer un train de tubage. Il est caractérisé, essentiellement, par sa gamme de vitesses et par l'effort maximal pouvant s'exercer sur le brin menant du câble.

#### I.4.2.3. Le mouflage :

Le mouflage est l'ensemble des équipements qui sont participé au levage, il comprend essentiellement :

- ✓ Le moufle fixe ;
- ✓ Le moufle mobile ;
- ✓ Le câble de forage ;
- ✓ Le treuil.

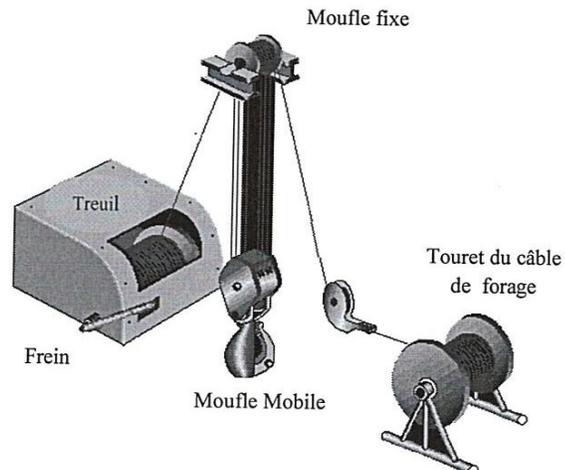
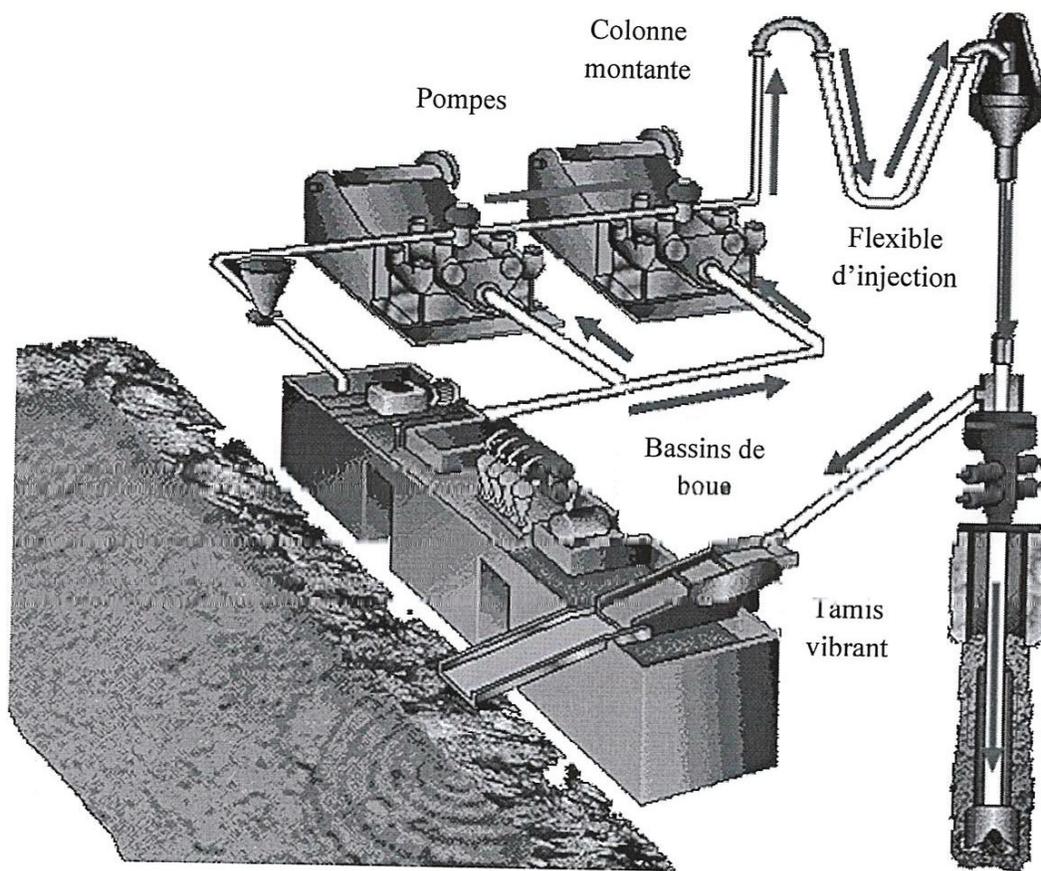


Figure 10. Schéma du système de mouflage.

**I.4.3. Système de circulation d'un appareil de forage (Circulating system) :****Figure 11.** Circuit de la boue.

Le terme circulation est relatif au fluide de forage utilisé. Le système fait circuler en circuit fermé le fluide de forage, depuis les bacs de stockage en surface jusqu'à l'outil au fond du puits pour le remonter ensuite à la surface. Parmi les objectifs assignés à ce circuit boue il y a : la lubrification du franc de taille, le refroidissement de l'outil et le nettoyage du trou.

Pour effectuer une opération de forage, le fluide doit atteindre le fond du puits en empruntant l'intérieur des tiges et circuler autour du trépan pour enfin remonter à travers l'espace annulaire entre le train de tige et les parois du puits ou le casing couvrant ces dernières.

Un système de circulation utilise l'équipement suivant pour circuler, nettoyer et recycler le fluide de forage :

- ✓ Pompes à boue ;
- ✓ Flexible d'injection ;
- ✓ Tête d'injection ;
- ✓ Train de tige ;
- ✓ Trépan (Bit) ;
- ✓ Canalisation de retour de boue ;
- ✓ Bac à boue.

#### **I.4.3.1. But de la circulation :**

Les principaux buts de la circulation des fluides de forage sont :

- ✓ Nettoyer le fond du puits ;
- ✓ Refroidir et lubrifier le trépan et le train de tige ;
- ✓ Remonter les débris de roches, issues du forage, vers la surface ;
- ✓ Maintenir en place les parois du puits et éviter ainsi son effondrement ;
- ✓ Empêcher l'exfiltration des fluides contenus dans les couches de roches traversées.

#### **I.4.3.2. La boue de forage (Drilling Mud) :**

Le fluide de circulation est habituellement un liquide mais peut également être de l'air ou un autre gaz. Si le fluide de circulation est un liquide, c'est généralement une boue à base d'eau, ou bien à base d'huile (carburant habituellement diesel). Les deux bases (base-eau ou base-huile) du fluide de forage sont appelées boue de forage car elles donnent l'aspect de la boue du fait des additifs solides que l'on y ajoute.

#### **I.4.3.3. Les bacs à boue :**

##### **1. Fonctions des bacs à boue :**

Les fonctions principales des bacs à boue sont les suivantes :

- ✓ Stocker la boue qui circule dans le puits de forage ;
- ✓ Alimenter les pompes à boue volumétriques ;
- ✓ Stocker assez de boue pour remplir le puits lorsque les tiges sont hissées hors du puits ;
- ✓ Traiter et filtrer la boue.

La boue est préparée dans ces bacs à l'aide des mixeurs en entonnoir (Mud mixing Hopper) dans lesquels tous les additifs solides passent pour y être mélangés à une phase liquide (eau ou gasoil).

Cependant, certaines poudres chimiques (caustique) échappent à ce traitement du fait qu'elles sont très dangereuses. Celles-ci sont déversées directement dans les bacs qui sont dotés d'agitateurs à pales (paddle agitator) pour mélanger la préparation avec de l'eau ou du gasoil selon les besoins du forage (boue à l'eau ou boue à l'huile).

## **2. Types de bacs à boue :**

Un chantier de forage contient plusieurs bacs à boue, chacun portant la dénomination de l'opération dont il assure la fonction :

### **a. Bacs intermédiaires :**

Servent de bacs de stockage ou alors de relais entre un bac et un autre (bacs de transit).

### **b. Bacs d'aspiration :**

Ces bacs sont placés très près des pompes à boue car ils alimentent celles-ci.

### **c. Bacs de manœuvres :**

Ce sont les bacs les plus proches de l'ouverture du puits. Ces bacs servent à compenser le volume de tige extrait du puits vers la surface par de la boue.

### **d. Bacs de décantation :**

Ces bacs servent à recueillir la boue traitée (filtrée et débarrassée des particules solides) par les appareilles de traitement des boues.

## **I.5. Appareillage de récupération et Traitement des Boues :**

### **I.5.1. Les tamis vibrants (shale shakers) :**

La boue remontée du puits contient des débris de roches, du sable et d'autres particules (cuttings and sand). Ces particules doivent être enlevées avant que cette boue ne soit remise en circulation.

La présence de ces particules, en suspension dans la boue, entraîne une augmentation de la viscosité. Pour ça, il existe des bacs de décantation pour précipiter par gravité les particules en suspension vers le fond des bacs. Mais toutefois, cette méthode n'est pas très rapide et risque d'interrompre le forage, on utilise alors des tamis vibrants (Shale Shakers) dotés de capacités de traitement suffisantes.

### I.5.3. Le dégazeur :

Il arrive que du gaz s'infiltré dans la boue et remonte du puits à cause de l'insuffisance de la pression hydrostatique qu'exerce cette boue sur le fond du puits. Dans ce cas, le gaz qui est plus léger que la boue remonte plus rapidement à la surface. Les installations risquent d'être endommagées par les coups de béliers sans oublier les risques d'explosion. Pour ça, on oriente la boue gazée vers un dégazeur pour effectuer la séparation des deux phases.

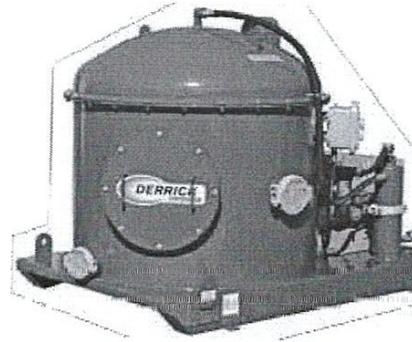


Figure 15. Le dégazeur.

Plusieurs types de dégazeurs existent ;

- ✓ Dégazeur séparateur de gaz : est utilisé pour canaliser les coups de béliers dus à la pression du gaz présent dans la boue qui remonte du puits ;
- ✓ Dégazeur sous vide : est approprié pour séparer la boue et le gaz intimement mélangés ; la boue apparaît très mousseuse dans ce cas.

### I.5.4. Les centrifugeuses :

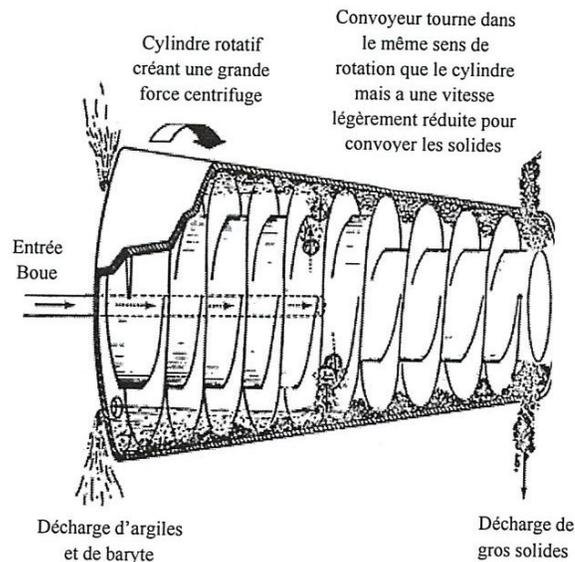


Figure 16. Principe de fonctionnement de la centrifugeuse.

Les processus cités plus haut sont des procédés destinés à capter les particules dont les dimensions sont supérieures à celles des argiles (la Baryte). La centrifugation de la boue permet de séparer des particules plus petites encore que les argiles. Le but de la centrifugation est le maintien d'un contenu minimum de solides, de poids spécifique faible dans la boue en circulation. Cela conduit à un contrôle et une stabilisation de la densité de cette boue.

**I.6. Conclusion :**

D'après ce qu'on a vu précédemment il y a trois fonctions principales dans le forage et parmi ces fonctions, on a le système de circulation qui est relatif au fluide de forage (la boue de forage). Cette boue de forage joue un rôle important dans le forage à l'aide de sa composition et les caractéristiques physico-chimiques. Mais ces derniers sont reliés par la nature de puits et le type de la boue utilisé. Alors il faut connaître quel boue on doit utiliser dans le forage.

# **Chapitre II**

## **Les boues de forage**

## **Chapitre II : Les boues de forage**

### **II.1. Introduction :**

La boue ou le fluide de forage à un rôle primordial dans la réalisation d'un puits, d'une part, sans elle le forage au rotary serait impossible et que, d'autre part, ses progrès ont permis :

- ✓ L'accroissement de la profondeur des sondages ;
- ✓ Réduction des difficultés rencontrées en forage ;
- ✓ La réduction de prix de revient global de l'opération de forage ;
- ✓ L'augmentation de la productivité des puits par une réduction des dommages causés aux formations.

