



المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

National School of Built and Ground Works Engineering

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme de MASTER

Filière : TRAVAUX PUBLICS

Spécialité : INFRASTRUCTURE DE BASE

Thème

**Recherche sur le comportement rhéologique
des boues de forage**

Proposé par :

Mr BELABDELOUAHAB.F

Présenté par :

Melle GUERDOUD Sanaa

Promotion 2014

Ecole Nationale des Travaux Publics. Garidi. Kouba.



Remerciement

*En premier lieu, je tiens à remercier notre **DIEU**, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.*

*Ce travail de Master a été effectué au Centre de Recherche et Développement (C.R.D) SONATRACH département gisement, dirigé par Monsieur **FERFARA Fetehi**.*

*J'adresse mes vifs remerciements à mon promoteur Monsieur **BELABDELOUAHAB Farid** pour m'avoir diligenté tout au long de ce travail, pour sa compréhension, sa patience, sa compétence et ces remarques qui m'ont été précieuses,*

*Je présente mes chaleureux remerciements aux Monsieur **FACI Rachid** le directeur de BET LECTACT pour leurs aides et orientations durant ma formation.*

*Merci à Monsieur **MENAOUAR** il m'a fait profiter de son expérience, j'ai particulièrement apprécié la pertinence de ses conseils et ses critiques constructives, de ses commentaires et de ses encouragements.*

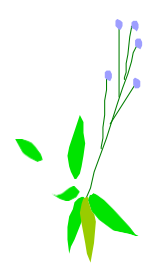
*Je porte mon gratitude et remerciement à Monsieur **FEDGHOUCHE** le chef de département infrastructure de base **DIB** pour sa disponibilité et encouragement.*

Je remercie aussi le président et les membres du jury pour m'avoir honoré de leurs présences et avoir bien voulu examiné ce modeste travail.

J'adresse mon respectueux remerciements à tous mes enseignants qui m'ont encadrés pendant toutes mes années d'études et éclairés mon chemin de jeune ingénieur.

Je remercie également ma famille pour les sacrifices qu'elle a consentis pour que je termine mes études.

Mes derniers remerciements et ce ne sont pas les moindres, vont à tous ceux qui ont contribués de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.



Dédicaces

Tout d'abord je remercie ALLAH, le tout puissant qui m'a permis de réaliser ce modeste travail.

Il existe dans le monde des êtres chers, à qui nous leurs devons presque tout, et qui compte beaucoup pour nous ; et rien ne pourrait être accompli pour leur rendre tout ce qu'ils nous ont apporté dans la vie.

Je voudrais dédier ce modeste travail à :

- ♥ *Mes ftarents,*
- ♥ *Mes frères et ma sœur,*
- ♥ *Toute ma grande famille,*
- ♥ *Ainsi qu'à tous mes amis de l'ENSTft*

À vous ...

Merci

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I.1 :Cycle du fluide sur le site de forage (Schlumberger, 1997) | 3 |
| Figure II.1 : contrainte relative de différents types de la matière en fonction de temps de relaxation. | 11 |
| Figure II.2 : différents types de cisaille | 12 |
| Figure II.3 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines. | 13 |
| Figure II.4 : Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles..... | 14 |
| Figure II.5 : Courbes d'écoulement de fluides présentant une contrainte critique | 17 |
| Figure II.6 : Schéma d'état de la matière en solution (a) avant et (b) après cisaillement..... | 18 |
| Figure II.7 : Courbes d'écoulement des principales catégories de fluides sans contrainte..... | 19 |
| Figure II.8 : Boucles d'hystérésis de fluides thixotropes | 20 |
| Figure. III.1 : Structure laminaire des unités octaédriques (Eslinger et Peaver 1988) | 25 |
| Figure. III.2 : Les tétraèdres (Eslinger et Peaver 1988)..... | 25 |
| Figure. IV.3 : l'agencement des tétraédrites et des octaèdres (Moore et Reynolds 1989)..... | 26 |
| Figure. III.4 : Exemple de minéral argileux : kaolinite (White, 1999) | 27 |
| Figure. III.5 : Représentation d'une smectite (White, 1999) | 28 |
| Figure. III.6 : Chlorite (White, 1999)..... | 30 |
| Figure. III.7 : Argiles fibreuses (chamley ,1989)..... | 30 |
| Figure. III.8 : Forme des particules argileuses (Velde, 1995) | 31 |
| Figure. III.9 : Surface des particules argileuses. | 32 |
| Figure. III.10 : Rôle du PH sur l'adsorption à l'équilibre et échange ionique (Schroeder, 2002) | 33 |
| Figure IV.I : Image du Rhéomètre AR 2000..... | 34 |
| Figure IV.2 : Image microscopique de la bentonite de <i>MAGHNIA</i> | 35 |
| Figure IV.3 : Image de viscosimètre thermo HAAKE VT 550..... | 39 |
| Figure. IV.4 : Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différentes températures. | 40 |
| Figure IV.6 : Contrainte seuil, coefficient de consistance et indice d'écoulement en fonction de la température d'une suspension de bentonite 3% | 41 |
| Figure IV.7 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différents types de sels. | 42 |
| Figure IV.8 : Contrainte seuil, coefficient de consistance et indice d'écoulement en fonction de l'ajout de différent sels d'une suspension de bentonite 3% | 42 |
| Figure IV.9 : Effet de l'alcalinité sur la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% | 44 |
| Figure IV.11 : Effet de l'alcalinité sur le PH de la suspension de bentonite 3% | 45 |
| Figure IV.12 : Effet de l'alcalinité sur la contrainte de seuil, le coefficient de consistance et l'indice d'écoulement de la suspension de bentonite à 3%. | 45 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----------|
| Tableau I. 1 : Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage..... | 6 |
| Tableau II.1 : Quelques ordres de grandeur des valeurs de viscosité de différents matériaux à température ambiante..... | 15 |
| Tableau II.2 : Modèles rhéologiques décrivant l'écoulement de fluides à contrainte critique (d'après Midoux, 1988) | 17 |
| Tableau II 3 : Lois rhéologiques de fluides ne présentant pas de contrainte critique (d'après Midoux, 1988)..... | 19 |
| Tableau III.1 : Classification des phyllosilicates | 27 |
| Tableau III.2 : Surface spécifique des particules argileuses (Eslinger et Weaver, 1988)..... | 31 |
| Tableau IV.1 : Propriétés physiques requis pour la bentonite (API 13A)..... | 36 |
| Tableau IV.2 : tableau récapitulatif des résultats obtenus | 38 |
| Tableau IV.3 : Effet de l'ajout de NaOH sur le PH de la solution de bentonite 3%..... | 45 |

| | |
|--------------------|--|
| Remerciements | |
| Dédicace | |
| Liste des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Résumé | |

Introduction générale

Partie Recherche Bibliographique

CHAPITRE.I.

GENERALITE SUR LES BOUES DE FORAGE

| | |
|--|----------|
| I. 1.définitions des fluides de forage | 1 |
| Le cycle de la boue sur un site de forage..... | 1 |
| Fonctions et Caractéristiques des fluides de forage | 3 |
| Classification et Composition des différents types des fluides de forage..... | 5 |
| Les fluides à base d'eau | 6 |
| Les fluides à base d'huile | 6 |
| Les fluides de forage gazeux | 7 |
| Les fluides de complétion et de reconditionnement des puits..... | 7 |
| Fluide de forage de réservoir | 7 |
| I.4.4.2 . Fluide de Complétion et de Workover..... | 7 |
| II.4.4.3. Fluide d'annulaire ou fluide de packer | 8 |
| Propriétés des fluides de forage | 8 |
| Polymères additifs | 8 |
| Définition du polymère | 8 |
| Classification des polymères | 9 |
| polymères utilisés dans les fluides de forage | 9 |

CHAPITRE.II.
LA RHEOLOGIE DES BOUES DE FORAGE

| | |
|---|-----------|
| L’histoire de la rhéologie | 10 |
| Définition de la rhéologie | 10 |
| La caractérisation des matières | 10 |
| le cisaillement..... | 11 |
| Notion de mouvement laminaire de cisaillement..... | 12 |
| Contrainte de cisaillement. | 13 |
| II.3 Déformation et vitesse de cisaillement..... | 13 |
| Equation d’état | 14 |
| La viscosité..... | 15 |
| Typologie de l’écoulement..... | 15 |
| Les fluides indépendants du temps..... | 16 |
| a) Les fluides newtoniens. | 16 |
| b) Les fluides non newtoniens. | 16 |
| Fluides à contrainte critique | 16 |
| Fluides sans contrainte critique..... | 18 |
| Les fluides dépendants du temps..... | 19 |
| Fluides thixotropes..... | 20 |
| Fluides rhéopexes..... | 20 |
| Les fluides viscoélastiques..... | 20 |
| Rhéomètre | 21 |
| Les rhéomètres a régime permanent..... | 21 |

CHAPITRE.III : LES ARGILES

| | |
|----------------------------------|----|
| Définition de l’argile | 24 |
| Caractéristiques de base | 24 |
| Classification des argiles | 26 |
| Illites..... | 28 |
| Smectites | 28 |

| | |
|--|-----------|
| Vermiculite..... | 29 |
| Les argiles fibreuses..... | 29 |
| Propriétés des argiles..... | 30 |
| Forme et surface spécifique..... | 30 |
| capacité d'adsorption et de gonflement..... | 32 |
| Degré d'hydratation..... | 32 |
| Surfaces argileuses:..... | 32 |
| III.5. Formation et utilisations de la bentonite..... | 33 |

Partie Expérimentale

CHAPITRE .IV. Matériels Et Résultats

| | |
|---|-----------|
| Matériels utilisés..... | 34 |
| Méthode et caractérisation de matériaux pour le test de conformité..... | 35 |
| .Test de conformité..... | 35 |
| .lecture à 600 Rpm, viscosité plastique, yield point..... | 36 |
| volume de filtrat..... | 37 |
| Humidité..... | 37 |
| les Résultats obtenus..... | 38 |
| Matériaux et appareillages..... | 38 |
| . Mode opératoire..... | 39 |
| Etude rhéologique des suspensions de fluide de forage..... | 39 |
| .Etude rhéologique et physico-chimique de suspension bentonitique..... | 39 |
| Effet de la température sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique..... | 40 |
| Interprétation..... | 41 |
| Effet des sels sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique..... | 42 |
| Interprétation..... | 43 |
| IV.2.1.3. Effet de l'alcalinité sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique..... | 43 |
| Interprétation..... | 46 |

Conclusion Générale

Références bibliographiques

ملخص

الريولوجية خصائصها وتحديد الحفر لسوائل الريولوجية السلوك فهم هو العمل هذا من الهدف

التكوينات لحفر معداتهم مع التكيف على والحفارين المنقبين اجبر والغاز، النفط على الطلب زيادة بسبب تطوير النتائج من الريولوجية خصائص على أساسا يعتمد الحفر نتائج). الخ ... الرملي والحجر الطين الرمال، (المختلفة الجيولوجية الطين.

سوائل بريولوجيا تتعلق التي الحفر لمشاكل حل أفضل لإيجاد الموقع جيولوجيا مع عليها المتحصل النتائج ربط هو هدفنا الحفر

والبوليمرات الريولوجي، السلوك الريولوجيا، الحفر، سوائل: **المفتاحية الكلمات**

Résumé

L'objectif de ce travail est de comprendre le comportement rhéologique des boues de forage ainsi que la détermination des propriétés rhéologiques.

Le développement dicté par la demande accrue en pétrole et gaz, contraint les prospecteurs et les foreurs à adapter leur matériel pour le forage des différentes formations géologiques (sables, argiles, grés...etc). Les résultats d'un forage dépendent essentiellement des propriétés et des caractéristiques rhéologiques de la boue.

Notre objectif était de corréliser les résultats obtenus avec la géologie de site pour mieux résoudre les problèmes de forage qui sont liée à la rhéologie des fluides de forage.

Mots clés : boues de forage, rhéologie, comportement rhéologique, polymères.