Les fluides de forage doivent avoir des propriétés telles qu'ils facilitent, accélèrent le forage, réduire les prix globaux du forage en permettant des économies de temps et d'argent, faciliter toutes opérations techniques pendant le forage (mesures au cours de forage) et fournir le maximum d'informations sur les terrains traversés (surtout dans le cas des forages d'exploration) favorisent ou tout au moins ne réduisent pas d'une manière sensible et permanente les possibilités de production des sondages.

**II.2. Fluide de forage :**

Un fluide de forage ou boue de forage est un système composé de différentes combinaisons liquides (eau, huile, ...), gazeuses (air ou gaz naturel) contenant en suspension une phase solide (argile, déblais, ciments, ...).

**II.3. Rôles du fluide de forage :**

Les boues de forage ont une grande importance pour le fonctionnement des puits avec plusieurs fonctions telles que le :

**a. Nettoyage des puits :**

La boue doit débarrasser le puits des particules de formation forées qui se présentent sous forme de débris de roche appelés « cuttings » ou « déblais ».

**b. Maintien des déblais en suspension :**

Le fluide de forage doit non seulement débarrasser le puits des déblais de forage durant les périodes de circulation, mais il doit également les maintenir en suspension pendant les arrêts de circulation.

**c. Sédimentation des déblais fins en surface :**

Alors que la boue doit permettre le maintien en suspension des déblais dans le puits durant les arrêts de circulation, ce même fluide doit laisser sédimenter les déblais fins en surface, afin de les éliminer. Bien qu'apparemment ces deux aptitudes semblent contradictoires, elles ne sont pas incompatibles.

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

Du fait de son passage en surface, la boue en circulation se trouve à une température inférieure à celle des formations ce qui lui permet de réduire efficacement l'échauffement de la garniture de forage et de l'outil. Cet échauffement est dû à la transformation d'une partie de l'énergie mécanique en énergie calorifique.

**e. Prévention du cavage et des resserrements des parois du puits :**

La boue doit posséder des caractéristiques physiques et chimiques telles, que le trou conserve un diamètre voisin du diamètre nominal de l'outil.

Le cavage est causé par des éboulements, par la dissolution du sel, par la dispersion des argiles, par une érosion due à la circulation de la boue au droit des formations fragiles, etc.

Les resserrements ont souvent pour cause une insuffisance de la pression hydrostatique de la colonne de boue qui ne peut équilibrer la pression des roches.

**f. Dépôt d'un cake imperméable :**

La filtration dans les formations perméables d'une partie de la phase liquide de la boue crée un film sur les parois du sondage, ce film est appelé cake. Le dépôt du cake permet de consolider et de réduire la perméabilité des parois du puits.

**g. Prévention des venues d'eau, de gaz, ou d'huile :**

Afin d'éviter le débit dans le puits des fluides contenus dans les réservoirs rencontrés en cours de forage, la boue doit exercer une pression hydrostatique suffisante pour équilibrer les pressions de gisement.

La pression hydrostatique souhaitée est maintenue en ajustant la densité entre des valeurs maximum et minimum.

**h. Augmentation de la vitesse d'avancement :**

Au même titre que le poids sur l'outil, la vitesse de rotation et le débit du fluide, le choix du type et les caractéristiques de la boue conditionnent les vitesses d'avancement instantanées, la durée de vie des outils, le temps de manœuvre, en un mot, les performances du forage.

Un filtrat élevé augmente la vitesse d'avancement. Les très faibles viscosités sont aussi un facteur favorable à la pénétration des outils.

**i. Entraînement d'outils :**

Dans le cas du turboforage la boue entraîne la turbine en rotation. Cette fonction, l'amenant à passer à travers une série d'évents et à mettre en mouvement des aubages, implique certaines caractéristiques et rend impossible ou très délicat l'utilisation de certains produits (colmatant).

**j. Diminution du poids apparent du matériel de sondage :**

Bien que ce soit beaucoup plus une conséquence qu'une fonction, la présence d'un fluide d'une certaine densité dans le puits permet de diminuer le poids apparent du matériel de sondage, garniture de forage et tubages, ceci permet de réduire la puissance exigée au levage.

**k. Apport de renseignements sur le sondage :**

La boue permet d'obtenir des renseignements permanents sur l'évolution des formations et fluides rencontrés. Ces renseignements sont obtenus :

- ✓ Par les déblais remontés avec la circulation du fluide ;
- ✓ L'évolution des caractéristiques physiques et/ou chimiques de la boue ;
- ✓ La détection de gaz ou autres fluides mélangés à la boue.

**I. Contamination des formations productrices :**

La présence d'un fluide au droit de formations poreuses et perméables peut exercer une pression hydrostatique supérieure à la pression de gisement. Cela peut nuire à la future mise en production de cette zone.

**m. Corrosion et usure du matériel :**

Le fluide peut accélérer l'usure du matériel de sondage, par une action mécanique, si elle contient des matériaux abrasifs.

Elle peut aussi être corrosive par une action électrolytique (présence d'ions) due à un déséquilibre chimique.

**n. Toxicité et sécurité :**

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.

**II.4. Principaux produits pour les fluides de forage :**

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

Les principaux produits sont représentés dans le tableau suivant :

Principaux produits pour les fluides de forage		Présentation	Rôle et Utilisation
Colloïdes argileux	<i>Les bentonites</i>	Des argiles sodiques du type montmorillonite. En milieu salé (plus de 35 g/l de NaCl), les bentonites sont inefficaces.	Augmenter la viscosité et les gels des boues douces et diminuer leur filtrat.
	<i>Les attapulgites</i>	Des argiles du type Sépiolite. Ces argiles ne présentent aucune capacité à réduire le filtrat.	Employée pour augmenter la viscosité et les gels des boues salées (> 35 g/l de NaCl).
Colloïdes organiques	<i>L'amidon</i>	Extraits des pommes de terre, du riz, du maïs, du blé.	Ajouté dans les boues douces ou salées pour réduire le filtrat. Son emploi exige trois conditions : pH > 12, présence anti-ferment et la salinité supérieure à 200/250 g/l.
	<i>C.M.C. et P.A.C</i>	Le CMC est CarboxyMéthylCellulose, est un colloïde organique fermentescible à longue chaîne. les C.M.C. se dégradent lorsque la température atteint 150 °C. Le PAC Poly Anioniques de la Cellulose est identique à celle des C.M.C.	employées pour réduire le filtrat des boues réunissant les deux conditions suivantes : salinité inférieure à 30/35 g/l et $[Ca^{++}] < 500$ mg/l. Les P.A.C. présentent l'avantage sur les C.M.C. d'amener une inhibition plus importante des argiles forées.

Les fluidifiants et défloculants		Les additifs minéraux	
<p><i>Les lignosulfonates</i></p> <p>Les lignosulfonates sont extraits de la pâte à papier de conifères par traitement de la pulpe à l'aide d'un acide sulfite de métal lourd. Pour des raisons environnementales, il est actuellement interdit d'utiliser des lignosulfonates contenant des métaux lourds. Alors sont remplacés par des lignosulfonates sans chrome.</p> <p>Des fluidifiants entre 2 et 8 g/l de concentration, et comme un inhibiteur de gonflement et de dispersion des argiles à des doses plus élevées. Une boue traitée à l'aide de lignosulfonates résiste à de hautes concentrations en calcium et en NaCl et à des températures de 190 °C.</p>		<p><i>Na OH</i></p> <p>La soude caustique NaOH est une base forte.</p>	<p>La soude est employée pour accroître le rendement des argiles : 1 à 2 kg par mètre cube de boue, 3 à 4 kg/m<sup>3</sup> pour les boues à l'eau de mer, et augmenter le pH et accroître le rendement des produits organiques (fluidifiants et réducteurs du filtrat).</p>
		<p><i>Na<sub>2</sub> CO<sub>3</sub></i></p>	<p>Le carbonate de soude est employé pour accroître le rendement des argiles : 1 à 2 kg par mètre cube de boue, et précipiter le calcium.</p>
		<p><i>Na HCO<sub>3</sub></i></p>	<p>Le bicarbonate de soude est employé lors des reforages ciment pour précipiter la chaux libérée par le ciment (il faut approximativement ajouter 500 kg de bicarbonate de soude à la boue pour traiter 1 m<sup>3</sup> de ciment à reforer).</p>

Les produits organiques spéciaux	Les additifs minéraux			
<i>Anti-ferments</i>	<i>(Ca Cl<sub>2</sub>)</i>	<i>(NaCl)</i>	<i>(Ca (OH)<sub>2</sub>)</i>	<i>Le gypse (Ca SO<sub>4</sub>, 2 H<sub>2</sub>O)</i>
Se sont des dérivés phénoliques.				
Utilisés pour empêcher ou stopper la fermentation des colloïdes organiques (amidon, gomme, etc.) en milieu aqueux.	Le chlorure de calcium est employé lorsque l'on désire confectionner des boues contenant une concentration en calcium dans le filtrat plus élevée que celle que peut fournir le gypse. Il est utilisé, pour certaines boues à émulsion inverse.	Le chlorure de sodium est employé pour fabriquer des boues salées saturées, lorsque l'on doit forer dans des zones salifères (massives ou intercalations).	La chaux éteinte est employée pour augmenter la viscosité d'une suspension d'argile préalablement hydratée dans de l'eau (ceci entraîne une augmentation de filtrat) ; fluidifier certains types de boues salées saturées (Na Cl).	Le gypse est employé pour fabriquer les boues au gypse (utilisées lors du forage de gypse ou d'anhydrite). La solubilité du gypse est de 2,14 g/l en eau douce à la température de 20 °C. Les ions calcium apportés par le gypse empêchent le gonflement des argiles forcées, ce qui permet de travailler avec des viscosités plus faibles. Et Traiter les contaminations à base de carbonate.

Les produits organiques spéciaux		
<i>Anti-mousses</i>	Se trouve sous la forme de stéarate d'alumine, des alcools supérieurs (octylique, etc...), des tensioactifs (éthers polyoxyéthylènes).  Se sont des tensioactifs cationiques.	Ces produits favorisent le dégazage de la boue.  Ces additifs se fixent sur les parties métalliques et les roches formant un film lubrifiant et hydrophobe.
<i>Agents de décoincement</i>	Les produits A.F. (antifriction) sont en fait des lubrifiants permanents. Citons le graphite en poudre, les billes de verre, l'asphalte, etc. Les produits E.P. (extrême pression) sont en fait des «anti-grippants», c'est-à-dire qu'ils déposent un film lubrifiant à l'amorce du grippage des roulements de l'outil empêchant le phénomène de se produire. Le film ne peut donc se déposer qu'à très haute température (300 à 400 °C).	Ces produits ont été mis au point pour réduire l'usure des outils, de la garniture, des pièces en mouvement, des pompes, etc.
<i>Anticorrosions</i>	Comme le chromate de soude, le bichromate de potassium, etc. et les dérivés d'amines grasses.	Les boues aérées, les boues salées saturées et en général les boues ayant un pH inférieur à 10 corrodent les parties métalliques avec lesquelles elles sont en contact. Pour réduire ce phénomène, on peut ajouter dans la boue des produits anticorrosion.

	<i>Anti-bourrants</i>	Comme les glycols non miscibles.	Ces additifs empêchent les argiles forées de « coller » sur le métal des outils, ce qui évite le « bourrage » et permet d'appliquer des poids plus élevés sur un outil forant dans des argiles ou des marnes.
	<i>La barytine Ba SO<sub>4</sub></i>	C'est l'alourdissant le plus couramment utilisé.	Ajouter pour augmenter la densité d'un fluide (la boue de forage).
<b>Les alourdissants</b>	<i>Ca CO<sub>3</sub></i>	C'est un alourdissant utilisé principalement dans les fluides de compléon.	Ajouter pour augmenter la densité d'un fluide (la boue de forage). Il est aussi employé comme alourdissant dans les fluides ayant une faible viscosité parce qu'il ne sédimente pas facilement.
<b>Les colmatants</b>	<i>Colmatants granulaires</i>	Se sont des coquilles de noix. Les granulométries utilisées sont les suivantes : <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Produit brut tout venant,</li> <li>✓ de 1,6 à 5 mm Gros,</li> <li>✓ de 0,5 à 1,6 mm Moyen,</li> <li>✓ de 0,16 à 1,6 mm Fin.</li> </ul>	Utilisées lorsqu'il y a une perte de boue lors de circulation.