ABSTRACT

The aim of this work is to understand the rheological behavior of drilling muds and determining the characteristics and rheological properties

The development dictated by the demand increased in oil and gas, bring the prospectors and the borers to adapt their material for the boring of different geological formations (sands, clays, sandstone...etc). The results of drilling essentially depend on the properties and the characteristic rheological of the mud.

Our objective was to correlate the results obtained with the geology of the site to better solve drilling problems that are related to the drilling fluid rheology

Keywords: drilling mud, rheology, rheological behavior, polymers.

INTRODUCTION GENERALE

Le forage prend une part importante dans le développement des gisements et l'estimation des réserves pétrolières. Les problèmes rencontrés au cours des opérations de forage ont suscités un intérêt particulier de la part des compagnies pétrolières, des laboratoires spécialisés et de la communauté des chercheurs. En plus du défi technique pour la résolution des problèmes, on note l'importance du facteur économique, dont le coût des problèmes de forage rencontrés peut être estimé à plus de 10% du coût moyen d'un forage. L'instabilité des parois des puits est le facteur technique le plus significatif au cours du forage et l'une des sources affectant le coût du forage.

Par ailleurs la connaissance des propriétés rhéologiques des fluides de forage qui sont d'une importance capitale pour la réussite de l'opération de forage, vont faciliter le passage de l'outil de forage à travers les différentes couches de la formation géologique, la boue de forage doit tout d'abord créer une pression hydrostatique permettant d'assurer la stabilité des parois forées et empêcher les venues des fluides provenant des nappes souterraines traversées. Elle doit également former un "cake" pour limiter la filtration vers la paroi poreuse et permettre de faire remonter à la surface les déblais.

Pour cela, et afin de répondre à ces exigences, le choix de fluides de forage doit satisfaire, d'une part, aux principaux paramètres rhéologiques de ce fluide tout en tenant compte des différents inhibiteurs utilisés lors de la traversée des zones sensibles.

La présente étude a pour objectif l'élaboration, le comportement rhéologique des boues de forage. Ce travail est divisé en deux grandes parties : une partie bibliographique et une partie Expérimentale.

I : La partie bibliographique comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre traite des généralités sur les différents types de fluides, ses fonctions ainsi que les principales propriétés des fluides de forage.
- Le deuxième chapitre est consacré à la notion de rhéologie des fluides et aux principaux paramètres rhéologiques des fluides de forage, qui fait appel à diverses disciplines scientifiques (chimie, physique, et mécanique). Il est abordé les lois de comportement rhéologique des fluides ainsi que les techniques récentes de rhéomètre qui seront incluses dans ce chapitre.
- Le troisième chapitre, traite la microstructure des argiles, principalement la bentonite.

II : Partie expérimentale : elle est présentée dans un seul chapitre avec une petite expérimentation au niveau du laboratoire de Boumerdes, avec présentation de l'équipement d'essai du matériel utilisé et le calcul des paramètres rhéologique, physique et chimique.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus durant cette étude, et qui met en évidence les avantages techniques et les intérêts de l'utilisation des fluides de forage.

CHAPITRE.I.

Généralité sur les boues de forage

CHAPITRE.I.

Le succès technique et économique d'une opération de forage d'un puits dépend pour une large part de la qualité du fluide de forage utilisé. Il faut savoir que le coût du fluide proprement dit est relativement faible par rapport au coût global des opérations mais l'optimisation de la composition du fluide en fonction des caractéristiques de la formation à forer peut réduire efficacement le coût global des opérations de forage.

ce premier chapitre comprend des généralités sur les fluides de forage, les différents type de fluide de forage ainsi que les polymères additif.

I. 1.définitions des fluides de forage:

Le fluide de forage, appelé aussi boue de forage est un système composé de différents constituants liquides (eau, huile) et/ou gazeux (air ou gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, ciments...). C'est un fluide non newtonien, visqueux ou viscoélastiques, le plus souvent thixotrope [1].

L'American Petroleum Institute (API) définit le fluide de forage comme un fluide en circulation continue durant toute la durée du forage. Le fluide est préparé dans des bacs à boues, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil puis il remonte dans l'annulaire, chargé des déblais formés au front de taille.

A la sortie du puits, il subit différents traitements, tamisage, dilution, ajout de produits, de façon à éliminer les déblais transportés et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques à leurs valeurs initiales. Il est ensuite réutilisé [2].

Le cycle de la boue sur un site de forage

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

1. La boue est mélangée et conservée dans le **bassin de décantation**.
2. Une **pompe** achemine la boue dans la tige de forage qui descend jusqu'au fond du puits.
3. La boue sort de l'extrémité de la tige de forage et tombe au fond du **puits** où le **trépan** est en train de forer la formation rocheuse.
4. La boue emprunte ensuite le chemin inverse en remontant à la surface les morceaux de roche, appelés déblais, qui ont été arrachés par le trépan
5. La boue remonte jusqu'à l'espace **annulaire**, entre la tige de forage et les parois du puits.
6. A la surface, la boue circule dans la **conduite d'aspiration de la boue**, une tige qui mène au **tamis vibrant**.
7. Les tamis vibrants se composent d'un ensemble de crépines métalliques vibrantes servant à séparer la boue des déblais. La boue s'égoutte dans les crépines et est renvoyée vers le **bassin de décantation**.

Les déblais de la roche glissent le long de la **glissière du tamis** pour être rejetés. En fonction des impératifs environnementaux, notamment, ils peuvent être lavés avant leur rejet. Une partie des déblais est prélevée pour être examinée par des géologues afin d'étudier les propriétés des roches souterraines présentes au fond du puits .

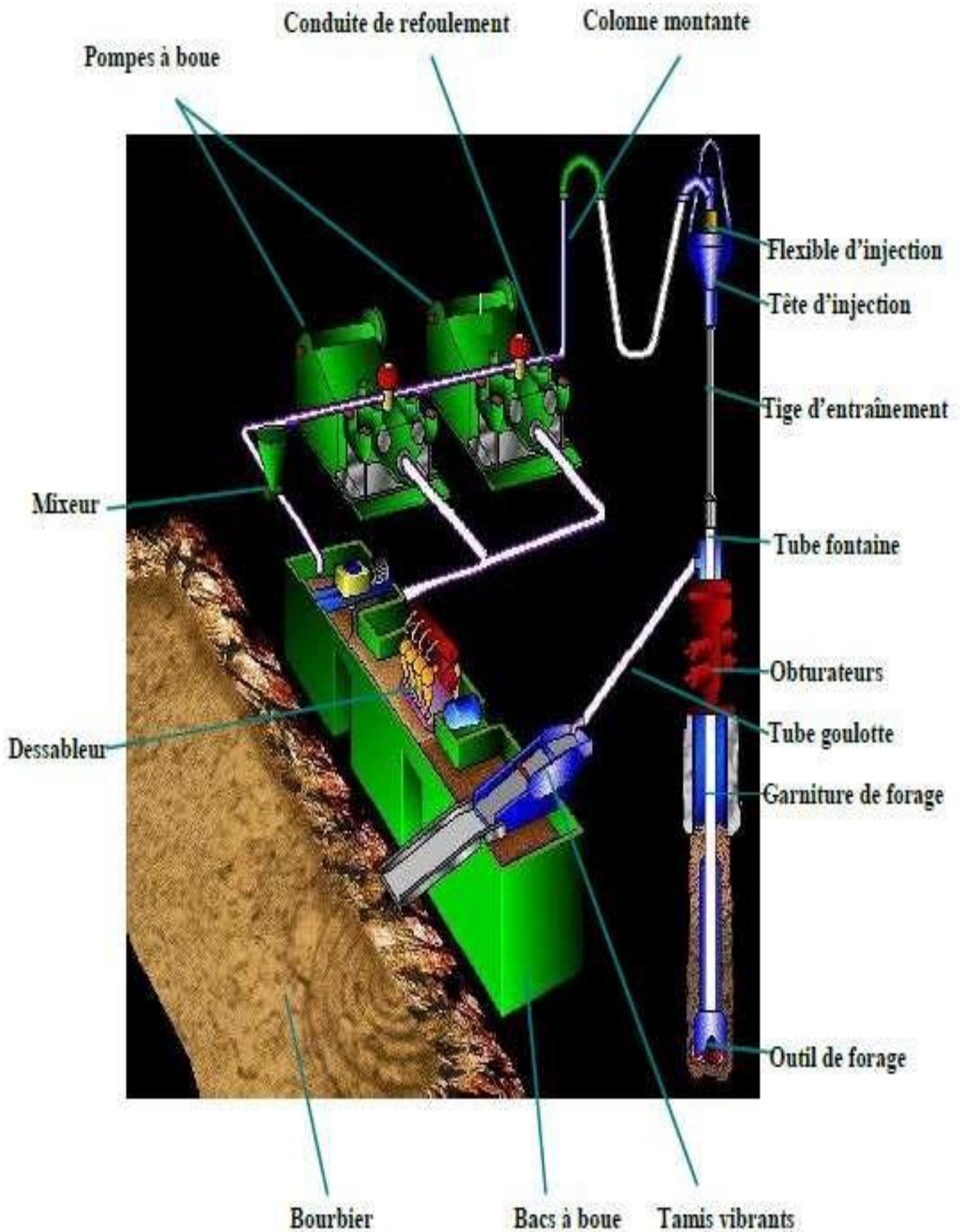


Figure .I.1: Cycle du fluide sur le site de forage.

Fonctions et Caractéristiques des fluides de forage :

En général, les boues de forage doivent avoir les propriétés leur permettant d'optimiser les fonctions suivantes [3] :

- La remontée des déblais (cuttings)
- maintien des déblais en suspension
- sédimentation des déblais fins en surface
- Refroidir l'outil et lubrifier la garniture de forage
- Prévention du cavage et des resserrements des parois du puits
- Dépôt d'un cake imperméable
- le maintien des parois du trou foré
- Le contrôle des fluides des formations traversées
- L'intervention des fluides comme paramètre de forage
- La transmission de la puissance au moteur de fond
- Apport de renseignements sur le sondage
- Contamination des formations productrices
- corrosion et usure du matériel
- toxicité et sécurité

1. **La remontée des déblais (cuttings) :** la circulation de fluide remontant dans l'annulaire tige/trou doit entraîner des particules de formation forées qui se présentent sous forme de débris de roche appelés « cuttings » ou « déblais » du front de taille jusqu'à la surface.
2. **Le maintien des déblais en suspension après arrêt de la circulation :** 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'est le caractère thixotrope du fluide de forage qui retient les déblais en suspension, par sa gélification lorsqu'il n'est plus en mouvement. Pratiquement tous les fluides visqueux sont thixotropes.
3. **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 ; bien qu'apparemment ces deux aptitudes semblent contradictoires, elles ne sont pas incompatibles.
4. **Refroidir l'outil et lubrifier la garniture de forage :** 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 l'outil et de la garniture de forage. Cet échauffement est dû à la température de fond et la transformation d'une partie de l'énergie mécanique en énergie calorifique. D'autre part, le fluide de forage diminue le coefficient de frottement entre la garniture de forage et la paroi du puits. On améliore parfois cette fonction par l'adjonction de produits antifriction comme de l'huile ou additifs spéciaux.
5. **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.

- 6. 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.

- 7. le maintien des parois du trou foré:** La boue doit posséder des caractéristiques physiques et chimiques telles, que le trou conserve un diamètre voisin du diamètre nominal de l'outil. La filtration dans les formations perméables de la phase liquide de la boue de forage, dépose un film de particules colloïdales sur les parois du trou. Ce film est appelé cake. Ce cake consolidé par des produits spécifiques dits réducteurs de filtrat isole les formations perméables du trou foré, et permet de découvrir des hauteurs plus importantes en limitant la déstabilisation des terrains.

- 8. Le contrôle des fluides des formations traversées:** Afin d'éviter les venues d'eau, de gaz, ou d'huile rencontrés en cours de forage, la boue doit exercer une pression hydrostatique (P_h) suffisante pour équilibrer les pressions de gisement :

$$P_h = 9,81 \cdot \rho \cdot Z$$

Avec :

P_h en KPa

Z : Profondeur (m),

ρ : densité de la boue.

Si cette pression P_h reste supérieure à la pression des fluides des formations, il n'y aura pas de venues dans le puits. La boue de forage est considérée comme le premier obturateur permettant de contrôler les pressions du fond du puits.