<b>Les colmatants</b>			
	<i>Colmatants à prise</i>	<i>Colmatants lamellaires</i>	<i>Colmatants gonflants</i>
<i>Colmatants fibreux</i>	Citons : ✓ le ciment, ✓ le ciment magnésien, ✓ le plâtre, ✓ les bouchons de baryte ou de bentonite.	Citons, les gcmmes de GUAR, qui à l'aide d'un catalyseur, fournissent une gelée extrêmement visqueuse.	Le même rôle.
	Le même rôle.	Le même rôle.	Le même rôle.

**Tableau 2 :** les différents produits des boues de forage (rôle et utilisation).

## II.5. Caractéristiques des boues de forages :

La viscosité est la principale propriété des boues de forage, mais la densité est la seconde. Dans l'opération de forage, la pression au fond du trou doit être contrôlée soigneusement. La pression dans le puits doit excéder la pression des formations géologiques et ne doit pas aller au-dessus de la pression de rupture des différentes roches forées. En dessous de cette gamme de pression, les venues de fluide ou de gaz peuvent endommager l'opération de forage, et au-dessus d'elle, les pertes de boue ou l'instabilité mécanique du puits pourrait se produire. Un produit sous forme de poudre (barytine ou calcaire) est ainsi employé comme matière de charge. Le mélange ou la dilution permet une commande précise de sa valeur.

A cause de cette pression de contre-balancement en conditions normales de forage, une diffusion du fluide dans les milieux poreux est possible. Pour diminuer autant que possible cette invasion, un produit de filtration appelée cake est formée sur les parois du trou foré. Ce film doit être de perméabilité faible et doit être facilement enlevé quand les opérations de cimentage ou d'accomplissement se produisent.

### II.5.2. La densité :

La densité est un paramètre important des boues de forage. Elle doit être suffisamment élevée pour contrebalancer la pression exercée par les venues d'eau, d'huile et de gaz et par conséquent les éruptions. Il ne faut pas également qu'elle dépasse la limite de résistance des parois du puits (formations traversées) pour ne pas les fracturer et pour ne pas avoir une perte de boue au cours de sa circulation. La boue exerce une pression sur les parois du puits donnée par l'expression suivante:

$$p = \frac{h \times d}{10}$$

Où : P : Pression de la formation ; en Bar.

h : Profondeur de la couche traversé ; en m.

d : Densité de la boue.

10 : Pesanteur.

**II.5.2. La filtration :****1. Principe fondamental de la filtration :**

Les fluides de forage sont des suspensions composées d'une phase liquide et des particules solides. La filtration se réfère à la phase liquide du fluide de forage forcé à traverser la formation perméable causé par la différence de pression. Durant ce processus les particules solides sont retenues à la surface de la paroi, formant un cake de filtration. La perméabilité c'est la capacité d'un fluide à s'écouler à travers une formation poreuse.

Les systèmes de boue doivent être conçus pour sceller les zones perméables aussi vite que possible avec des cakes lisses et minces. Dans les formations de haute perméabilité avec de larges pores, toute la boue pourrait envahir la formation (selon la taille des particules solides de la boue). Dans de telles situations des agents de liaisons doivent être utilisés pour arrêter les pertes de boue. La taille des agents de liaisons doit être la moitié de la taille des pores de la formation. On peut citer dans cette gamme, les carbonates de calcium, les dérivées de la cellulose et une large variété d'autres matériaux réducteurs de filtrat.

Deux sortes de filtrations ont lieu pendant le forage : la filtration statique pendant arrêt de la circulation du fluide, et la filtration dynamique au cours de la circulation du fluide qui entraîne une érosion du cake formé. Le volume du filtrat est fonction :

- ✓ De la nature de la formation ;
- ✓ Du temps ;
- ✓ De la pression différentielle ;
- ✓ De la viscosité du fluide ;
- ✓ De la température ;
- ✓ De la distribution en taille des particules.

Les propriétés de filtration des fluides de forage sont évaluées et contrôlées par des tests API. Ce sont des tests en régime statique utilisant un filtre presse standardisé. Ces tests peuvent être réalisés à hautes pressions et hautes températures. De nombreux travaux et études ont été sur la filtration et l'évolution de ses paramètres sous différentes conditions inhérentes au forage.

## 2. Rôle du filtrat :

Le filtrat est d'une importance capitale dans le forage d'un puits ; il doit être suffisamment élevée pour augmenter la vitesse d'avancement, suffisamment bas pour ne pas déliter ou faire gonfler les formations argileuses et marneuses et pour éviter les coulages du matériel tubulaire en face des zones perméables (calcaire, dolomie, grès,...etc.).

Il ne doit pas envahir les formations productives, car il peut occasionner des émulsions avec l'huile en place ou modifier la porosité et la perméabilité de ses formations et fixer le filtrat que doit posséder la boue est un problème délicat qui nécessite une grande connaissance des problèmes et des objectifs de forage.

### II.5.3. Le pH.

Une solution aqueuse peut contenir divers ions ; elle possède toujours une plus ou moins grande quantité, d'ions  $H^+$  et  $OH^-$  dissociés.

Pratiquement, le pH des boues de forage couramment utilisées varie entre 6 et 13,5.

Les boues dont le pH est inférieur à 10,5 sont dites à bas pH, celles dont le pH est supérieur à 10,5 sont dites à pH élevé.

Le pH est mesuré :

- ✓ soit par une méthode colorimétrique (papier pH ou indicateurs colorés) ;
- ✓ soit par une méthode électrométrique (pH-mètre), au moyen d'électrodes en verre.

### II.5.4. L'alcalinité :

La mesure du pH est insuffisante pour permettre un bon contrôle des propriétés de la boue de forage. Elle est d'ailleurs parfois difficilement à contrôler, surtout aux pH élevés, car elle manque de sensibilité.

Une mesure complémentaire s'avère nécessaire, c'est celle des alcalinités. Lorsque le pH apporte la concentration en ions  $H^+$  (ou  $OH^-$ ) libres, la mesure des alcalinités donne les concentrations en bases solubles ou insolubles. Dans les boues de forages, ces bases sont principalement des carbonates, bicarbonates et hydroxydes et à un degré moindre, les silicates, les phosphates, les aluminates et les bases organiques. Trois alcalinités sont mesurées en pratique : PB, PF, MF ; où B signifie boue, F filtrat, P phénolphtaléine, M méthylorange ; le virage à la phénolphtaléine se produit à pH égale à 8,2 et celui du méthylorange est de 4,2.

**1. L'alcalinité PB :**

C'est la quantité d'acide  $H_2SO_4$ , N/50 nécessaire pour neutraliser  $1 \text{ cm}^3$  de boue, dilué avec de l'eau distillée. Le dosage doit être très rapide, car ce dosage a pour but de déterminer la teneur de la boue en  $Ca(OH)_2$ , souvent, en présence de carbonates.

**1. L'alcalinité pf et MF :**

Elle est déterminée de la même façon que l'alcalinité PB, sauf qu'on utilise  $1 \text{ cm}^3$  de filtrat de la même boue. Une boue à l'amidon, à pH élevé, doit effectivement contenir des ions  $OH^-$ . C'est une garantie contre la fermentation de l'amidon.

**II.5.5. Paramètres rhéologiques.**

La connaissance du comportement rhéologique des boues de forage est d'une importance capitale pour bien cerner tout son écoulement et pour savoir par quelle loi rhéologique cette boue est elle régie. La loi la plus simple du comportement est représentée par le modèle dit newtonien, tandis que les autres types de fluides sont qualifiés de non newtoniens. Les caractéristiques les plus recherchées par l'étude rhéologiques sont :

**1. La viscosité plastique (VP) :**

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

$$VA = L_{600}/2 \text{ (cP)} \quad \text{et} \quad VP = L_{600} - L_{300} \text{ (cP)}$$

**2. La contrainte seuil ou « Yield Point» (YP) :**

Les solides présents dans la boue de forage influencent un autre paramètre autre que la viscosité plastique ; c'est la contrainte seuil qui détermine la mesure de résistance initiale à franchir pour que le fluide s'écoule. Cette résistance est due aux forces électrostatiques attractives localisées sur ou près de la surface des particules. C'est une mesure dynamique. La contrainte seuil dépend des types des solides présents, de leurs charges de surface, respectives, de la concentration de ces solides, du type et la concentration des autres ions ou sels qui peuvent être présents.

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

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

### 3. Gels :

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

Le caractère thixotropique d'une boue est évalué en mesurant d'une part le gel 0 et d'autre part le couple après un repos de la boue de 10 min, ce qui est appelé le gel 10.

Le gel 0 varie pratiquement comme la viscosité plastique et le gel 10 comme la contrainte seuil avec cependant, pour ce dernier, une sensibilité particulière au traitement chimique.

- ✓ *Le gel 0.* Il représente la résistance du gel aussitôt après agitation de la boue. Il est mesuré à l'aide du viscosimètre du type FANN35 à une vitesse de 3 tr/min. il est exprimé en lb/100ft<sup>2</sup>;
- ✓ *Le gel 10.* Il représente la résistance du gel après un repos de la boue de 10 minutes, la mesure est faite de la même manière que pour le gel 0. Il est exprimé en lb/100ft<sup>2</sup>.

### II.6. Types de fluides :

Plusieurs classifications des types de boue peuvent être adoptées. Il est cependant habituel de présenter les boues en fonction de la phase continue. Nous allons donc rencontrer :

- ✓ Les fluides dont la phase continue est de l'eau ;
- ✓ Les fluides dont la phase continue est de l'huile ;
- ✓ Les fluides dont la phase continue est de l'air.

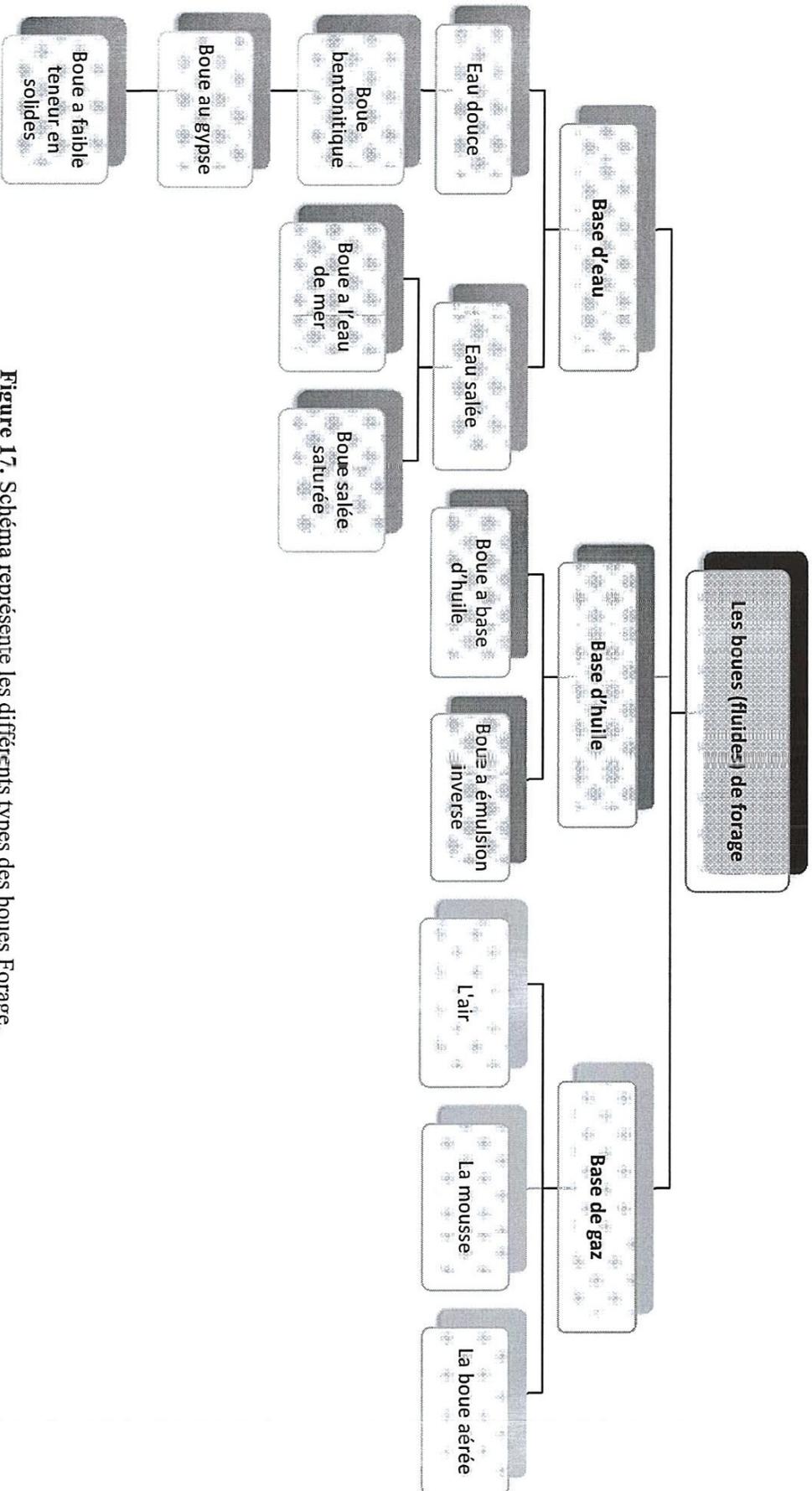


Figure 17. Schéma représente les différents types des boues Forage.

**II.6.1. Boues à base d'eau :****II.6.1.1. Base d'eau douce :****1. Boue bentonitique :**

Se divise en deux types la boue bentonitique sans amincissant et la boue bentonitique avec amincissants minéraux.

**a. Boue bentonitique sans amincissant :**

C'est une suspension de bentonite ou d'argile activée dans de l'eau douce. Le pH de la suspension est de 8,5 à 9. On peut améliorer les caractéristiques de la filtration par ajout d'un colloïde organique non fermentescible (C.M.C. par exemple).

**Propriétés :**

Elle contient de faibles concentrations d'argiles hautement colloïdales ; ses caractéristiques sont :

- ✓ Faible densité initiale ;
- ✓ La contrainte seuil élevée ;
- ✓ Rhixotropie variable (gels) ;
- ✓ Filtrat A.P.I. de 12 à 25 cm<sup>3</sup>/30 min ;
- ✓ Cake mince, souple et assez résistant.

**Utilisation :**

Cette boue peut être utilisée comme fluide de début de sondage et transformée progressivement en boue naturelle.

**b. Boue bentonitique aux dérivés de la lignine et du lignite :**

Les dérivés ligneux les plus utilisés actuellement sont les ligno-sulfonates sans chrome et les lignites (sans chrome), appelés couramment F.C.L.<sub>cf</sub> et L.C.<sub>cf</sub>.

Les boues douces bentonitiques au F.C.L.<sub>cf</sub> peuvent se définir comme des suspensions bentonitiques dont l'état colloïdal sont améliorées et protégé par un lignosulfonate. Eventuellement la protection de cet état colloïdal peut être renforcée par un colloïde organique (en général la C.M.C.) et/ou un lignite. Le pH de ces fluides est en général contrôlé à la soude entre 9 et 10,5.

**c. Boue douces au F.C.L.cf et L.C.cf :**

Ce sont des boues au F.C.L.cf (lignosulfonates de fer sans chrome) auxquelles on ajoute un lignite afin de renforcer l'action du F.C.L.cf. La présence du L.C.cf confère à cette boue une meilleure stabilité des caractéristiques de filtration, particulièrement aux températures élevées (200°C).

La technologie des boues douces au F.C.L.cf et L.C.cf est identique à celle des boues douces au F.C.L.cf : la seule différence réside dans l'adjonction de 5 à 10 kg de L.C.cf par m<sup>3</sup> de boue.

Des contraintes environnementales plus strictes limitent l'utilisation de ces produits (présence de métaux lourds). Des fluides destinés à les remplacer, notamment aux hautes températures, sont actuellement utilisés.

**2. Boue au gypse :**

C'est une boue bentonitique à pH inférieur à 11, sursaturée en sulfate de calcium (CaSO<sub>4</sub>, 5 à 10 fois la saturation de la phase liquide (1 à 2 g/l)) dont les caractéristiques rhéologiques sont contrôlées par des fluidifiants organiques ou minéraux.

La mise au point des lignosulfonates a permis la mise en œuvre de ce type de boue d'un entretien plus aisé que les boues à la chaux (boue dont la source de calcium était de la chaux). Ces fluides (boue à la chaux) ont été abandonnés car le contrôle de la rhéologie était délicat et d'une sensibilité plus importante aux contaminants.

**Propriétés :**

Cette boue possède les propriétés dues à la présence de sels de calcium, les faibles alcalinités permettent de minimiser la "fragilisation" de l'argile du puits par les ions OH<sup>-</sup>.

La présence de fluidifiant organique renforce l'action inhibitrice du fluide et lui donne une résistance à la température que ne possédaient pas les boues à la chaux. Jusqu'à 60 à 70 g/l de NaCl, la contamination n'est pas très marquée.

**Utilisation :**

En premier lieu, dans les horizons à gypse ou anhydrite.

### 3. Boue a faible teneur en solides

La vitesse d'avancement des outils de forage, ainsi que la densité sont fortement affectées par la teneur en solides. Aussi, lorsque la tenue des formations le permet, les boues à faible teneur en solides ou l'eau sont utilisées.

#### a. Boue au bio-polymère

L'argile n'entre qu'à très faible concentration dans la fabrication de cette boue à basse teneur en solides. Le colloïde utilisé pour contrôler la rhéologie est un polymère organique formé bactériologiquement par l'action de la bactérie *Xanthomonas Campestris* sur des hydrates de carbone.

L'utilisation d'un autre colloïde que l'argile a pour but d'éviter les limitations imposées par celle-ci. Avec une boue à base d'argile, tout additif agit à double sens :

Lorsque l'on effectue un traitement de dispersion ou de défloculation de la bentonite, on disperse ou déflocule également les solides argileux forés.

Tout traitement d'élimination ou de décantation des solides forés entraîne une élimination ou une décantation de la bentonite.

#### Propriétés :

- ✓ Très faible teneur en solides (environ 1 %) ;
- ✓ densité minimum fonction de la nature de l'eau (douce, de mer, ou salée saturée) ;
- ✓ particularités rhéologiques :
  - ✓ à des taux de cisaillement élevés, on a de faibles tensions de cisaillement,
  - ✓ à des taux de cisaillement faibles, on a de fortes tensions de cisaillement.

Ceci se traduit en circulation par une boue plus "fluide" au droit des événements de l'outil que dans l'annulaire.

Cette particularité permet d'obtenir des vitesses d'avancement et des pertes de charges à l'outil proches de celles obtenues en forage à l'eau, tout en permettant de maintenir les déblais en suspension dans les gros espaces annulaires.

Cette propriété a aussi pour conséquence de faciliter la séparation des solides dans les hydrocyclones.

#### Utilisation :

Cette boue peut être utilisée dans tous les sondages où l'on souhaite une faible teneur en solides en boue à base d'eau.

**a. Boue au polymère naturel :**

Comme pour la boue au bio-polymère, ce type de boue a l'avantage de ne pas obligatoirement nécessiter la présence de bentonite, ce qui lui confère les mêmes avantages dans ce domaine. Le polymère est une gomme issue du Guar.

**Propriétés :**

- ✓ Très faible teneur en solides (environ 1 %) ;
- ✓ densité minimum fonction de la nature de l'eau (douce, de mer ou salée saturée) ;
- ✓ possibilité de fluidification rapide ce qui est particulièrement intéressant lors des mises en production des forages hydrauliques.

**Utilisation :**

Cette boue peut être utilisée dans tous les sondages où l'on souhaite une faible teneur en solides en boue à base d'eau, lorsqu'aucune difficulté importante n'amène à exiger une boue très élaborée et que le circuit boue n'entraîne pas une élimination de la boue aux vibrateurs.

Ces restrictions conduisent à utiliser ce type de boue surtout en démarrage de puits en mer sous forme de bouchon visqueux, en forages hydrauliques ou miniers.

**b. Boue PHPA (poly-acrylamide partiellement hydrolysé) :**

Suite aux contraintes environnementales naissantes dans les années 1980, les services boue des différentes compagnies cherchèrent à maîtriser le gonflement et par là même, la dispersion des argiles par un moyen autre que les boues à l'huile. Dans cet état d'esprit, sont arrivés les PHPA et plus tard les boues au glycol.

**Principe :**

Le PHPA est un polymère poly-acrylamide partiellement hydrolysé. Sa fonction principale est, dans le domaine pétrolier, d'encapsuler les argiles avant leur gonflement et de les amener à la surface dans cet état (début de gonflement).

**Utilisation :**

Forage d'argile réactive de type montmorillonite ou présentant un pourcentage de "mixed layer expandable" (feuillet de type montmorillonitique) important.

### II.6.1.2. Boues à base d'eau salée :

Dans ce paragraphe, nous trouverons les fluides contenant une eau dont la concentration est supérieure à 10 g/l. Cette solution de base est en général une saumure de chlorure de sodium allant de 10 g/l à la saturation (318 g/l à 20°C).

Le principe de base de ce système est le blocage des pores. Il vaut mieux ne pas l'utiliser dans les zones réservoir.

#### 1. Boue à l'eau de mer :

Pour des raisons économiques et matérielles, le forage en mer utilise l'eau de mer dans les boues à base d'eau.

Il n'y a pas à proprement parler un type de boue à l'eau de mer. Tous les types de boue peuvent être plus ou moins aisément contrôlés en présence d'eau de mer. Dans la pratique, les conditions propres au forage en mer, entre autres son prix de revient, les conditions de stockage et d'approvisionnement, font que l'on adopte un type de boue résistant aux contaminations éventuelles sans nécessiter de traitement important ni surtout d'arrêt de forage.

#### Propriétés :

Ce type de boue n'a pas de propriétés propres. A partir de cela, nous devons réaliser une boue satisfaisant les impératifs du sondage.

#### 2. Boues salées saturées :

Cette boue, dont la phase continue est une saumure saturée, est utilisée en forage de zones salifères, soit le forage de sel massif, soit le forage d'un découvert comportant une zone salifère.

Elle possède du fait de sa saturation des caractéristiques spécifiques :

- ✓ Elle évite le cavage des formations salifères du fait de la saturation de sa phase continue ;
- ✓ Elle ne permet pas le développement des bactéries : il est donc possible d'utiliser des colloïdes organiques fermentescibles ;
- ✓ Elle a une densité minimale de 1,20 (densité de sa phase continue) ;
- ✓ Elle est corrosive.

Nous pouvons rencontrer deux types de boues salées saturées :

- ✓ la boue salée saturée sans amincissant ;
- ✓ la boue salée saturée avec amincissants minéraux.

**a. Boue salée saturée sans amincissant :****Composition :**

Une boue salée saturée au chlorure de sodium est constituée de :

- ✓ Eau douce ou eau de mer ;
- ✓ Sel ajouté jusqu'à saturation. Il faut environ 350 kg de sel industriel pour saturer 1 m<sup>3</sup> d'eau à température ambiante ;
- ✓ Colloïdes minéraux du type argile pour boues salées c'est-à-dire attapulgite ou sépiolite ;
- ✓ Réducteur de filtrat fermentescible ou non. L'amidon est le plus utilisé, jusqu'à des températures de fond de 130 à 140°C (à une température supérieure, l'amidon se dégrade).

**b. Boues salées saturées aux amincissants minéraux :**

Ce type de boue est une évolution naturelle des boues salées saturées sans amincissant.

L'aminçant employé est en général la chaux éteinte, quelquefois la soude caustique.

**Propriétés :**

En plus des propriétés citées pour la boue sans amincissant, l'apport de chaux inhibe partiellement les argiles. Dans les conditions normales, la chaux ajoutée est sans effet sur les réactions d'échange de base et agit seulement par adsorption sur la surface de l'argile, modifiant ainsi la forme et l'hydratation (eau d'imbibition) de la particule et donc la rhéologie et le filtrat de la boue.

**Utilisation :**

Comme pour les boues sans amincissant, avec cependant la possibilité de contrôle plus aisé des caractéristiques lors du forage de zones argileuses très colloïdales.

**II.6.2. Boues à base d'huile :**

Une boue à l'huile est un fluide où la phase continue est de l'huile, exclusivement de l'huile. Nous verrons plus loin les avantages de cet état.

Nous distinguons deux catégories :

- ✓ les boues à l'huile ;
- ✓ les boues émulsionnées inverses (eau dans huile).

**II.6.2.1. Boues à l'huile**

Nous classons dans cette catégorie les fluides de forage ou de complétion constitués d'une phase continue huile et d'une phase dispersée aqueuse, représentant quelques pour cent en volume seulement. Cela par opposition aux boues à émulsion inverse qui elles, peuvent avoir une phase aqueuse dispersée dépassant 50 % en volume.

**Propriétés :**

Une boue à l'huile cause le minimum de dommages aux formations productrices. Elle possède des caractéristiques rhéologiques permettant l'élimination correcte des déblais et le maintien en suspension des alourdisants.

Les caractéristiques peuvent être contrôlées à la suite d'apports accidentels d'eau dus aux conditions atmosphériques, aux opérations de forage, à de faibles venues dans le puits ... etc.