- 9. L'intervention des fluides comme paramètre de forage :** Le choix du type et des caractéristiques de la boue conditionnent la vitesse d'avancement instantanée du forage par sa capacité de nettoyage du front de taille. D'autre part, une pression de fond, créée par le fluide de forage, supérieure à la pression de formation est toujours néfaste pour les performances car il y a risque de fracturation des formations traversées.

- 10. La transmission de la puissance au moteur de fond :** Pour certaines applications telles que: forage dirigé ou forage à l'outil diamant, on incorpore à la garniture un moteur de fond (turbine ou moteur volumétrique) qui permet de mettre l'outil en rotation et l'outil seulement. Ce moteur est mû par le débit de boue injectée à l'intérieur de la garniture. La chute de pression consécutive au fonctionnement du moteur de fond vient se rajouter aux pertes de charges dans le circuit de refoulement.

- 11. Apport de renseignements sur le sondage:** Par sa circulation, le fluide de forage 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.

Ses principales caractéristiques sont :

Le poids volumique (Densité) : c'est le rapport du poids d'un corps à son volume dans des conditions définies de pression et de température, elle constitue un paramètre essentiel dans le maintien des parois du trou et les fluides en places dans les formations géologiques traversées[4]

La viscosité : c'est la caractéristique qui permet au fluide de suspendre et par conséquent transporter les déblais, elle décrit la résistance à l'écoulement des substances [5].

Le filtrat : c'est l'eau qui pénètre dans la formation géologique pour permettre le dépôt d'une couche de solides ; appelée cake qui enveloppe les parois du puits [5].

12. Contamination des formations productrices : La présence de la boue au droit des formations poreuses et perméables exerçant une pression hydrostatique supérieure à la pression de gisement peut nuire à la future mise en production.

13. Corrosion et usure du matériel : La boue 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 due à un déséquilibre chimique.

14. 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.

Classification et Composition des différents types des fluides de forage:

Historiquement, les fluides de forage ont évolué d'un simple mélange d'eau et d'argile appelé "boue" vers des systèmes de plus en plus complexes composés d'eau ou huile avec une multitude d'additifs répondant aux caractéristiques requises et aux problèmes rencontrés.

Les fluides de forage sont des fluides complexes classés en fonction de la nature de leurs constituants de base. Les fluides de forage ont été classés en quatre catégories selon le fluide de base utilisé dans leur préparation [6] :

- ⊕ Les boues à base d'eau.
- ⊕ Les boues à base d'huile.
- ⊕ Les fluides de forage gazeux.
- ⊕ Les fluides de complétion et de reconditionnement des puits

Les boues doivent être par exemple très visqueuses pour assurer la remontée des déblais, mais la viscosité ne doit pas être trop élevée afin de limiter les pertes de charge dues à l'écoulement et afin d'éviter la fracturation de la formation. De nombreux composants multifonctions sont donc ajoutées à la boue pour lui conférer les propriétés désirées. Il est possible de classer grossièrement ces composants en 20 catégories (Tableau1) [7].

Tableau. I. 1: Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage.

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

Les fluides à base d'eau :

Ces fluides sont souvent désignés par "Water-Based Muds" ou **WBM**. Ils sont constitués par trois phases: l'eau qui est la phase la plus important en volume, les argiles ajoutées et les solides inertes. Il est possible de classer ce type de fluides en trois catégories [8]:

- Boues douces (boues bentonitiques) ;
- Boues salées.
- Boues salées saturées.

Parmi les additifs, on peut trouver:

- i) des viscosifiants: argiles naturelles (souvent des bentonites), polymères synthétiques.
- ii) des réducteurs de filtrat servant à consolider le cake de filtration pour limiter l'invasion par le fluide: amidons, carboxyméthylcelluloses ou CMC.
- iii) des inhibiteurs de gonflement et de dispersion des argiles: KCl, glycérol, silicates ou divers polymères.
- iv) des agents alourdissants comme la barytine ("barite" ou sulfate de baryum $BaSO_4$) et la calcite (carbonate de calcium $CaCO_3$) qui sont les plus utilisés pour assurer à la boue une densité convenable. On note aussi l'utilisation de l'hématite (Fe_2O_3) ou de la galène (PbS).
- v) des colmatants, comme des granuleux (coquilles de noix), des fibreux (fibres de bois, canne à sucre), et des lamellaires (coquilles d'huîtres, céréales) [9,4].

Les fluides à base d'huile :

L'origine de l'utilisation de l'huile dans les fluides de forage remonte aux premiers forages effectués à Oklahoma City (1934-1937) au cours desquels on a constaté une amélioration des performances de forage après ajout de l'huile brute. On distingue les boues à l'huile contenant moins de 5% d'eau et plus de 15% d'eau sont les boues à émulsion inverse.

Ces fluides sont souvent désignés par "Oil-Based Muds" ou **OBM**. Où la phase continue est une huile minérale (pétrole brut, fuel, gazole, ...) et la phase dispersée est de l'eau. La phase continue la plus utilisée jusqu'à ces dernières années était le gazole, mais actuellement la législation relative à la protection de l'environnement impose l'utilisation d'huiles minérales ou "synthétiques", ne contenant plus de composés aromatiques. Des agents émulsifiants et mouillants sont alors utilisés pour favoriser la stabilité de l'émulsion. Les

propriétés rhéologiques (thixotropie) de cette émulsion sont ajustées par l'addition d'agents viscosifiants, généralement des argiles organophiles.

Les formulations peuvent contenir également des agents réducteurs de filtrat (composés asphalténiques et polymères) et d'autres additifs spéciaux [10].

Les fluides de forage gazeux :

Ce sont des fluides dont la phase continue est du gaz mélangé avec de l'eau en proportions variables provenant de la formation traversée (inévitablement) ou ajoutée intentionnellement. Le gaz peut être de l'air ; du gaz naturel, de la mousse ou à un brouillard [11].

Citons brièvement les fluides gazeux utilisés:

► Forage à l'air

L'air est le fluide de forage qui possède la plus basse densité. 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 [10].

► Forage 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) [10].

► Forage à 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. La combinaison boue-air permet de générer deux fluides de forage totalement différents selon la prédominance de la boue ou l'air [10].

Les fluides de complétion et de reconditionnement des puits :

Fluide de forage de réservoir :

C'est un fluide utilisé lors du forage du réservoir à exploiter. Son rôle principal, en plus de ces fonctions classiques, est la limitation de l'endommagement des couches productrices.

I.4.4.2 . Fluide de Complétion et de Workover :

L'opération de complétion commence au début du forage du réservoir jusqu'à la mise en place des équipements de production.

Le workover est la reprise ou le reconditionnement du puits.

Le succès de ces deux opérations nécessite le choix d'un fluide dont les caractéristiques permettent :

- D'assurer une bonne stabilité des parois du puits ;
- Le nettoyage du puits en maintenant en suspension les particules et les déblais ;
- D'éviter le colmatage du réservoir ;
- La neutralisation ou la maîtrise du puits ;
- L'inhibition de la formation du cake.

II.4.4.3. Fluide d'annulaire ou fluide de packer :

C'est un fluide qui est mis en place entre le tubing et le cuvelage de production au-dessus du packer, il reste en place pendant toute la durée d'exploitation du puits. [3], [4]

Propriétés des fluides de forage

Tout comme la formulation des boues, le contrôle et la caractérisation des boues de forage sont réalisés selon des normes précises éditées par l'API (**API 13A, 2004**).

Les tests relatifs à l'étude des caractéristiques des fluides de forage sont généralement basés sur quatre paramètres: **densité**, **viscosité**, **filtrat** et **réactivité** (**Ryan et Chillingar, 1996**). Certaines mesures sont réalisées systématiquement sur tous les forages (viscosité, densité, filtration) et d'autres en fonction des besoins (taux de gaz, alcalinité). A partir des mesures réalisées et des connaissances acquises, on ajuste si nécessaire la composition de la boue en "temps réel" en ajoutant certains produits ou en reformulant la boue.

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

Polymères additifs

L'utilisation des polymères dans les diverses industries : pharmaceutique, cosmétique, alimentaire et pétrolière ne cesse de se développer et certains sont conçus pour des opérations de forage particulières.

L'intérêt porté pour l'utilisation des polymères dans les formulations de fluides de forage remonte à 1931 lorsque l'on ajouta de l'amidon de maïs à la boue bentonitique pour contrôler

les caractéristiques de filtration, ensuite elle s'est développée pour d'autres types de polymères on cite : la CMC, la gomme xanthane, les tanins,

Définition du polymère :

Le polymère est un composé macromoléculaire constitué par la répétition d'un groupement d'atomes (carbone, oxygène, hydrogène, soufre, ...) appelé «unité structurelle» ou unité de répétition.

A titre d'exemple on cite le polyéthylène qui est la plus simple des macromolécules dont l'unité de répétition est : [-CH₂-CH₂-].

Les polymères peuvent se présenter :

- En chaînes linéaires avec une répétition linéaire n fois du motif A appelé **homopolymère** (-A-A-A-A-A-), ou de deux ou de plusieurs motifs appelés **copolymère** (A-B-A-B-A-B-A-B-).
- En chaînes non linéaires sous formes de branchées, en étoile ou en réseau.

Classification des polymères

Ils sont classés en trois catégories :

- Polymères naturels d'origine végétale, animale ou minérale : cellulose, amidon,
- Polymères synthétiques obtenus par des réactions de synthèse.
- Polymères semi-synthétique obtenus par transformation chimique de polymères naturels.

polymères utilisés dans les fluides de forage :

Les polymères utilisés dans les formulations de fluides de forage à base d'eau sont hydrosolubles et peuvent être d'origine très variée : polymères naturels, semi synthétiques e synthétiques. Ils confèrent aux fluides de forage un caractère viscosifiant et réducteur de filtrat.

a) Viscosifiant :

L'ajout de polymère à une solution doit augmenter la viscosité de la phase liquide, ceci peut s'expliquer par le gonflement des macromolécules.

L'augmentation de la viscosité permet de maintenir les particules en suspensions, et d'être compatible avec le milieu environnant afin de ne pas endommager la formation. Les polymères confèrent au fluide un caractère thixotrope afin d'empêcher toute sédimentation en cas d'arrêt du forage.

b) inhibiteur du gonflement :

Ces polymères sont utilisés pour éviter le gonflement de la formation sur les parois pendant le forage et d'éviter ainsi le colmatage du puit. Nous citerons par exemple le PHPA, le silicate de sodium, glycol...

c) réducteurs de filtrat :

Si le volume du filtrat est important, il peut causer l'invasion des parois du puits et par conséquent son éboulement ; d'où la nécessité de contrôler ce volume de filtrat par l'ajout d'additifs chimiques appelés réducteurs de filtrat, qui sont dans la plupart du temps des polymères (CMC, PAC, polysaccharides, ...).

I.7.Conclusion

On notera que dans ce chapitre qui est très utile à la compréhension du problème posé et au phénomène de la boue, il a été traité les généralités sur les fluides de forage, les différents type de fluide de forage ainsi que les polymères additif, qui reste qu'une recherche bibliographique très modeste.

CHAPITRE.II.

La rhéologie des boues de forage

CHAPITRE.II.

Aujourd'hui la rhéologie est une science utilisée dans des domaines d'applications vastes et variés. En effet, les domaines industriels dans lesquels la rhéologie est appelée à être utilisée couramment vont de l'industrie agroalimentaire à l'industrie pétrolière, en passant par des domaines comme la cosmétique, le génie civil, l'industrie du bois, les colles. Cette science est également utilisée pour décrire des écoulements des boues de forage . C'est dans ce cadre que ce chapitre vise à définir les principaux paramètres rhéologiques ainsi que les différents types d'écoulement des fluides.

L'histoire de la rhéologie :

La rhéologie, mot inventé par Bingham en 1929 _a partir du verbe grec qui veut dire couler, est la branche de la physique qui étudie la déformation et l'écoulement de la matière. La rhéologie s'applique à tous les types de matières, des gaz aux solides.

La rhéologie est une science qui n'a que 70 ans, mais son histoire remonte très loin. Dans le Livre des Juges de l'Ancien Testament, la prophétesse Déborah déclare: "Les montagnes s'écoulèrent devant le Seigneur...". Traduite en terme rhéologique par le professeur M. Reiner, cette expression signifie que toute chose s'écoule si vous attendez suffisamment longtemps, une affirmation qui s'applique parfaitement à la rhéologie.

Elle fut également mentionnée par le philosophe **grec Héraclite** avec son "panta rhéi" - tout coule. Le professeur Reiner et le professeur E.Bingham furent les fondateurs de la science de la rhéologie dans les années 20.

Définition de la rhéologie :

La rhéologie est une discipline qui traite de l'écoulement, des déformations des matériaux sous l'action de contraintes. Elle a été développée pour décrire les propriétés de matériaux au comportement mal défini et intermédiaire entre celui du solide élastique parfait et celui du fluide newtonien. Elle est proposée par Eugène BINGHAM en 1928.

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

La caractérisation des matières :

L'un des principaux aspects de la rhéologie est la définition et la classification des matières. Le verre normal, par exemple, est généralement défini comme étant une matière solide, mais si l'on mesure l'épaisseur d'une fenêtre de vieille église sur sa hauteur, on remarque une différence. En fait, le verre coule comme un liquide, même s'il s'agit d'un écoulement très lent.

Une matière peut être caractérisée .par exemple par son temps de relaxation. C'est-à-dire le temps nécessaire pour réduire une contrainte dans la matière par l'écoulement.les grandeurs type des temps de relaxation des matières sont :

- Gaz $< 10^{-6}$ s
- Liquides 10^{-5} à 10^2 s
- Solides $> 10^2$ s

On peut également caractérisée rhéologiquement les matières par les termes visqueux, élastique ou viscoélastique (figure II.1). Normalement les gaz ,les liquides sont décrits comme étant des fluides visqueux .Un fluide visqueux parfait est incapable d'emmagasiner une énergie de déformation .

C'est pourquoi il se déforme irréversiblement lorsqu'il est soumis a une contrainte ; il s'écoule et l'énergie de déformation de dissipe en chaleur, d'où une hausse de sa température.

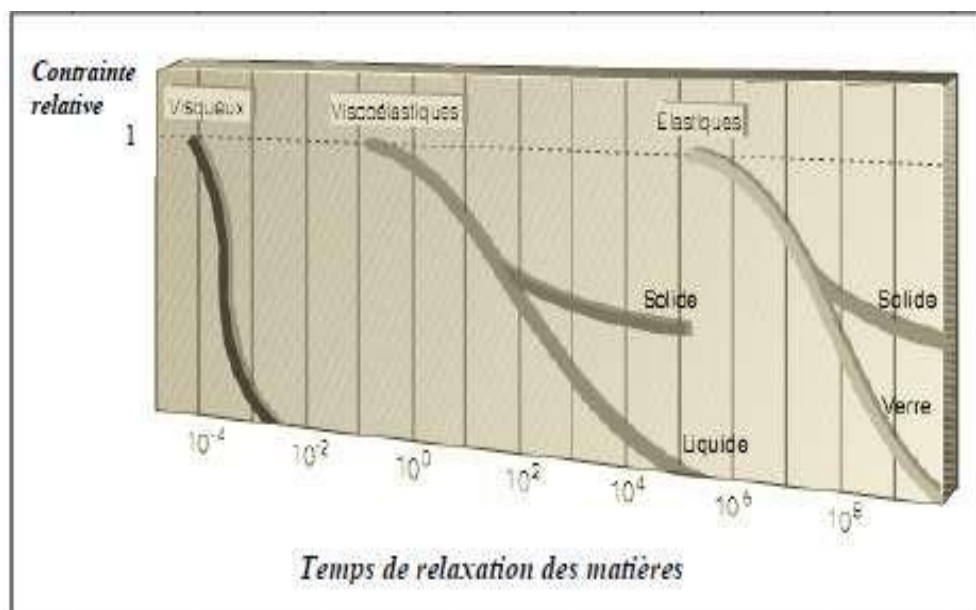


Figure II.1 : contrainte relative de différents types de la matière en fonction de temps de relaxation.

A l'inverse, on décrit habituellement les solides comme étant des matière élastiques .Une matière élastique parfaite emmagasine toute l'énergie de déformation imposée et revient par conséquent complètement à son état des que l'on relâche la contrainte. Ainsi, on peut dire d'un fluide visqueux qu'il résiste a l'acte de déformation qu'à l'état de déformation.

Un certaine nombre de matière présentent des propriétés visqueuse de même que des propriétés élastique : c'est-à-dire, elles emmagasinent une partie de l'énergie de déformation dans leur structure, et en perdent une partie par l'écoulement. on dit que ces matières sont viscoélastique.

4.le cisaillement

En rhéologie, le cisaillement d'une substance est l'élément déterminant pour connaitre son écoulement et sa structure .On obtient un flux cisailé par l'écoulement entre les plan parallèles, l'écoulement rotationnel entre cylindres coaxiaux, ou l'un des cylindres est fixe et l'autre rotatif, l'écoulement de torsion entre plaques parallèles.

Pour étudie la viscosité d'une matières le cisaillement doit induire une flux stationnaire de la matière. Pour qu'il y ait écoulement, il doit y avoir réorganisation et déformation des particules et rupture des liaisons dans la structure de la matière.

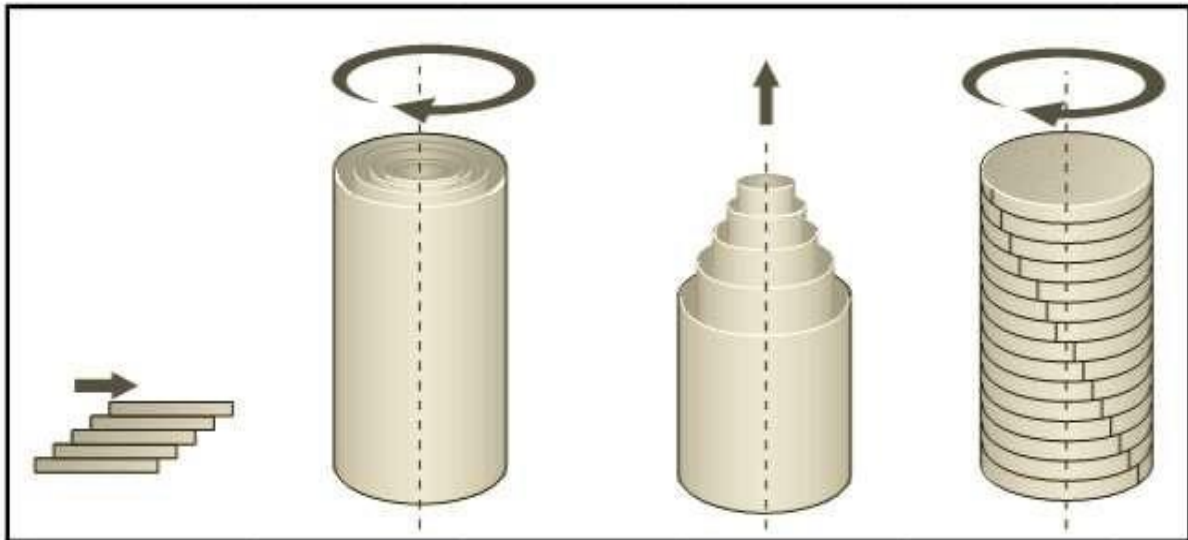


Figure II.2 : différents types de cisaillement.

On définit la contrainte de cisaillement comme étant :

$$\sigma_{yx} = \frac{F}{A} \quad [\text{Pa}]$$

F : Force (n)

A : surface (m²)

Et le taux de cisaillement comme étant

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dy} \quad [1/S]$$

Et la viscosité apparente d'un fluide comme étant

$$\eta_a = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad [\text{Pas}]$$

Notion de mouvement laminaire de cisaillement.

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

Un mouvement laminaire de cisaillement est engendré pour certaines distributions de ces forces. Au cours d'un tel mouvement, on considère que le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes. La déformation du matériau s'effectue par glissement relatif des différentes couches, sans qu'il y ait transfert de matière d'une couche à l'autre. Les mouvements laminaires de cisaillement sont engendrés à l'aide de rhéomètres.

C'est à partir de tels mouvements que peuvent être déterminés les paramètres rhéologiques des fluides.

Contrainte de cisaillement.

La contrainte de cisaillement (notée τ) est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparaît à l'interface de ces deux couches des forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche : elles sont appelées force de cisaillement (figure II.3).

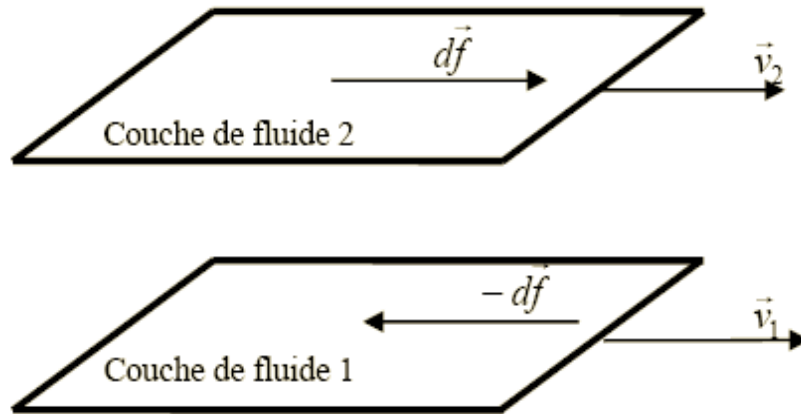


Figure II.3 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines.

En supposant que la couche (1) est animée d'une vitesse v_1 supérieure à la vitesse v_2 de la couche (2), la couche (1) exerce sur la couche (2) une force de cisaillement dF parallèle au mouvement et tendant à accélérer la couche (2). La couche (2) exerce pour sa part sur la couche (1), une force de cisaillement $-dF$ tendant à la freiner. En rapportant ces forces de cisaillement à l'unité de surface, on définit la contrainte de cisaillement τ :

$$\tau = dF / dS$$

τ : représente une force par unité de surface ; elle s'exprime en newton par m² ou bien plus commodément en Pascal (Pa) et dS est la surface élémentaire de l'entité considérée.

Il est à noter que dans le calcul de la résultante des forces, les forces de pression s'exerçant perpendiculairement à la surface ne sont pas prises en compte, du fait de leur faible valeur en comparaison des forces de cisaillement.

II.3 Déformation et vitesse de cisaillement.

Ces deux grandeurs constituent les grandeurs cinématiques fondamentales en rhéologie. La définition de la déformation de cisaillement est présentée dans le cas particulier le plus simple d'un mouvement de cisaillement présentant une symétrie plane. Le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre immobile (figure II.4).