La filtration A.P.I. à haute pression et haute température est faible. Le filtrat est exclusivement composé d'huile.

La densité du fluide de forage peut être de 0,80.

**Utilisation :**

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.6.2.2. Boues à émulsion inverse**

Ce type de boues, du fait que le filtrat est composé exclusivement d'huile, présente tous les avantages des boues à l'huile et permet de pallier certains inconvénients de ces dernières :

- ✓ sensibilité à l'eau ;
- ✓ contrôle de la rhéologie plus aisé ;
- ✓ risque d'incendie ;
- ✓ prix de revient au m<sup>3</sup> élevé.

Nous classons dans les boues à émulsion inverse eau/huile, les fluides de forage ou de complétion constitués d'une phase continue huile et d'une phase dispersée aqueuse pouvant atteindre 50 % en volume de la phase liquide.

**Propriétés :**

Une boue à émulsion eau/huile satisfait aux conditions suivantes :

Causer le minimum de dommages aux formations productrices.

Posséder des caractéristiques rhéologiques telles que :

- ✓ Les alourdisants sont maintenus en suspension dans les conditions d'utilisation sur chantier ;
- ✓ Les déblais de forage sont correctement remontés.

Les caractéristiques peuvent être contrôlées même à la suite d'apports assez importants d'eau dûs aux conditions atmosphériques, aux opérations de forage, à des venues dans le puits, ...etc.

La filtration API à haute pression et haute température est faible. Le filtrat est exclusivement composé d'huile.

L'entretien et le traitement de la boue sont aussi souples que ceux des boues à base d'eau.

Les boues à l'huile précédentes ne réunissaient pas ces conditions.

**Utilisation :**

Les boues à émulsion eau/huile sont principalement utilisées pour résoudre des problèmes de forage :

- ✓ argiles gonflantes et/ou à fort pouvoir dispersant ;
- ✓ grandes épaisseurs de sels et/ou d'anhydrite ;
- ✓ puits profond posant des problèmes de hautes températures ;
- ✓ forages dirigés ;
- ✓ instrumentations (collage, surforage, ...etc.) ;
- ✓ pour le forage et le carottage des niveaux producteurs dans les sondages de développement ou d'extension ;
- ✓ pour les reprises et entretiens de puits productifs ;
- ✓ d'une manière générale pour tous les travaux au droit des horizons productifs.

Type de boue	Composition	Caractéristiques	Stabilités aux contaminants	Domaine d'utilisation
Boue bentonitique au FCL/LC	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bentonite</li> <li>✓ FCL*</li> <li>✓ Soude</li> <li>✓ CMC**</li> <li>✓ LC***</li> <li>✓ Anti mousse</li> </ul>	<p>pH&gt;9 T= 220°C</p>	Bonne	Large domaine d'application
Boue bentonitique sans amincissant	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bentonite</li> <li>✓ CMC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Faible densité initiale ;</li> <li>✓ La contrainte seuil élevée ;</li> <li>✓ Thixotropie variable (gels) ;</li> <li>✓ Filtrat A.P. de 12 à 25 cm<sup>3</sup>/30min.</li> </ul>	Moyenne	Fluide de début de sondage
Boue au gypse	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bentonite</li> <li>✓ FCL</li> <li>✓ Soude</li> <li>✓ CMC</li> <li>✓ Gypse</li> </ul>	<p>pH&gt;9 T= 200°C</p>	Bonne	Zones du gypse ou anhydride
Boue PHPA (poly-acrylamide partiellement hydrolysé)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ X C polymère</li> <li>✓ P.A.C.****</li> <li>✓ Bentonite</li> <li>✓ Potasse (KOH) ou Soude</li> <li>✓ Baryte</li> <li>✓ PHPA*****</li> <li>✓ K Cl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ rejet acceptable d'un point de vue environnemental ;</li> <li>✓ bonnes caractéristiques rhéologiques ;</li> <li>✓ peu fonctionner avec un pH neutre ;</li> <li>✓ inhibition du gonflement de ces argiles.</li> </ul>	Moyenne	Forage de zone argileuse

Eau douce

	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Polymères</li> <li>✓ Chlorure chromique</li> <li>✓ Soude</li> <li>✓ Bactéricide</li> <li>✓ Bentonite</li> <li>✓ FCL + CMC</li> </ul>	Filtrat > 12 cm <sup>3</sup>	Moyenne	Formations peu problématiques
	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sel</li> <li>✓ Argile</li> <li>✓ Amidon</li> <li>✓ Chaux</li> </ul>	Corrosive T < 150°C	Bonne : gypse, anhydride. Moyenne : argiles	Formations peu problématiques
	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sel</li> <li>✓ Argile</li> <li>✓ Amidon</li> <li>✓ Soude</li> <li>✓ FCL</li> <li>✓ LC</li> </ul>	Corrosive T < 140°C	Bonne	Formations peu problématiques
<b>Boue a l'huile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Huile</li> <li>✓ Eau</li> <li>✓ CaCl<sub>2</sub></li> <li>✓ Emulsifiant</li> <li>✓ Réducteur de filtrat</li> <li>✓ Chaux</li> <li>✓ Viscosifiant</li> </ul>	O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> = 80/20 ES = 600	Excellente	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Puits fortement déviés ;</li> <li>✓ Puits haute pression ;</li> <li>✓ Puits haute température ;</li> <li>✓ Formation fragile.</li> </ul>

**Tableau 3 :** Les différents types de boues de forage (eau, huile) et ces rôles et utilisations.

\* : Lignosulfonates de fer sans chrome.

\*\* : CarboxyméthylCellulose.

\*\*\* : Lignites sans chrome.

\*\*\*\* : Poly Anioniques de la Cellulose.

\*\*\*\*\* : Poly-Acrylamide Partiellement Hydrolyse.

**II.6.3. Boues à base de gaz :**

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 intentionnellement. Le gaz peut être de l'air ou du gaz naturel, et peut appartenir à une mousse ou à un brouillard. Citons brièvement les fluides gazeux utilisés:

**II.6.3.1. Boue à l'air :**

L'air est le fluide de forage qui possède la plus basse densité et le prix de revient le moins élevé, mais le forage à l'air qui a commencé en 1940, devient difficile lors de venues importantes d'eau. Il apporte une solution à des problèmes compliqués parfois impossibles à résoudre avec les méthodes de forage à la boue conventionnelle. Il est recommandé dans le cas des pertes totales répétées de la boue lors de la circulation ainsi que dans le forage des couches productrices sous faible pression. En Algérie, les premiers forages à l'air ont été réalisés entre 1954 et 1960 dans la région de Tebessa sur les puits Djebel Foua, Djebel Onk.

**II.6.3.2. Boue à la mousse :**

Les mousses sont des dispersions d'un volume de gaz (relativement) important dans un volume de liquide relativement faible. Elles sont utilisées comme fluides de forage lorsque les terrains traversés sont fracturés, ou lorsque le forage à l'air est impossible parce que la pression nécessaire ne peut être fournie sur le chantier. L'avantage du forage à la mousse se résume par sa faible pression hydrostatique au fond et par son excellent pouvoir de remontée des déblais à moins que la mousse ne refroidisse pas convenablement les terrains traversés ainsi que le train de sonde et ne contrôle pas la tenue des parois du puits (pas de cake).

**II.6.3.3. La boue aérée :**

Le forage à la boue aérée est utilisé afin d'éviter les pertes de circulation et pour avoir un fluide de forage plus léger. Les avantages sont une bonne tenue des parois grâce à un cake contrôlé, une tendance aux pertes de circulation fortement réduite et une vitesse d'avancement plus grande, une assez bonne capacité de refroidissement des terrains traversés et du train de sonde, à moins que la stabilité de la boue aérée ne soit liée à une circulation effective des fluides.

### **II.7. Conclusion :**

D'après ce qu'on a vu dans cette chapitre, il y a plusieurs types de la boue de forage dans différents phases (eau, huile, gaz), mais ces types des boues lors de l'utilisation en forage doivent être contrôlées pour éviter les problèmes (décalage dans les propriétés de la boue) et aussi maintenir le bon rendement de ces fluides.

**Partie expérimentale :**

**Chapitre III :**  
**Etude et suivie des**  
**propriétés de la boue de**  
**forage**

### Chapitre III : Etudes et suivies des propriétés des boues de forage

#### III.1. Introduction :

Différents types de la boue de forage (eau, huile, gaz), sont utilisées selon la phase de forage. Ces boues doivent être contrôlées pendant le forage pour suivre la variation des propriétés de la boue en vue de maintenir le bon rendement de ces fluides.

Diamètre de forage (puits)	Intervalles (m)	La longueur (m)	Type de boue
La phase I : 17 ½ pouces	0 – 616	616	Boue bentonitique
La phase II : 12 ¼ pouces	616 – 1871	1255	Boue à l'huile
La phase III : 8 ½ pouces	1871 – 2748	877	Boue à l'huile
La phase IV : 6 pouces	2748 – 2963	215	Boue à l'huile

**Tableau 4 :** Différents types de boues selon la phase de forage.

## III.2. Testes physiques et chimiques effectués :

Phases de forage	Type de boue	Testes effectués	
		Chimiques	physiques
La phase I : 17" ½	Boue bentonitique	1. Détermination de l'alcalinité : ✓ Phénophtaléine filtrat PF ✓ Méthylorange filtrat MF ✓ Phénophtaléine boue PB 2. Quantité des chlorures Cl <sup>-</sup> 3. Quantité de calcium Ca <sup>2+</sup> 4. Quantité d'argiles	✓ La densité ✓ Concentration en sable ✓ Filtrat et cake ✓ La distillation ✓ La viscosité
La phase II : 12" ¼	Boue à l'huile	1. Détermination de l'alcalinité : ✓ Phénophtaléine boue PB 2. Quantité des chlorures Cl <sup>-</sup> 3. Quantité de calcium Ca <sup>2+</sup>	✓ La densité ✓ Filtrat et cake ✓ La distillation ✓ La viscosité ✓ Conductivité électrique
La phase III : 8" ½	Boue à l'huile	1. Détermination de l'alcalinité : ✓ Phénophtaléine boue PB 2. Quantité des chlorures Cl <sup>-</sup> 3. Quantité de calcium Ca <sup>2+</sup>	✓ La densité ✓ Filtrat et cake ✓ La distillation ✓ La viscosité ✓ Conductivité électrique
La phase IV : 6"	Boue à l'huile	1. Détermination de l'alcalinité : ✓ Phénophtaléine boue Pb 2. Quantité des chlorures Cl <sup>-</sup> 3. Quantité de calcium Ca <sup>2+</sup>	✓ La densité ✓ Filtrat et cake ✓ La distillation ✓ La viscosité ✓ Conductivité électrique

Tableau 5 : les testes réalisé selon les phases de forage.

### III.3. Modes opératoires :

#### III.3.1. Testes physiques:

Les différents testes physiques effectués sont :

##### III.3.1.1. La densité :

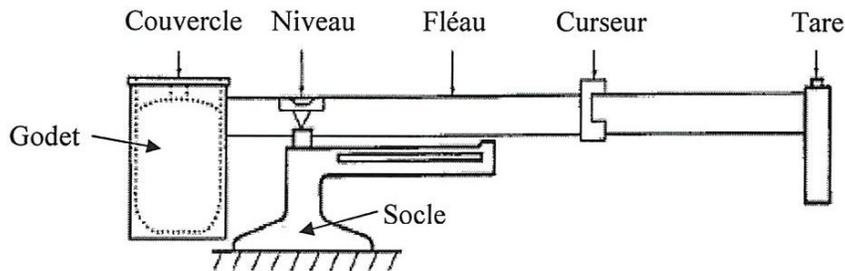


Figure 18. Densimètre à boue.

##### a. 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 à 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.

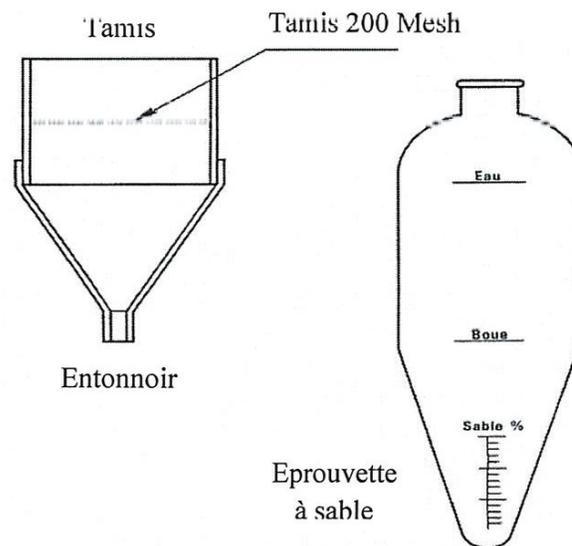
##### III.3.1.2. Concentration en sable :

###### a. Principe :

On filtre de la boue sur un tamis 200 Mesh Tyler et on mesure dans une éprouvette conique (élutriomètre) le pourcentage en volume de sable contenu dans la boue. La terminologie "sable" n'est pas prise dans son sens minéralogique mais indique tous les insolubles d'une section supérieure à 74 microns.