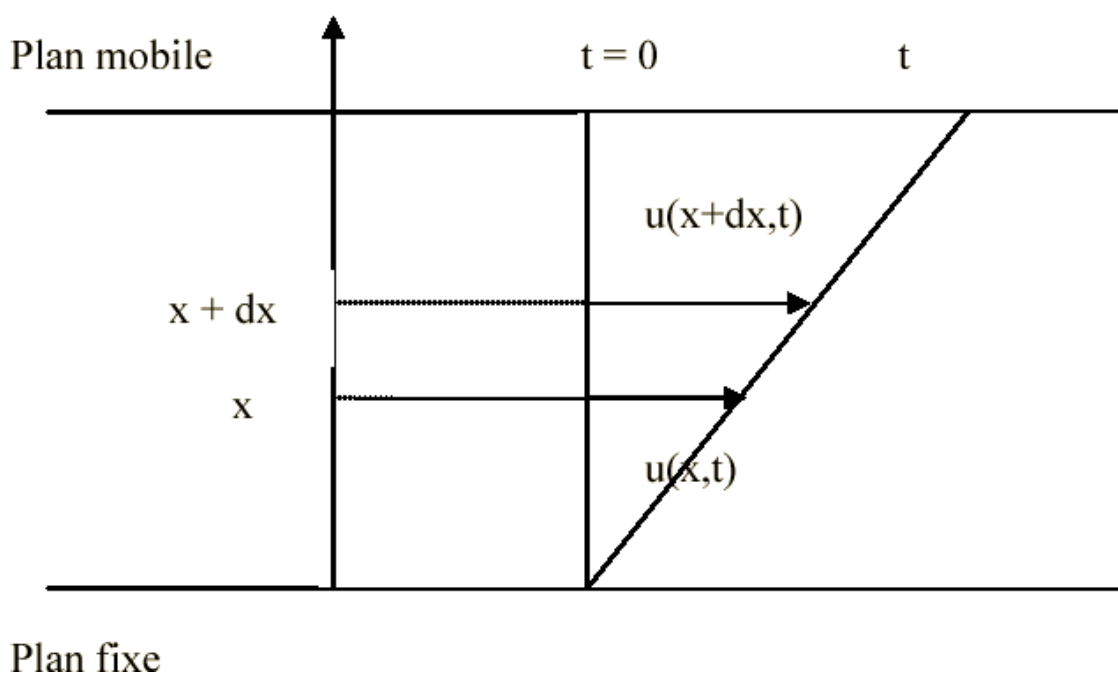


Figure II.4 : *Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles.*

On considère arbitrairement que les particules de matière de deux couches adjacentes se trouvent à l’instant $t = 0$ dans une section droite. A l’instant t postérieur, les particules auront parcouru la distance $u(x, t)$ pour la particule située à l’abscisse x et $u(x+dx,t)$ pour la particule située à l’abscisse $x+dx$.

La déformation de cisaillement est définie par l’équation :

$$\gamma = du(x,t) / dx$$

Cette grandeur est sans dimension ; elle ne dépend pas du déplacement $u(x,t)$ lui-même mais de la variation de ce déplacement lorsqu’on passe d’une couche à une couche infiniment proche.

L’expression de la vitesse de cisaillement ($\dot{\gamma}$), il s’agit de la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = d\gamma / dt$$

$\dot{\gamma}$ a la dimension de l’inverse d’un temps et s’exprime en s^{-1} .

Equation d’état.

La détermination de ces deux grandeurs (contrainte de cisaillement et déformation ou vitesse de cisaillement) permet de définir l’équation rhéologique d’état du matériau, c’est-à-dire la relation les unissant ($\gamma = f(\tau)$ ou bien $\dot{\gamma} = f(\tau)$). Les rhéogrammes sont les courbes traduisant graphiquement l’équation rhéologique d’état du matériau. La représentation la plus courante consiste à exprimer la variation de la contrainte de cisaillement avec celle de la vitesse de cisaillement.

La détermination de ces paramètres permet, entre autre, d’obtenir la viscosité du fluide étudié (dans le cas des fluides newtoniens), grandeur suffisant bien souvent à caractériser de

manière précise le comportement rhéologique du matériau étudié. La viscosité s'exprime en Pa.s, elle est notée μ . Le tableau 1 donne des valeurs de viscosité de substances usuelles à température ambiante [13].

Tableau II.1 : *Quelques ordres de grandeur des valeurs de viscosité de différents matériaux à température ambiante.*

| matériaux | Viscosité (Pa.s) |
|------------------|------------------|
| Air | 10 ⁻⁵ |
| Eau | 10 ⁻³ |
| Huile d'olive | 10 ⁻¹ |
| Glycérine | 1 |
| Miel | 10 |
| Polymères fondus | 10 ³ |
| Bitume | 10 ⁸ |

La viscosité.

La notion de viscosité traduit une résistance à la déformation ou bien au glissement relatif des couches adjacentes du fluide les unes par rapport aux autres.

C'est une grandeur d'intérêt capital en rhéologie ; sa connaissance suffit parfois à caractériser de façon précise le comportement rhéologique du matériau. On définit différents coefficients de viscosité:

Typologie de l'écoulement.

L'écoulement des fluides newtoniens est le cas le plus simple que l'on puisse rencontrer. Dans ce cas, la vitesse de cisaillement et contrainte de cisaillement sont reliées par une loi linéaire,

La pente de la droite alors obtenue en traçant le rhéogramme est la viscosité du fluide. Tous les fluides homogènes pour lesquels la dissipation d'énergie est due aux collisions d'espèces moléculaires relativement petites ont un comportement newtonien (gaz, liquides usuels et solutions de molécules de faible poids moléculaire).

La majorité des fluides présentent toutefois des comportements non newtoniens qui font appel à l'utilisation de modèles rhéologiques plus complexes pour décrire leur comportement en écoulement.

Il est possible d'effectuer une classification rhéologique des fluides suivant la nature des paramètres influençant leur comportement rhéologique. Nous distinguons deux catégories principales de fluides :

- Les fluides indépendants du temps ;
- Les fluides dépendants du temps ;

Les fluides indépendants du temps.

Ce sont des fluides pour lesquels la contrainte de cisaillement τ est fonction seulement de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$. Leur comportement rhéologique est indépendant de la durée d'application de la contrainte.

Ce type de fluide est subdivisé en fluide newtonien, non newtonien et fluide viscoélastique.

a) Les fluides newtoniens.

Ils sont caractérisés par l'équation rhéologique d'état :

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

τ : Contrainte de cisaillement [Pa].

$\dot{\gamma}$: Vitesse de cisaillement [s⁻¹].

μ : Viscosité dynamique du fluide [Pa.s].

La viscosité dynamique est indépendante de la contrainte appliquée et du temps.

Elle ne dépend que de la température, de la pression et de la nature du fluide.

b) Les fluides non newtoniens.

Ce sont tous les fluides pour lesquels la relation entre la contrainte de cisaillement τ et la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ n'est pas proportionnelle. Les raisons du caractère non newtonien d'un fluide sont liées à la taille de particules, leurs concentrations dans la phase continue, leur nature, leur forme, leur aptitude à la déformation ou bien encore la réactivité physico- chimique de la phase continue notamment dans le cas de suspensions colloïdales. Ils sont caractérisés par la relation générale:

$$\tau = \mu_a \cdot \dot{\gamma}$$

Avec

μ_a : la viscosité apparente dépendant de la vitesse de déformation [Pa.s].

On distingue deux catégories principales de fluides non newtoniens indépendants du temps :

- ✓ *Les fluides à contrainte critique (seuil) d'écoulement.*
- ✓ *Les fluides sans contrainte critique (seuil) d'écoulement.*

II.9.1.1. Fluides à contrainte critique.

Cette catégorie de fluides est aussi communément désignée par l'appellation fluide plastique, la figure II.5 donne une vue des courbes d'écoulement les caractérisant. Il s'agit de fluides ne s'écoulant pas avant qu'il leur soit appliqué une contrainte de cisaillement minimale appelée seuil d'écoulement τ_c . (Figure II.5).

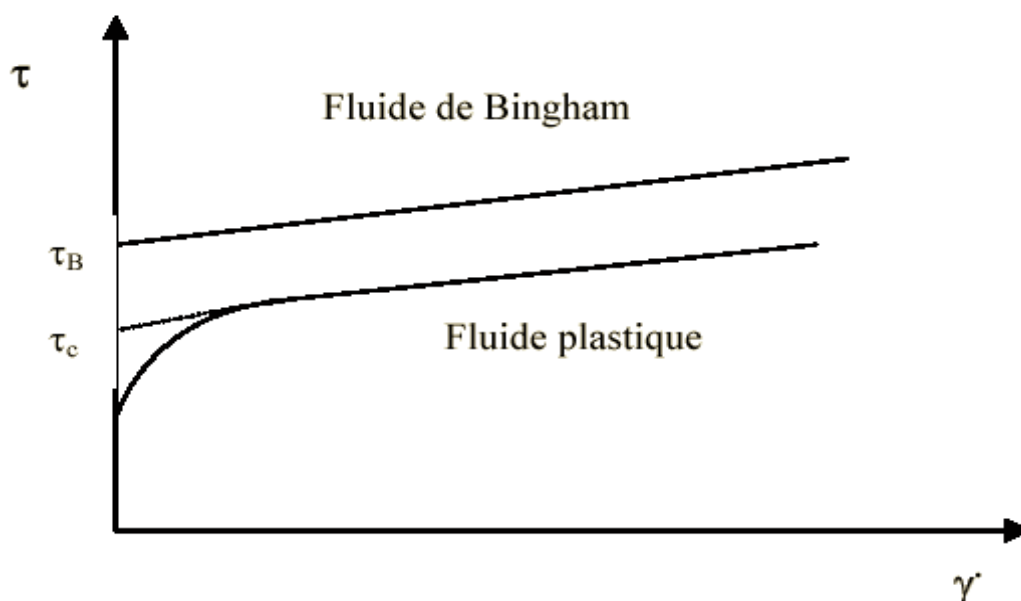


Figure II.5 : Courbes d'écoulement de fluides présentant une contrainte critique.

Tableau II.2 : Modèles rhéologiques décrivant l'écoulement de fluides à contrainte critique (d'après Midoux, 1988).

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

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

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

Les systèmes étudiés dans le présent manuscrit sont des fluides rhéofluidifiants qui obéissent au modèle d'Herschel-Bulkley, le comportement rhéofluidifiant se caractérise par une viscosité qui diminue quand le gradient de cisaillement augmente (shear thinning ou pseudoplastique), les produits rhéofluidifiants présentent souvent un comportement newtonien pour les gradients de cisaillement très élevés.

Les suspensions, émulsions, polymères en solution sont constitués au repos de particules de formes irrégulières, gouttelettes ou chaînes emmêlées qui constituent une viscosité élevée car ayant une forte résistance à l'écoulement. Soumis à une contrainte, l'écoulement s'accélère, les particules s'orientent, les chaînes se démêlent parallèlement à la force d'entraînement et opposent ainsi une résistance plus faible. La viscosité diminue.

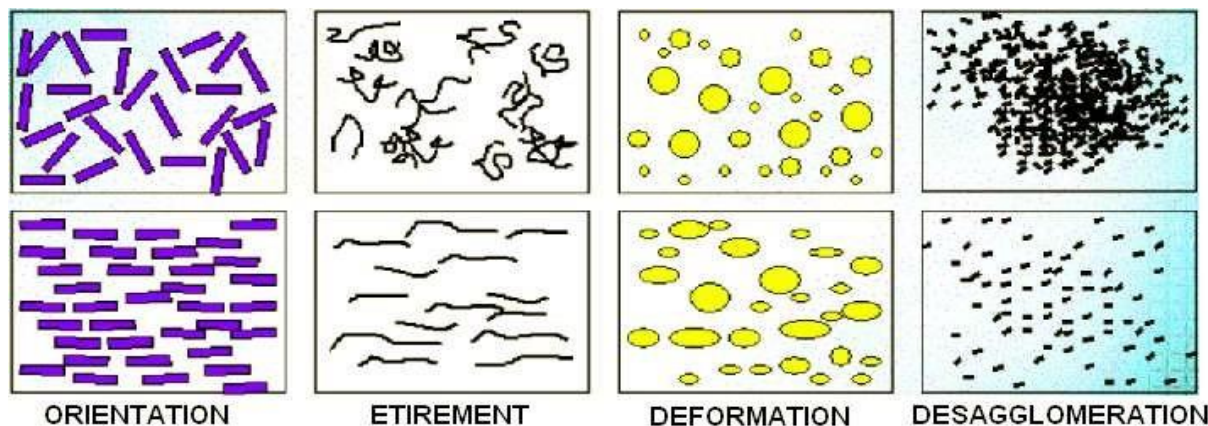


Figure II.6 : Schéma d'état de la matière en solution (a) avant et (b) après cisaillement

Fluides sans contrainte critique.

La figure II.7 présente les courbes d'écoulement des deux principales catégories de fluides sans contrainte critique, à savoir les fluides pseudo-plastiques (ou rhéofluidifiants) et les fluides dilatants (ou rhéoépaississants).

Pour les fluides pseudoplastiques, le rapport $\tau / \dot{\gamma} = \mu_a$ (viscosité apparente) est à peu près constant pour les plus faibles valeurs de vitesse de cisaillement imposées et vaut μ_0 . Ce rapport décroît ensuite progressivement lorsque la vitesse de cisaillement augmente (d'où le nom de rhéofluidifiant), jusqu'à atteindre une valeur de viscosité limite (μ_∞).