**b. Mode d'emploi :**

- ✓ Remplir de boue l'éluutriomètre jusqu'à la graduation "boue" (75 cm<sup>3</sup>).
- ✓ Ajouter de l'eau jusqu'à la graduation "eau" et agiter vigoureusement après obturation avec le pouce ;
- ✓ Verser la boue diluée sur le tamis puis rincer l'éluutriomètre et verser les eaux de lavage sur le tamis ;
- ✓ Mettre le tamis sous un robinet et faire couler l'eau lentement jusqu'à ce qu'elle ressorte propre ;
- ✓ Emboîter l'entonnoir sur le tamis (côté sable) puis l'éluutriomètre sur l'entonnoir ;
- ✓ Renverser l'ensemble (éluutriomètre vers le bas) et faire couler l'eau sur le tamis (côté opposé au sable) ;
- ✓ Laisser décanter le sable et effectuer la lecture directement en % en volume par rapport à la boue.

**Figure 19.** Schéma d'éluutriomètre.

### III.3.1.3. Filtrat et cake :

#### a. Principe :

On soumet de la boue à une pression de 7 bars 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.

Dans le cas de la boue à base d'huile on applique une pression de 35 bars à une température de 250°F (degré fahrenheit).

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.

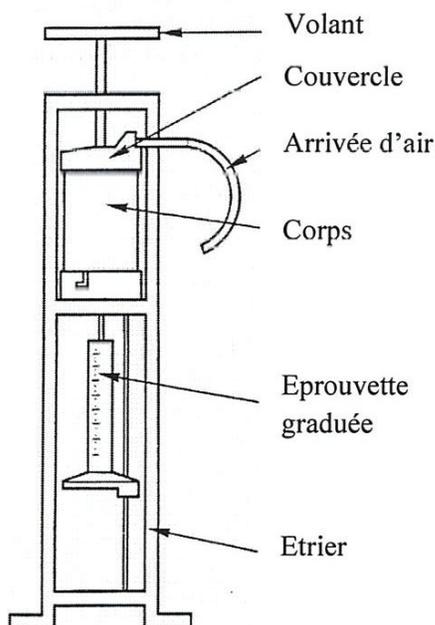


Figure 20. Schéma de Filtre-presse

#### b. Mode d'emploi :

- ✓ 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 ;
- ✓ 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 et simultanément déclencher le chronomètre ;
- ✓ Après 30 minutes lire le volume de fluide recueilli dans l'éprouvette, exprimé en  $\text{cm}^3$  c'est la valeur du filtrat API ;
- ✓ Appliquer une pression de 35 bars dans le cas de boue à base et simultanément déclencher le chronomètre ;
- ✓ Après 30 minutes lire le volume de fluide recueilli dans l'éprouvette, exprimé en  $\text{cm}^3$  c'est la valeur du filtrat HPHT ;
- ✓ 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.

#### III.3.1.4. Distillation :

##### a. Principe :

On soumet  $10\text{cm}^3$  de boue à une température élevée, dans le but d'évaporer la phase liquide, et la récupérer après condensation dans une éprouvette de même volume.

On obtient par une simple lecture les pourcentages d'huile et d'eau, de ces deux dernières valeurs on déduit le pourcentage des solides.

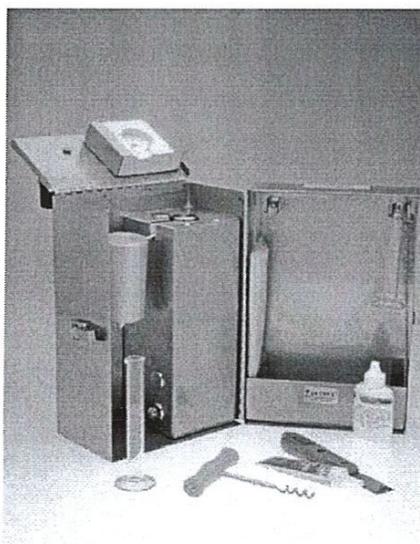


Figure 21. Le distillateur.

## III.3.1.5. La viscosité :

Le type de viscosité		Formule de calcul
La viscosité Marsh		Le temps de coulage de la boue dans le godet gradué (en secondes).
La viscosité effective	Viscosité apparente	$\mu_a (cP) = \frac{\theta_{600}}{2}$ $\mu_a$ : la viscosité apparente $\theta_{600}$ : Lecture Fann à 600 T/mn
	Viscosité plastique	$\mu_p (cP) = \theta_{600} - \theta_{300}$
	La contrainte seuil	$Y_p (lb/100ft^2) = 2\theta_{300} - \theta_{600}$ $Y_p$ : la contrainte seuil (yield point)
	Les Gels	Gel 0 : la résistance du gel à t=0 minutes. Gel 10 : la résistance du gel à t= 10 minutes.

Tableau 6 : Les différents types de viscosité.

## 1. Viscosité Marsh :

## a. Principe :

C'est un appareil du type statique : on mesure le temps en secondes que met une certaine quantité de boue pour s'écouler à travers l'ajutage de l'appareil qui n'est autre qu'un entonnoir normalisé. La boue s'écoule dans un godet gradué.

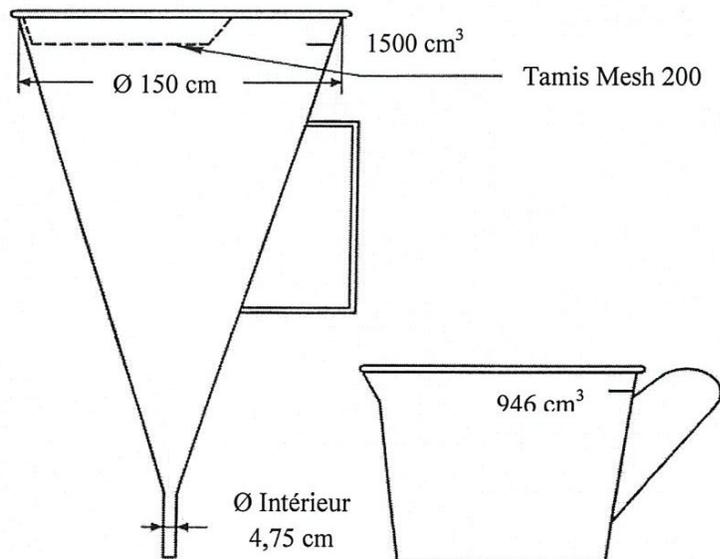


Figure 22. Schéma d'un viscosimètre Marsh.

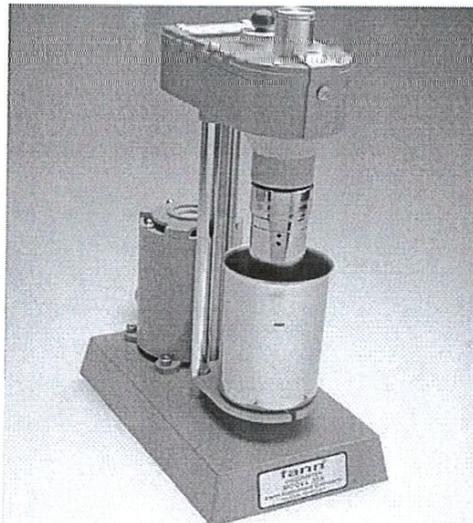
**Mode d'emploi :**

- ✓ Prendre l'entonnoir et fermer l'ajutage à l'aide du doigt ;
- ✓ Prélever de la boue dans la goulotte et verser sur le tamis de l'entonnoir jusqu'à ce que le niveau de boue affleure la surface de ce tamis (ceci correspond à un volume de  $1\,500\text{ cm}^3$ ) ;
- ✓ Tenir l'entonnoir par la poignée latérale, déclencher un chronomètre et laisser couler dans le godet gradué ;
- ✓ Stopper le chronomètre lorsque le niveau de boue atteint  $946\text{ cm}^3$  (1/4 de gallon dans le godet).

Le nombre de secondes lu au chronomètre représente la viscosité Marsh de la boue.

**2. Viscosité effective :**

La viscosité effective est déterminée par un appareil qui s'appelle le rhéomètre de type **Fann**.



**Figure 23.** Rhéomètre de type **Fann**.

**a. Principe :**

C'est un appareil à cylindres coaxiaux. Les modèles les plus couramment commercialisés comportent six vitesses de rotation (600 - 300 - 200 - 100 - 6 - 3 T/mn). Dans ce cas, le rotor est entraîné par un moteur électrique.

**b. Mode d'emploi :**

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

Faire de même pour les autres vitesses.

**3. Les Gels :**

- ✓ **Le gel 0.** Il représente la résistance du gel aussitôt après agitation de la boue. Il est mesuré à l'aide du viscosimètre du type FANN 35 à une vitesse de 3 tr/min. il est exprimé en lb/100ft<sup>2</sup>.
- ✓ **Le gel 10.** Il représente la résistance du gel après un repos de la boue de 10 minutes, la mesure est faite de la même manière que pour le gel 0. Il est exprimé en lb/100ft<sup>2</sup>.

**III.3.1.6. La conductivité électrique :**

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



Figure 24. Testeur de stabilité électrique.

### III.3.2. Testes chimiques :

Les testes chimiques effectuées sur la boue bentonitique et la boue à l'huile sont représentés dans le tableau suivant :

Boue bentonitique à base d'eau (WBM)	Boue à base d'huile (OBM)
1. Détermination de l'ulcalinité : ✓ Phénophtaléine du filtrat PF ✓ Méthylorange du filtrat MF ✓ Phénophtaléine de la boue Pb 2. Quantité des chlorures $Cl^-$ 3. Quantité de calcium $Ca^{2+}$ 4. Quantité d'argiles	1. Détermination de l'alcalinité : ✓ Phénophtaléine de la boue Pb 2. Quantité des chlorures $Cl^-$ 3. Quantité de calcium $Ca^{2+}$

Tableau 7 : Les différents tests chimiques de la boue bentonitique et la boue à l'huile.

#### III.3.2.1. Les Tests chimiques de La boue bentonitique à base d'eau (WBM) :

##### A. Détermination de l'alcalinité :

##### 1. Phénophtaléine du filtrat PF :

On ajoute 2 à 3 gouttes de Phénophtaléine à 1ml de filtrat.

- ✓ Si la couleur devient (Rose)  $PH > 8.3$ , on titre avec  $H_2SO_4$  N/50 jusqu'à décoloration.
- ✓ Si la couleur de filtrat ne change pas donc le  $PF_{(nombre\ de\ ml\ de\ H_2SO_4\ (N/50))} = 0$ .

**2. Méthylorange du filtrat MF :**

On ajoute 2 à 3 gouttes de Méthylorange dans 1ml du précédent filtrat, on doit remarquer une coloration jaune, on titre avec  $H_2SO_4$  N/50 jusqu'à ce que le filtrat devient (Rouge Orange) ou (Rose).

MF = Le volume (ml)  $H_2SO_4$  N/50 utilisé dans les deux opérations de décoloration.

**3. Phénophtaléine de la boue PB (Pm) :**

À 1ml de boue, on ajoute 25 à 50 ml d'eau distillée et 4 à 5 gouttes de phénophtaléine ce qui colore la boue en (Rose), puis on titre rapidement avec l'acide sulfurique (N/50) jusqu'à décoloration.

PB = Le volume (ml)  $H_2SO_4$  N/50.