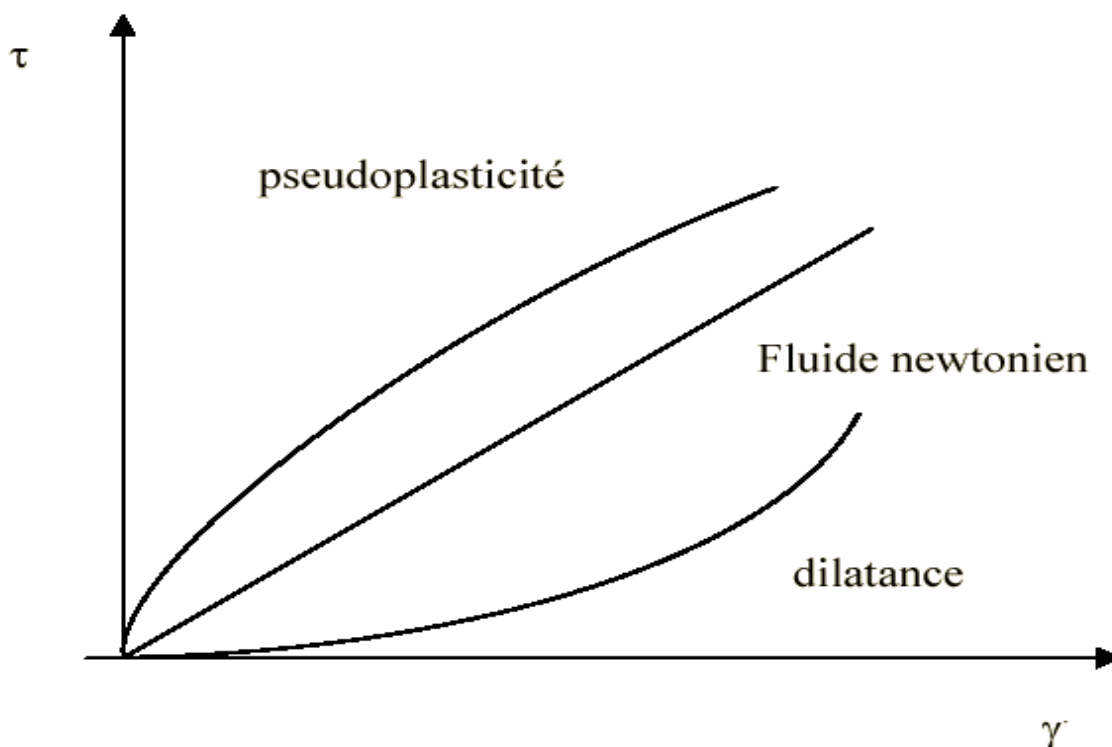


Figure II.7 : Courbes d'écoulement des principales catégories de fluides sans contrainte critique.

Les principales lois rhéologiques décrivant le comportement de tels fluides sont présentées dans le tableau II.3.

Tableau II 3 : *Lois rhéologiques de fluides ne présentant pas de contrainte critique (d'après Midoux, 1988).*

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

Parmi ces modèles d'écoulement, la loi d'Ostwald de Waele est la plus communément utilisée. Dans ce modèle, k est appelée la consistance du fluide et n l'écart de l'exposant (ou indice d'écoulement) à l'unité (0 < n = 1) traduit la non perfection visqueuse du fluide considéré.

Parmi les fluides présentant un comportement pseudoplastiques, on compte les suspensions de particules asymétriques, les ciments, les colles, certaines peintures ...

Les fluides dilatants obéissent également à une loi puissance d'Ostwald mais avec n > 1, la viscosité apparente croît avec la vitesse de cisaillement qui augmente. Cette catégorie de fluides est beaucoup plus rare que les fluides pseudoplastiques, elle se rencontre essentiellement pour des suspensions à forte teneur en matière solide (concentrations volumiques supérieures à 50 %).

Ce type de comportement peut avoir pour origine une transition ordre-désordre entre les particules constitutives du fluide, pour les plus faibles vitesses de cisaillement, les particules sont plus ou moins alignées alors que pour les plus fortes valeurs de vitesse de cisaillement, elles sont dispersées aléatoirement, ce qui induit une viscosité qui augmente lorsque le désordre s'installe au sein du fluide.

c) Les fluides viscoélastiques.

Le mot viscoélastique veut dire l'existence simultanée des propriétés élastiques et visqueuses dans un matériau [13]. Tous les liquides présentent des propriétés visqueuses, certains possédant une structure complexe peuvent également présenter des propriétés élastiques.

Ce comportement se manifeste notamment lorsqu'on applique ou lorsqu'on supprime brutalement un cisaillement par l'apparition d'un régime transitoire pendant lequel la structure de l'échantillon évolue avant de se stabiliser. La détermination des propriétés viscoélastiques de certains matériaux passe par la mise en place d'une analyse oscillatoire.

Ce type de test consiste à imposer à l'échantillon un cisaillement oscillatoire de pulsation donnée ω . Lors de ces tests, la contrainte $\tau(t)$ et la vitesse de cisaillement $\gamma(t)$ évoluent sinusoidalement au cours du temps.

Les fluides dépendants du temps.

Le comportement des fluides dépendant du temps est caractérisé par l'évolution de leur structure interne. Cette modification peut être très rapide; dans ce cas, le temps n'intervient pas de manière apparente dans les équations d'écoulement et la viscosité apparente est fixée uniquement pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement.

Par contre, si la modification de la structure interne du fluide est lente, les caractéristiques de l'écoulement du fluide seront influencées par les traitements antérieurs et la viscosité apparente dépendra dans ce cas d'un autre paramètre : « le temps ».

On distingue deux catégories dans ce type de fluide :

- Les fluides thixotropes;
- Les fluides rhéopexes.

Fluides thixotropes.

La consistance de tels fluides dépend aussi bien de la vitesse de cisaillement que de la durée du cisaillement. Dans ces conditions, la viscosité apparente n'est plus fixée pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement mais dépend également du paramètre temps.

Ainsi, l'écoulement d'un matériau peut être facilité par une agitation préalable de l'échantillon à étudier. La méthodologie utilisée pour déterminer le caractère thixotrope de fluides consiste le plus souvent en l'application d'un cycle de cisaillement montée-palier-descente (cisaillement croissant-cisaillement constant-cisaillement décroissant).

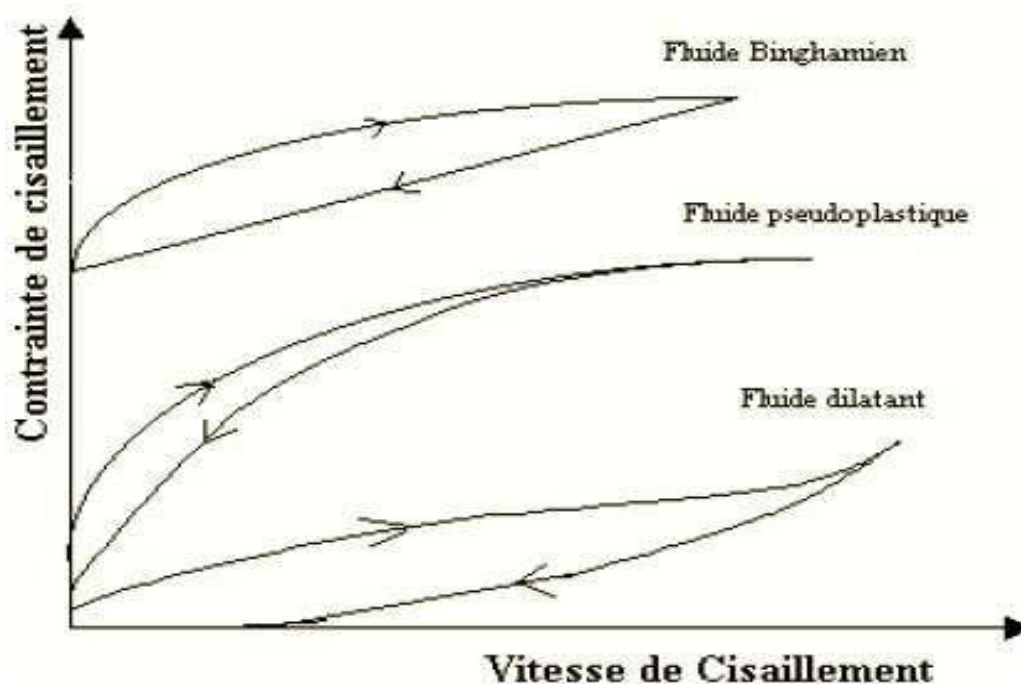


Figure II.8 : Boucles d'hystérésis de fluides thixotropes

Fluides rhéopexes.

Cette catégorie de fluides présente un comportement contrairement aux fluides thixotropes. Lorsqu'ils sont soumis à un faible cisaillement, leur structure interne s'organise et par conséquent conduit à une augmentation de la viscosité.

La rhéologie des fluides de forage

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 :

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.

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

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

L_{600} et L_{300} sont les lectures respectives à 600 rpm et 300 rpm sur le rhéomètre

la contrainte seuil ou « Yield value »

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

C'est une mesure dynamique. La contrainte seuil dépend des types des solides présents, de leurs charges de surface, respectives, de la concentration de ces solides, du type et la concentration des autres ions ou sels qui peuvent être présents.

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

L_{600} et L_{300} sont les lectures respectives à 600 rpm et 300 rpm sur le rhéomètre.

VP: Viscosité plastique.

Rhéomètre.

Pour la caractérisation des propriétés rhéologiques des fluides, il existe une variété de rhéomètres nous distinguons trois grandes classes de rhéomètres :

1. les rhéomètres à régime permanent, fonctionnant essentiellement comme viscosimètres pour déterminer les viscosités et les rhéomètres τ - γ de substances liquides.
2. les rhéomètres à régime transitoire qui permettent l'étude des propriétés viscoélastiques des matériaux.
3. enfin, les rhéomètres dynamiques fonctionnant en régime sinusoïdal et fournissant une description très complète des propriétés rhéologiques des substances.

Les rhéomètres a régime permanent.

Dans ces rhéomètres, la substance a étudiée est soumise à un mouvement laminaire indépendant du temps : les différents couches s'écoulent sans que vitesse et contrainte de cisaillement subissent aucune modification au cours du temps. Ils sont utilisés à l'étude seule des substances possédant le comportement liquide, capables par conséquent de suivre un processus d'écoulement permanent, l'objectif expérimental recherché étant la détermination de leur rhéogramme.

Dans cette catégorie, nous distinguerons essentiellement deux types de rhéomètres :

⊕ les rhéomètres de type Couette dans lesquels la substance étudiée est cisailée entre deux surfaces solides, l'une au repos, l'autre mobile.

⊕ Les rhéomètres de type Poiseuille dans lesquels le mouvement de cisaillement est engendré par l'application aux extrémités d'un tube cylindrique contenant l'échantillon d'une différence de pression ou encore par l'action de la pesanteur.

Dans cette catégorie on peut aussi citer le viscosimètre à chute de bille dont les possibilités sont limitées, mais qui est cependant très connu et relativement utilisé.

*II.11.1.A). RHEOMETRES DE TYPE COUETTE.***1. Rhéomètres plans à translation.**

La substance à étudier est placée entre deux plans solides parallèles et de même surface, une force constante est appliquée tangentiellement au plan mobile, lui communiquant un mouvement de translation parallèle à lui-même, avec une vitesse, le deuxième plan demeurant fixe. Un mouvement laminaire de cisaillement est engendré.

2. Rhéomètres rotatifs cylindriques.

C'est la classe de rhéomètre la plus fréquemment utilisée. Dans ce type la substance étudiée est emprisonnée entre deux cylindres de révolution, coaxiaux, de rayons R_1 et R_2 , et de hauteur h .

le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant à l'un des cylindres un mouvement de rotation uniforme de vitesse angulaire ω_0 , l'autre cylindre demeurant immobile. La substance se décompose en couches cylindriques coaxiales, animées de vitesses angulaires différentes, variant continûment de 0 (pour la couche en contact avec le cylindre fixe) à ω_0 (pour la couche en contact avec le cylindre mobile).

Par suite du mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres, il apparaît en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement et une contrainte de cisaillement

3. Rhéomètres rotatifs à cône/plateau.

Ce type de rhéomètre possède de très grandes qualités qui font de lui un concurrent et un complément indispensable au rhéomètre cylindrique.

La substance étudiée est emprisonnée entre un plateau et un cône de révolution, de rayon R , dont l'axe est perpendiculaire au plan du plateau, et dont le sommet est situé sur le plateau, l'angle ψ que fait la génératrice du cône et le plateau est petit : il est toujours inférieure à 5° et peut descendre jusqu'à $0,3^\circ$.

Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant au cône une vitesse de rotation constante ω_0 , le plateau demeurant fixe. La substance se décompose alors en couches, qui sont constituées par des cônes de révolution de même sommet et de même axe que le cône solide, animées de vitesses angulaires de rotation différentes, variant continûment de 0 (pour la couche en contact avec le plateau) à ω_0 (pour la couche en contact avec le cône solide). Par suite du mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres, il apparaît en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement et une contrainte de cisaillement.

Le très grand avantage du rhéomètre cône/plateau sur les autres types d'appareils réside dans le fait que, dans la mesure où $\psi < 0,5^\circ$ (condition vérifiée par construction), on peut considérer, avec une très bonne précision, que la contrainte et la vitesse de cisaillement sont constants en tout point de l'échantillon.

es rhéomètres à régime transitoire.

Les rhéomètres à régime transitoire sont utilisés essentiellement pour déterminer le comportement viscoélastique des matériaux linéaires, aussi bien solide que liquide.

Dans tels rhéomètres, on soumet l'échantillon à une sollicitation instantanée, qui est maintenue constante, et l'on étudie son comportement dans les instants qui suivent. Pendant un certain intervalle de temps qui précède l'établissement d'un régime permanent, le matériau manifeste un comportement dépendant du temps : l'étude de ce régime transitoire permet la détermination de ses propriétés viscoélastiques.

Il existe deux types de rhéomètres transitoires : les rhéomètres à fluage et les rhéomètres à relaxation.

Les rhéomètres dynamiques (ou oscillants).

Dans les rhéomètres dynamiques, les échantillons étudiés sont soumis à des mouvements laminaires de cisaillement d'amplitudes variant sinusoïdalement dans le temps ;

On peut distinguer deux types d'appareils selon que le mouvement est entretenu ou non :

- ✓ Les rhéomètres à oscillations forcées qui peuvent fonctionner dans toute une gamme de fréquence ou à une seule fréquence particulière (rhéomètre résonants) ;
- ✓ Les rhéomètres à oscillations libres qui permettent de mesurer de faibles viscosités par l'étude de l'amortissement.

CHAPITRE.III.

Les Argiles

CHAPITRE.III.

Les argiles sont issues de la transformation de roches, et se présentent sous la forme de feuillets dont la taille est inférieure à 3,9 μm selon le critère de Wentworth. Les argiles font donc partie des colloïdes. Il existe quatre modes de formation des argiles.

Le premier provient d'un héritage mécanique, érosion d'une roche puis sédimentation, le deuxième plus récent fait intervenir la cristallisation en solution, le troisième est le résultat de la dégradation d'une argile complexe en une autre plus simple et enfin le dernier, est issu de la formation d'une argile élaborée à partir d'une argile simple.

Ces argiles se reconnaissent par leur couleur, leur granulométrie, leur forme, leur réactivité, leur capacité d'échange ionique. A la suite de l'arrivée de la diffraction des rayons X, les argiles ont été classées selon la famille cristallographique à laquelle elles appartiennent.

Définition de l'argile :

Les argiles jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines de la technologie des fluides de forage. Le groupe des argiles peut-être décrit chimiquement comme silicate d'aluminium.

Étant donné que les éléments constituant les argiles représentent plus de 80% de la masse terrestre (8.1% d'aluminium 27.7% de silice et 46.6% d'oxygène). On comprendra facilement qu'à chaque étape du forage d'un trou, on rencontre des argiles.

Les formations les plus souvent forées sont des argiles dans les quelles le type et la quantité de minéraux argileux présents représentent un des aspects les plus importants déterminant les caractéristiques chimiques et mécaniques de la roche. Le choix du fluide de forage est souvent lié aux réactions entre le fluide et la roche, car celles-ci influencent la stabilité du puits. Il est donc important de bien comprendre le rôle de la chimie des argiles dans la sélection des systèmes des fluides de forage et de la stabilité du puits. [14], [15]

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

Fréquemment de faible granulométrie, les argiles sont des minéraux, souvent mal cristallisés et hydratés, de forme lamellaire ou fibreuse. Elles sont souvent présentes en mélanges complexes d'espèces. Les minéraux argileux sont formés par l'empilement de feuillets, eux même constitués d'un empilement de couches. [16]

Caractéristiques de base :

Il existe un certain nombre de caractéristiques des minéraux argileux qui les distinguent en tant que groupe. Ils sont essentiellement composés de silice, d'alumine, d'eau, et souvent de quantités non négligeables de fer, de magnésium et de plus faibles quantités de sodium et de potassium.

D'autres caractéristiques comme la petite taille des particules, une grande superficie et la réactivité chimique à la surface, sont toutes liées aux détails de la structure. Les minéraux argileux sont construits à partir de deux structures de bases simples :

a) *Couche octaédrique :*

Cette structure est composée de deux feuilles d'oxygènes ou hydroxyle compactes dans lesquelles des ions d'aluminium, fer ou magnésium sont incrustés dans une structure octaédrique.

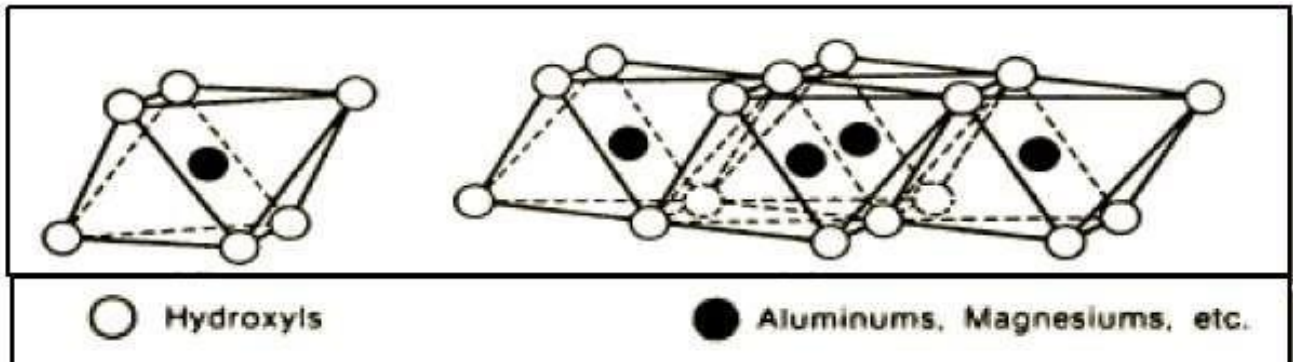


Fig. III.1 : Structure laminaire des unités octaédriques (Eslinger et Peaver 1988).

b) *Couche tétraédrique :*

Dans chaque couche tétraédrique, un atome de silice se trouve au centre d'un tétraèdre, à équidistance des 4 atomes d'oxygène ou d'hydroxyle, s'il est nécessaire d'équilibrer la structure ; les groupes tétraèdres de silice sont disposés en un réseau hexagonal qui se répète à l'infini pour former une feuille de la composition $\text{Si}^4\text{O}^6(\text{OH})^4$.

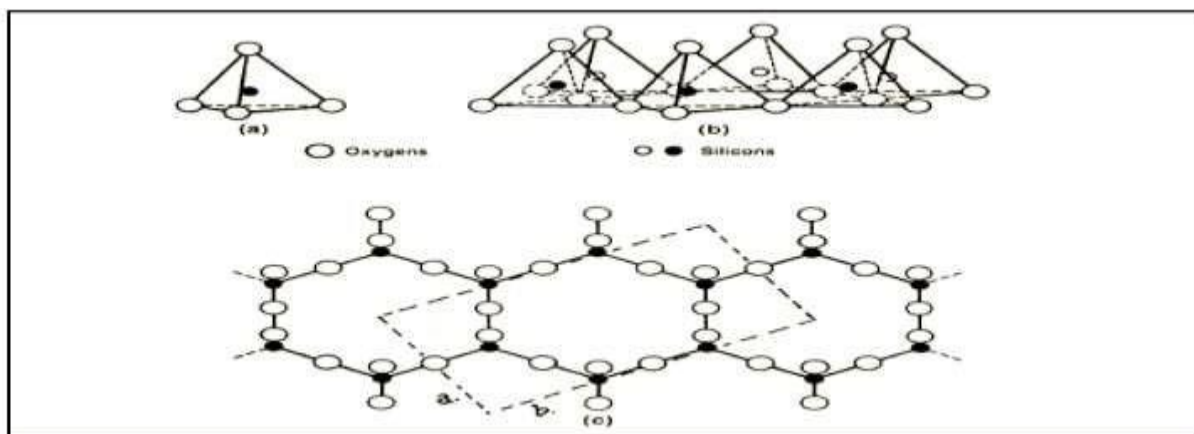


Fig. III.2 : Les tétraèdres (Eslinger et Peaver 1988).

Les unités de base des feuilles tétraédriques et octaédriques peuvent se combiner avec le groupe hydroxyle de la couche tétraédrique contribuant à former ainsi la couche octaédrique. Les combinaisons et les modifications chimiques ont créé 26 minéraux argileux différents. Les minéraux argileux sont formés de différents rapports de couche

silice/couche octaédrique .le groupe le plus important est celui ayant un rapport de 2 à 1.[16]

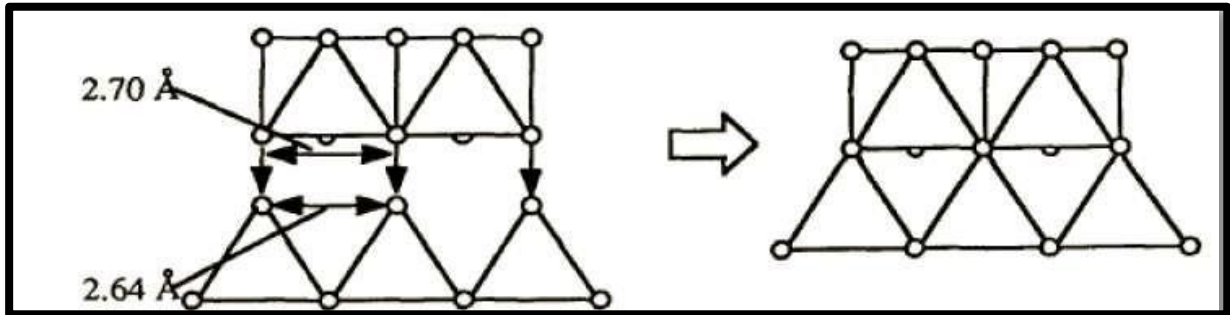


Fig. IV.3 : l'agencement des tétraédrites et des octaèdres (Moore et Reynolds 1989)

Classification des argiles :

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

- La combinaison de feuillets.
- Le type de cation dans l'octaèdre.
- La charge de la couche.
- type de matériel dans l'espace interfolier (cation, molécules d'eau...).

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

Selon le nombre de couches octaédriques (O) et tétraédriques (T), on distingue trois principaux types de minéraux:

- Les minéraux de type 1:1 (ou T-O) à une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres .L'équidistance caractéristique est d'environ 7,1Å. Ce type correspond le groupe de la kaolinite.

- Les minéraux de type 2:1 (ou T-O-T) à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques. L'équidistance caractéristique varie de 9,4 à 15 Å selon le contenu de l'inter feuillet. Ce type correspond les groupes du talc, des smectites, des vermiculites et celui des micas.

- Les minéraux de type 2:1:1(ou T-O-T-O) à une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques, et un inter feuillet constitué par une couche d'octaèdres ; l'équidistance caractéristique est alors d'environ 14 Å. Ce type correspond le groupe du chlorite.