**B. Quantité des chlorures (Cl):**

À 1ml de filtrat, on ajoute 25 à 50 ml d'eau distillée et 5 ml à 10ml (gouttes) de chromate de potassium la couleur devient (Jaune), puis on titre avec nitrate d'argent (N/50) jusqu'à ce que la couleur devienne (rouge-orange) selon la réaction :



A la fin de réaction, on a l'apparition d'un précipité marron ( $Ag_2CrO_4$ ):



$$[Cl^-]_{(gr/l)} = \frac{V_{AgNO_3} \times C_{AgNO_3} \times M_{Cl^-}}{V_{filtrat}} = 0,71 \times V_{AgNO_3} (ml)$$

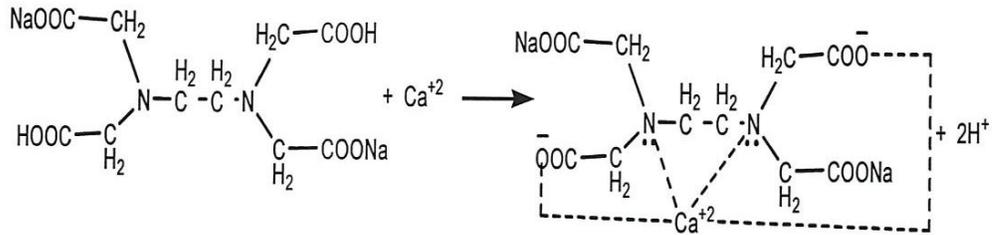
$$[NaCl]_{(gr/l)} = [Cl^-] \times \frac{M_{NaCl}}{M_{Cl^-}} = [Cl^-]_{(gr/l)} \times 1,65$$

**C. Quantité de calcium  $Ca^{2+}$  :**

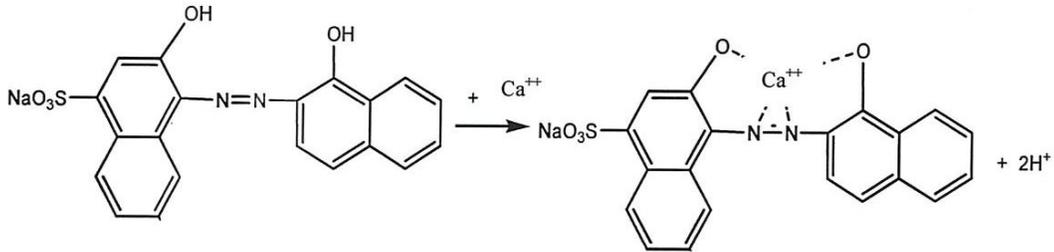
On prend 1ml de filtrat puis on ajoute 20 ml d'eau distillée et 2 gouttes de NaOH 1N (pH=12-13), on ajoute aussi une pincée de noir bleu d'ériochrome R, puis titrer avec EDTA 0,01M sous agitation de bêche jusqu'au virage de (Rouge) au (Bleu).

$$[Ca^{2+}]_{(gr/l)} = \frac{V_{EDTA} \times C_{EDTA} \times M_{Ca^{2+}}}{V_{filtrat}} = 0,4 \times V_{EDTA} (ml)$$

**Avec l'EDTA (éthylène diamine tétra acétique) :** on obtient le complexe CaEDTA selon la réaction :



Le noir bleu d'ériochrome R est utilisé comme indicateur coloré :



#### D. Détermination de la quantité d'argiles par le Bleu de méthylène :

A 1 ml de boue on ajoute 10 ml d'eau distillée, 15 ml d'eau oxygénée 3% et 0,5 ml d'acide sulfurique 5N. Faire bouillir doucement pendant 10 minutes, diluer avec 50 ml d'eau distillée, puis ajouter bleu de méthylène par portion de 0,5 ml et agitation pendant 30 secondes. Prélever une goutte et poser la sur le papier filtre (Wattman). On arrêtera l'ajout du BM lorsque la goutte donne un anneau (vert) entourant les solides teintés (lorsque la bentonite est saturée en Bleu de méthylène).

$$Q = V \times 14,25$$

**Q** : la quantité de Bentonite en g/l dans la boue

**V** : le volume bleu de méthylène utilisé en ml

**14,25** : c'est une constante selon la nature de la bentonite

#### III.3.2.2. Les Tests chimiques de la boue à base d'huile (OBM) :

##### A. Détermination de l'alcalinité phénolphtaléine PB :

- ✓ On prend une quantité de la boue de forage (1 ml).
- ✓ On mélange cette boue avec un solvant pour briser l'émulsion.
- ✓ 50/50 - Xylène / Alcool Isopropylique = 100 ml
- ✓ Propyl Propasol = 75 ml
- ✓ Agiter avec le briseur pendant 5 minutes avant titrage.

- ✓ Ajouter 200 ml d'eau distillé, puis 15-30 gouttes de l'indicateur phénolphthaléine et agiter.
- ✓ Au cours de l'agitation, titrer avec la solution de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1N jusqu'à disparition de la couleur violet. Noter le volume d'acide utilisé.

$$P_{\text{boue}} = \frac{\text{Le vomule (ml) d'acide sulfurique}}{1 \text{ ml boue}}$$

### B. La quantité des Chlorures Cl<sub>boue</sub> :

- ✓ Ajouter 15-30 gouttes de l'indicateur chromate de potassium sur l'échantillon précédent, et continuons d'agiter.
- ✓ Titrer avec AgNO<sub>3</sub> (0,1N) jusqu'au la couleur violet apparaitre.

$$[\text{Cl}^-]_{(\text{gr/l})} = \frac{V(\text{AgNO}_3) \times C(\text{AgNO}_3) \times M(\text{Cl}^-)}{1 \text{ ml boue}}$$

### C. La quantité de calcium Ca<sup>2+</sup><sub>boue</sub> :

- ✓ Mettre 1 ml de la boue dans un erlen Meyer.
- ✓ Ajouter 100 ml de xylène / alcool isopropylique (briseur d'émulsion) et agiter le mélange durant une minute.
- ✓ Ajouter 200 ml de l'eau distille, 3 ml de NaOH (1N) et 0.25 g de noir bleu d'ériochrome R (indicateur sous forme de poudre).
- ✓ Agiter toute le mélange durant 2 minutes.
- ✓ On laisse le mélange a part pour les phases devront séparer. Une couleur rouge apparaître dans la phase lourde indique que le calcium est présent.
- ✓ Titrer lentement (goutte à goutte) avec EDTA.
- ✓ Essayer d'agiter la phase lourde sans mixer les deux phases.
- ✓ Un changement de couleur rouge au couleur bleu-vert indique le point final.

$$[\text{Ca}^{2+}]_{(\text{gr/l})} = \frac{V_{\text{EDTA}} \times C_{\text{EDTA}} \times M_{\text{Ca}^{2+}}}{V_{\text{boue}}} = \frac{V_{\text{EDTA}}(\text{ml}) \times 0,01 \times 40}{1 \text{ ml}}$$

**III.4. Contrôle des boues de forage :****III.4.1. La phase I: (0 – 616 m) :****III.4.1.1. Choix de la boue :**

Cette section a été forée efficacement avec une boue Bentonitique simple, fabriquée à partir d'eau douce du chantier et de 80 à 90 kg/m<sup>3</sup> de bentonite.

La boue bentonitique permet :

- ✓ Un bon nettoyage du puits ;
- ✓ Maintenir les déblais en suspension pendant les arrêts de circulation ;
- ✓ Minimiser les risques de pertes de boue par infiltration.

Pour la préparation de la boue bentonite on mélange du carbonate de soude, du NaOH et des produits spécifiques (B Lube comme lubrifiant et le Dextrid comme agent de filtration) avec de la bentonite et de l'eau selon le tableau suivant :

Produits	Quantités Kg/m <sup>3</sup>
Carbonate de soude	1
Soude caustique	2
Bentonite Localc	80
B Lube	4 – 6
Dextrid (polyacrylate de sodium)	2

**Tableau 8 :** Formulation de la boue : Boue bentonite.

Les propriétés et les normes de la boue bentonitique utilisée sont représentées dans le tableau 7 :

Propriétés	Valeur
Densité	1.00 - 1.05
Viscosité Sec/qt	60 - 80
La contrainte seuil lb/100 ft <sup>2</sup>	50
Viscosité plastique (PV) (cP)	< 12
Gels 0/10 (min)	20 - 40
Filtration API ml/30 min.	<15 ml
pH	10.5 - 11
MBT	80 - 110

**Tableau 9 :** Propriétés de la boue sous les normes dans la phase I.

**III.4.1.2. Résultats des analyses :**

Les résultats des analyses effectuées durant 5 jours pour la phase I sont représentés dans le tableau 10 :

Jour	1	2	3	4	5
Profondeur (m)	160	283	382	419	616
Densité entrée	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Densité sortie	1.06	1.06	1.06	1.06	1.05
Gel 0 (lbs/100 ft <sup>2</sup> )	30	28	26	24	20
Gel 10 (lbs/100 ft <sup>2</sup> )	34	34	34	32	30
Viscosité Marsh (sec/qt)	86	80	78	78	78
Viscosité plastique (cP)	9	10	8	9	9
Contrainte seuil (lbs/100 ft <sup>2</sup> )	52	50	50	48	48
HPHT (ml/30 min)	Nc	Nc	13	13	12
Eau %	97	97	97	97	97
Solides %	3	3	3	3	3
LGS %	3	3	3	3	3
pH	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
Pf (cm <sup>3</sup> )	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Mf (cm <sup>3</sup> )	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Pm (cm <sup>3</sup> )	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
[Cl <sup>-</sup> ] <sub>boue</sub> (g/l)	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
[Ca <sup>++</sup> ] (g/l)	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
MBT (Kg/m <sup>3</sup> )	110	100	60	60	50

**Tableau 10 :** Résultats des analyses physico-chimiques pour la phase I.

**Discussion :**

D'après ces résultats, on remarque une petite variation de la densité (de 1,05 à 1,06) de la boue a l'entrée et à la sortie du puits ; ceci est dû à la présence de matières solides (du sable) qui doivent éliminer par centrifugation.

La présence des matières solides conduit aussi à des valeurs des gels et de viscosité Marsh supérieures à la valeur normale ; Par contre les valeurs de la contrainte seuil ne sont pas très affectées.

La mesure de filtration après le troisième jour de forage, les analyses d'alcalinité, de l'LGS, des chlorures et du calcium donnent des résultats conformes aux normes exigées.

La quantité de bentonite diminue progressivement en vue de préparer le terrain pour la cimentation qui nécessite une viscosité faible et donc une quantité de bentonite réduite, ceci est réalisé par centrifugation.

**III.4.2. La phase II : (616 – 1871 m) :****III.4.2.1. Le choix de la boue :**

Cette section a été réalisée avec la boue à base d'huile, **Système INVERMUL MUD 85/15.**

La boue à base d'huile permet :

- ✓ Une bonne lubrification ;
- ✓ La déposition d'un cake mince et résistant ;
- ✓ Une bonne stabilité des parois ;
- ✓ Un bon nettoyage de trou.

Pour la préparation de la boue bentonite on utilise les composés suivants :

Produits	Quantités kg/m <sup>3</sup> ou l/m <sup>3</sup>
Gaz oil	619.790
Eau	275.620
BDF 290	22
BARABLOCK	4
GELTONE	8
Chaux	25
Sel	96.84
CaCO <sub>3</sub>	136

**Tableau 11** : Formulation de la boue à la phase II : Boue a base d'huile.

Les propriétés et les normes de la boue à l'huile sont représentées dans le tableau 10 :

Propriétés	Valeur
Densité	1 - 1.05
Viscosité Sec/qt	45 – 50
Yield Point lb/100 ft <sup>2</sup>	16-18
Viscosité plastique (PV) (cP)	< 20
Gels 0/10	5/10
Filtration FL HTHP 200°F/500 psi	< 10
NaCl g/l eau	360
Stabilité Electrique (Volts)	>600
Pb (ml 0.1 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	2 - 2.5
Taux Huile /Eau	70/30 – 85/15
Les solides % LGS	< 5

**Tableau 12** : Les propriétés et les normes de la boue à l'huile dans la phase II.

**III.4.2.2. Résultats des analyses :**

Les résultats des analyses effectuées durant 5 jours pour la phase I sont représentés dans le tableau 13 :

<b>Jour</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Profondeur (m)</b>	616	1014	1440	1748	1871
<b>Densité entrée</b>	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
<b>Densité sortie</b>	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
<b>Gel 0 (lbs/100 ft<sup>2</sup>)</b>	18	8	6	6	5
<b>Gel 10 (lbs/100 ft<sup>2</sup>)</b>	26	12	11	11	11
<b>Viscosité Marsh (Sec/qt)</b>	68	48	49	49	47
<b>Viscosité plastique (cP)</b>	9	13	16	16	11
<b>Yield Point (lb/100 ft<sup>2</sup>)</b>	44	16	16	16	14
<b>HPHT (ml/30 min)</b>	6	6	6	6	6
<b>Gaz oil %</b>	72	72	72	74	74
<b>Eau %</b>	17	17	17	15	15
<b>Solides %</b>	11	11	11	11	11
<b>Gaz oil/ Eau Taux</b>	80/20	80/20	80/20	83/17	83/17
<b>LGS %</b>	3.6	3.6	3.6	4	4
<b>Stabilité Electrique (Volts)</b>	1100	1205	1205	1139	1210
<b>Pom (cm<sup>3</sup>)</b>	2.5	2.4	2.4	2.4	2,4
<b>Excès de chaux (g/l)</b>	9.25	8.88	8.88	8.88	8,88
<b>Total Ca<sup>++</sup> (g/l)</b>	3.2	3.2	3.2	4	4
<b>Cl- boue (g/l)</b>	37	37	37	29	29
<b>Chaux Ca<sup>2+</sup> (g/l)</b>	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
<b>NaCl<sub>boue</sub> (g/l)</b>	60.51	60.51	60.51	47.52	47.52
<b>NaCl %</b>	26,25	26,25	26,25	28,74	28,74

**Tableau 13 : Résultats des analyses physico-chimiques pour la phase II.**

**III.4.2.3. Les calculs effectués dans cette phase :****a. L'excès de la chaux et La quantité de calcium dans la chaux :**

La quantité de Ca dans la boue est calculée après titrage avec de l'acide sulfurique 0,1M,  $V_{H_2SO_4}$  à partir des relations suivantes :

$$[\text{Excès chaux boue}] (\text{gr/l}) = 3,7 \times V_{H_2SO_4} = 3,7 \times 2,5 = 9,25 \text{ g/l}$$

$$[\text{Ca}^{2+} \text{ chaux}] (\text{gr/l}) = 0,27 \times \text{Excès chaux boue} = 0,27 \times 9,25 = 2,1 \text{ g/l}$$

**b. La quantité de Cl- boue et NaCl boue :**

La quantité des chlorure et NaCl dans la boue est calculée après titrage avec du nitrate d'argent 0,1M,  $V_{AgNO_3}$  :

$$[\text{Cl}^- \text{ boue}] (\text{gr/l}) = 35,5 \times 0,1 \times V_{AgNO_3} = 35,5 \times 0,1 \times 10,4 = 37 \text{ g/l}$$

$$[\text{NaCl} \text{ boue}] (\text{gr/l}) = \text{Cl}^- \text{ boue} \times 1,65 = 60,51 \text{ g/l}$$

**c. Le rapport de NaCl dans la boue :**

Ce rapport est calculé à partir de la formule:

$$\% \text{ NaCl} = \frac{[\text{NaCl boue}]}{[\text{NaCl boue}] + 10 \times V_{NaCl}} \times 100 = \frac{100 \times 60,51}{60,51 + (10 \times 17)} = 26,25 \%$$

**d. Le rapport eau/huile dans la boue :**

Le rapport volumique Huile/Eau est calculé à partir du volume d'eau  $V_{\text{eau}}$  et le volume d'huile  $V_{\text{huile}}$  (après distillation).

$$\% \text{ Huile} = \frac{100 \times (V_o)}{(V_o + V_w)} = \frac{100 \times (72)}{(72 + 17)} = 80 \%$$

$$\% \text{ Eau} = \frac{100 \times (V_w)}{(V_o + V_w)} = \frac{100 \times (17)}{(72 + 17)} = 20 \%$$

**e. Le rapport Huile/Saumure :**

Le rapport volumique Huile/saumure ( $V_s$ ) est calculé à partir de la densité de saumure ( $\rho_s$ ) et la quantité de NaCl selon les formules :

$$\rho_s = 0,99707 + 0,006504 (\% \text{ NaCl}) + 0,00004395 (\% \text{ NaCl})^2$$

$$\rho_s = 0,99707 + 0,006504 (26) + 0,00004395 (26)^2 = 1,1958842 \text{ gr/cm}^3$$

$$V_s = \frac{100 \times (V_w)}{\rho_s \times (100 - \% \text{ NaCl})} = \frac{100 \times (17)}{1,1958842 \times (100 - 26)} = 19,2 \%$$

**f. Pourcentage des solides :**

Pour déterminer le pourcentage des solides dans la boue, on a besoin de savoir:

- ✓ La densité de saumure (brine) ;
- ✓ Le volume d'huile et de saumure.

La quantité des solides corrects,  $V_{SC}$ .

$$V_{SC} = 100 - (V_O + V_S) = 100 - (72 + 19,2) = 8,8$$

$$V_{LGS} = V_{Solides} - V_{SC} = 11 - 8,8 = 2,2 \%$$

**Discussion :**

Au début de la deuxième phase, on remarque un décalage des valeurs (des Gels 0/10, de la viscosité Marsh et de la contrainte seuil) par rapport aux normes admises ; ce décalage est dû au déplacement de la boue bentonitique de la phase précédente, ce qui provoque un mélange entre la nouvelle boue à base d'huile, l'eau et le gaz oïl injecté lors de déplacement de la boue bentonitique.

La mesure de filtration, les tests physiques (la viscosité plastique, le rapport eau/huile, la conductivité, contraintes seuils) et les analyses chimiques (alcalinités, LGS,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca(OH)_2$ ), donnent des résultats conformes aux normes exigées.

**III.4.3. La phase III : (1871 – 2748 m) :****III.4.3.1. Choix de la boue :**

Cette section a été réalisée avec le même système de boue à base d'huile,

**Système INVERMUL MUD 90/10.**

Cette boue permet de :

- ✓ Une bonne lubrification et la déposition d'un cake mince et résistant ;
- ✓ Une bonne stabilité des parois ;
- ✓ Un bon nettoyage de trou ;
- ✓ Eviter l'endommagement du réservoir.

Pour la préparation de la boue à base d'huile on utilise les composés suivants :

Produits	Quantités kg/m <sup>3</sup> ou m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Gaz oil	718.13
Eau	80.82
INVERMUL NT	10
DURATONE HT	20
GELTONE-II	30
Chaux	20
Sel	28.39
Carbonate de Calcium	198

**Tableau 14 :** Formulation de la boue à la phase III : Boue a base d'huile.

Les propriétés et les normes de boue à d'huile sont représentées dans le tableau 10 :

Propriétés	Valeur
Densité	1 - 1.05
Viscosité Sec/qt	45 – 50
La contrainte seuil lb/100 ft <sup>2</sup>	14-16
Viscosité plastique (PV) (cP)	< 16
Gels 0/10	8/10
Filtration FL HTHP 200°F/500 psi	< 4
NaCl g/l eau	360
Stabilité Electrique (Volts)	>1000
Pb (ml 0.1 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	2 - 2.5
Eau/huile fraction	85/15 – 90/10
Les solides % LGS	< 3

**Tableau 15 :** Propriétés boue à base d'huile sous les normes dans la phase III.

**III.4.3.2. Résultats des analyses :**

Les résultats des analyses effectuées durant 5 jours pour la phase I sont représentés dans le tableau 16 :

Jour	1	2	3	4	5
Profondeur (m)	1871	2053	2377	2565	2748
Densité entrée	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Densité sortie	1.05	1.05	1.05	0,98	1,05
Gel 0 (lbs/100 ft <sup>2</sup> )	8	8	7	7	8
Gel 10 (lbs/100 ft <sup>2</sup> )	10	10	9	10	10
Viscosité Marsh (Sec/qt)	48	46	46	47	48
Viscosité plastique (cP)	9	11	13	11	12
Yield Point (lb/100 ft <sup>2</sup> )	14	14	16	15	16
HPHT (ml/30 min)	1	1	2	2	1
Gaz oil %	80	80	80	80	80
Eau %	10	10	10	10	10
Solides %	10	10	10	10	10
Gaz oil/ Eau Taux	89/11	89/11	89/11	89/11	89/11
LGS %	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Stabilité Electrique (Volts)	1100	1170	1135	1169	1175
Pom (cm <sup>3</sup> )	2,5	2,4	2,5	2,5	2,5
Excès de chaux (g/l)	9,25	8,88	9,25	9,25	9,25
Total Ca <sup>++</sup> (g/l)	3,6	3,2	3,6	4	4
Cl- boue (g/l)	37	37	36	35	36
Chaux Ca <sup>2+</sup> (g/l)	2,49	2,39	2,49	2,49	2,49
NaCl <sub>boue</sub> (g/l)	60,51	60,51	59,4	57,75	59,4
NaCl %	37,81	37,81	37,26	36,6	37,26

**Tableau 16 :** Résultats des analyses physico-chimiques pour la phase III.

**Discussion :**

Dans cette phase, toutes les analyses sont conformes aux normes admises à l'exception de la densité (à la fin de phase), qui présente une diminution à la 4<sup>ème</sup> journée (0,98). Cette valeur est due à l'arrivée du gaz (détection d'un réservoir de gaz) ce qui provoque cette diminution de la densité, dans ce cas on est obligé de faire un dégazage de la boue.

**III.4.4. La phase IV: (2748 – 2963 m) :****III.4.4.1. Choix de la boue :**

Afin d'éviter l'endommagement du réservoir, on utilise une boue à base d'huile, **SYSTEME INVERMUL MUD 95/05**, cette boue permet de :

- ✓ Une bonne lubrification et la déposition d'un cake mince et résistant ;
- ✓ Une bonne stabilité des parois ;
- ✓ Un bon nettoyage de trou ;
- ✓ éviter l'endommagement du réservoir.

Pour la préparation de la boue à base d'huile on utilise les composés suivants :

Produits	Quantités kg/m <sup>3</sup> ou l/m <sup>3</sup>
Gaz oil	811.91
Eau	90.99
INVERMUL NT	8
DURATONE HT	20
GELTONE-II	15
Chaux	20
Sel	31.97
Carbonate de Calcium	83.31

**Tableau 17** • Formulation de la boue à base d'huile à la phase IV.

Les propriétés et les normes de la boue à base d'huile sont représentées dans le tableau 10 :

Propriétés	Valeur
Densité	0.98 - 1.00
Viscosité Sec/qt	45 – 50
La contrainte seuil lb/100 ft <sup>2</sup>	10-12
Viscosité plastique (PV) (cP)	< 12
Gels 0/10	5/10
Filtration FL HTHP 200°F/500 psi	< 4
NaCl g/l eau	360
Stabilité Electrique (Volts)	> 1000
Pb (ml 0.1 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	2 - 2.5
Eau/huile fraction	90/10
Les solides % LGS	< 3

**Tableau 18** : Propriétés de la boue sous les normes dans la phase IV.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail qu'on a effectué au sein de la base ENAFOR 38 à IN AMENAS, lors du forage du puits TRSO1 et qui porte sur l'étude et le suivie des propriétés des boues pendant les différentes phases de forage, les résultats d'analyses physiques et chimiques nous ont permis de faire les conclusions suivantes :

Pour le bon déroulement du forage on utilise deux types de boues : la boue bentonitique à base d'eau pour la première phase de forage et la boue à base d'huile pendant les phases suivantes.

Durant la première phase, la présence de matières solides (du sable) conduit à une variation de la densité (de 1,05 à 1,06) de la boue et à des valeurs des gels et de viscosité Marsh supérieures à la valeur normale. A la fin de la première phase, en vue de préparer le terrain pour la cimentation, une viscosité faible (une quantité de bentonite réduite) est nécessaire, ceci est réalisé par centrifugation.

Au début de la deuxième phase, lors déplacement de la boue bentonitique, un décalage des valeurs (les Gels 0/10, la viscosité Marsh et la contrainte seuil) est observé à cause de mélange entre la nouvelle boue à base d'huile, l'eau et le gaz oïl injecté.

A la fin de la troisième phase une diminution de la densité à la 4<sup>ème</sup> journée (0,98) est remarquée, cette valeur est due à l'arrivée du gaz (détection d'un réservoir de gaz) dans ce cas on est obliger de faire un dégazage de la boue, ou de fermer le puits définitivement dans le cas ou la quantité de gaz est très importante pour éviter l'éruption.

Dans la dernière phase de forage, les résultats obtenus sont conforme aux normes admises ce qui implique un bon rendement de la boue au cours du forage

Pour les autres testes physiques et les analyses chimiques (PB, les calciums  $Ca^{2+}$ , les chlorures  $Cl^-$ , la chaux et de l'LGS), les résultats sont conformes aux normes exigées durant toutes les étapes de forages.

## Références bibliographiques

- ✓ Mémoire d'ingénieur en génie mécanique sur "étude comparative des bilans énergétiques de deux types appareils de forage sur le champ de HASSI-MESSAOUD".
- ✓ Mémoire d'ingénieur en forage sur "étude des performances d'une nouvelle boue dans le forage du réservoir à HAOUA BERKAOUI cas du puits OKN 66".
- ✓ Mémoire de magister en sciences et génie des matériaux sur "amélioration des propriétés rhéologiques des fluides de forage à base de bio-polymères".
- ✓ Mémoire de doctorat en génie des procédés et de l'environnement sur "étude des performances et considérations environnementales".
- ✓ Les fluides de forage "ENSPM Formation Industrie - IFP Training".
- ✓ Formation JDF "division forage".
- ✓ Les fluides de forage appareils de contrôle (laboratoire).