Tableau III.1 : Classification des phyllosilicates.

| Type | Groupe | Sous-groupe | Espèces | Formules |
|-------|---------------|----------------------------|---|---|
| 1/1 | kaolinite | kaolinites | dichite nacrite kaolinite métahalloysite halloysite | $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 4H_2O$ |
| | | Serpentine | Antigorite | $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ |
| | talc | Pyrophyllite | pyrophyllite | $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ |
| | | Talc | Talc | $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ |
| | smectite | smectites dioctaédriques | montmorillonite | $(Al_{1,67}Mg_{0,33})Si_4O_{10}(OH)_2$ |
| | | smectites trioctaédriques | Saponite | $Mg_3(Si_{3,67}Al_{0,33})O_{10}(OH)_2$ |
| 2/1 | Vermi-culites | vermiculite dioctaédrique | vermiculite dioctaédrique | $(AlFe\dots)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$ |
| | | vermiculite trioctaédrique | vermiculite | $(MgFe\dots)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$ |
| | micas | Micas dioctaédrique | muscovite | $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ |
| | | Micas trioctaédrique | phlogopite | $KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$ |
| | | chlorite dioctaédrique | sudoite | $Al_4Si_2Al_2O_{10}(OH)_8$ |
| 2/1/1 | chlorite | chlorite trioctaédrique | espèces différentes | $(Mg,Fe\dots)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ |

kaolinite

Pas de substitution dans les couches. Le feuillet est neutre. La kaolinite se forme dans les sols bien drainés, par pH acide, surtout en climat subtropical et tropical. Ses cristaux sont souvent grands (jusqu'à 15 μm).

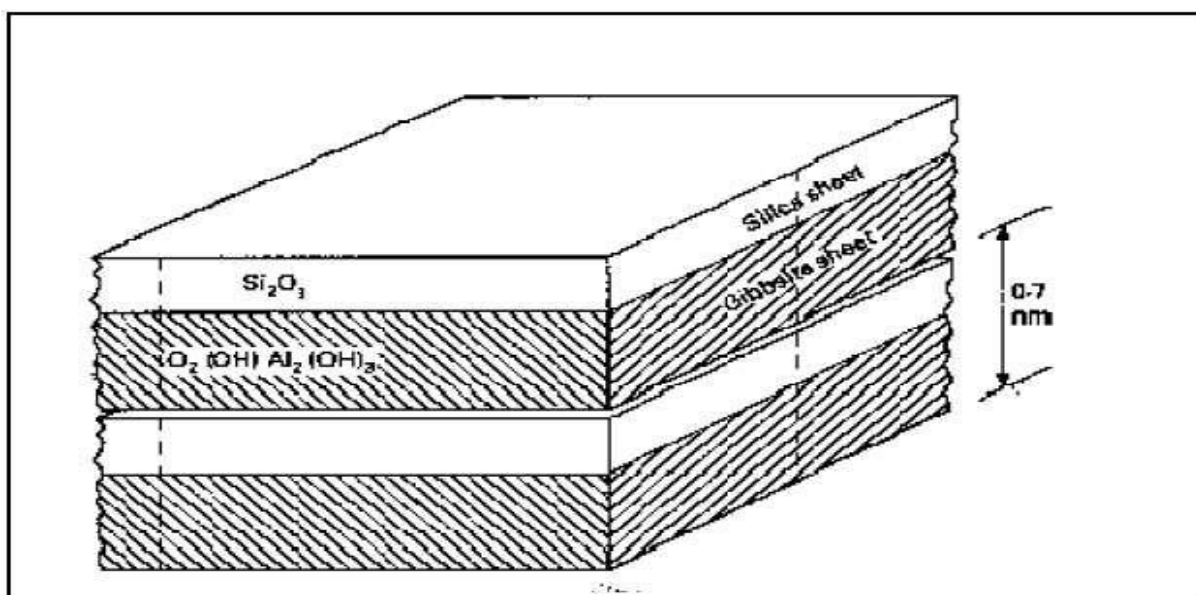


Fig. III.4 : Exemple de minéral argileux : kaolinite (White, 1999)

Illites

Association d'une CO (alumineuse) et deux CT (siliceuses). Mais il peut y avoir des substitutions (remplacement de Si par Al). Des cations (K^+) sont adsorbés dans l'espace interfoliaire afin de compenser le déséquilibre des charges. C'est le minéral ubiquiste par excellence. Sa structure est proche de la muscovite (plus d'eau, moins de K^+).

Smectites

L'empilement des feuillets est désordonné; chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent. Les substitutions d'atomes sont importantes. Ce désordre et la faible charge des feuillets facilitent leur écartement et l'adsorption des molécules variées (eau, cations, molécules organiques) au niveau de l'espace interfoliaire qui s'écarte ($d = 18 \text{ \AA}$).

Les smectites, ou montmorillonites, sont généralement calciques, plus rarement sodiques. Elles sont formées dans les sols mal drainés plutôt alcalins. Les feuillets de smectites peuvent s'intercaler régulièrement ou irrégulièrement avec d'autres feuillets argileux, souvent illitiques. L'ensemble forme des interstratifiés.

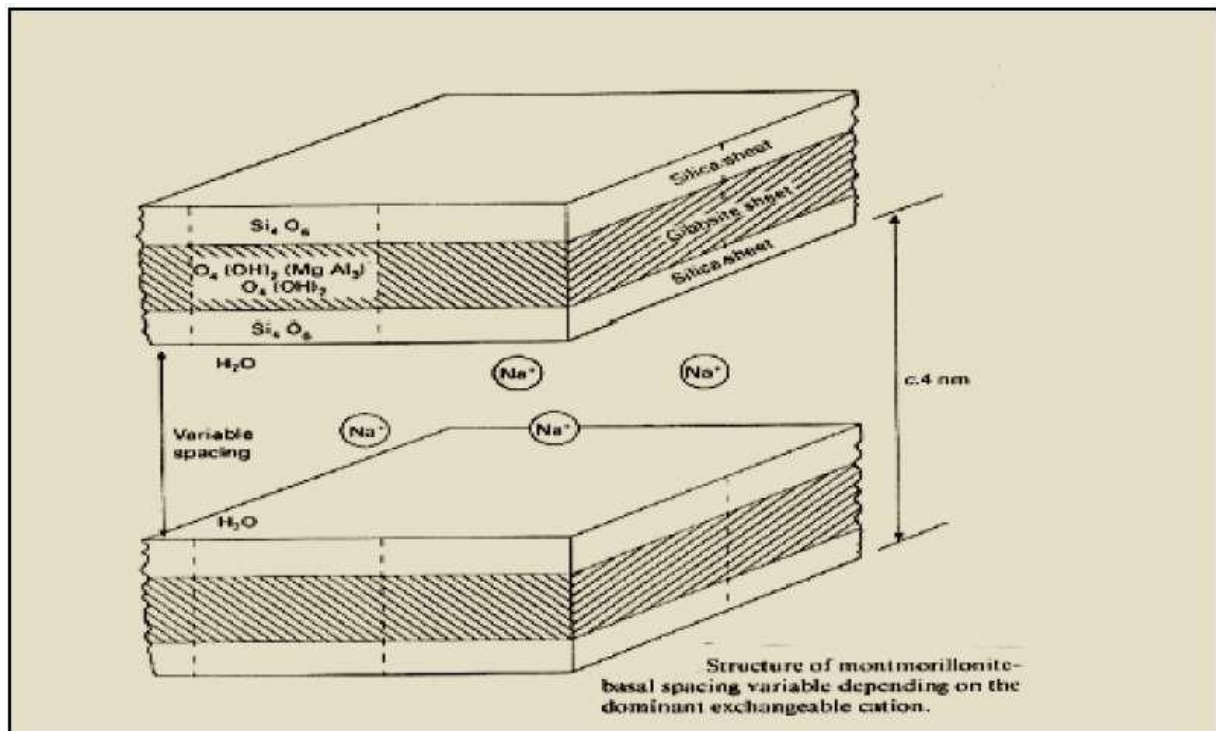


Fig. III.5 : Représentation d'une smectite (White, 1999)

Chlorites

L'espace interfoliaire est garni par une couche composée de Mg et OH. L'Al est remplacé localement par le Fe. Les chlorites existent en plus grands cristaux dans les roches magmatiques; elles sont également formées pendant la diagenèse des roches sédimentaires. On les retrouve en éléments détritiques dans les sols sous climat peu agressif.

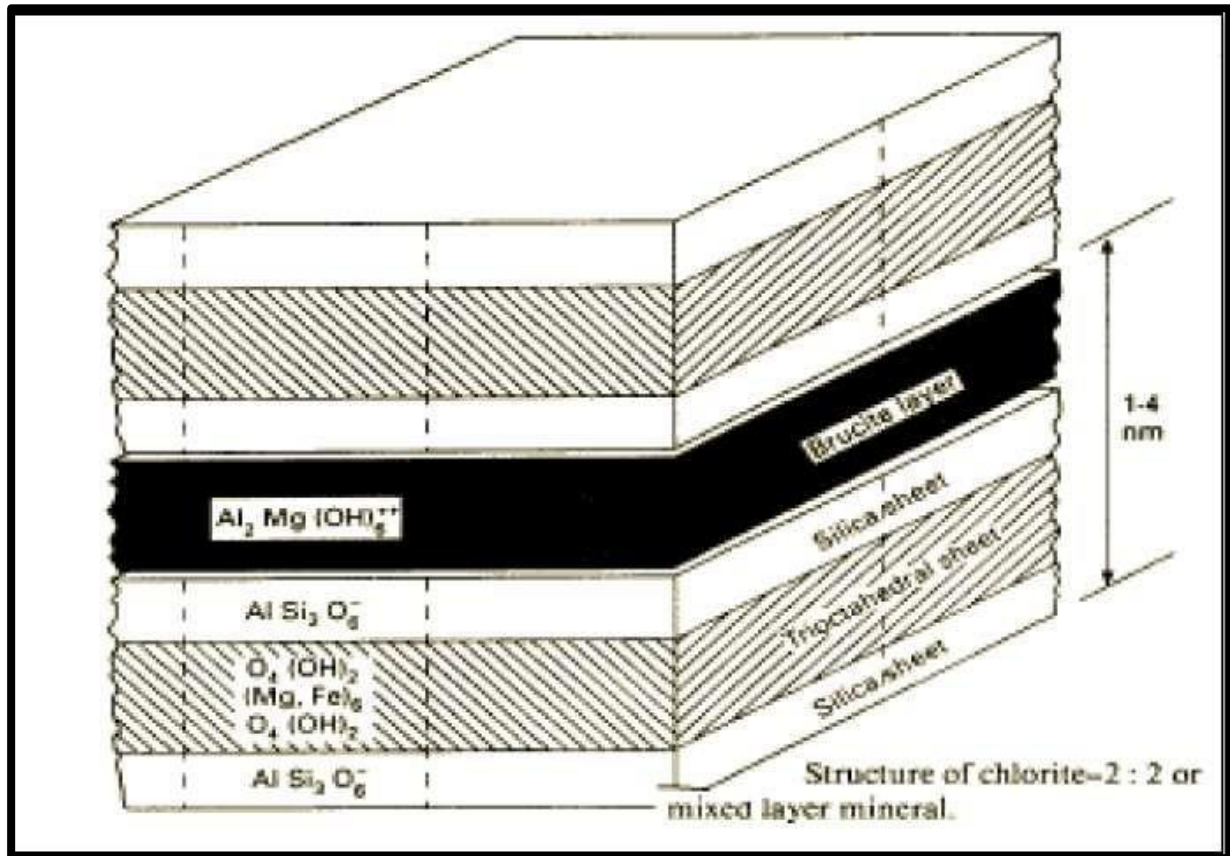


Fig. III.6 : Chlorite (White, 1999)

Vermiculite

Fréquente dans les sols de la zone tempérée. La couche octaédrique contient du Fe et du Mg. La vermiculite est proche des illites et chlorite mais montre des propriétés gonflantes.

Les argiles fibreuses :

Les feuillets sont discontinus et forment des rubans. Les principaux types sont la sépiolite et l'attapulgite.[17]

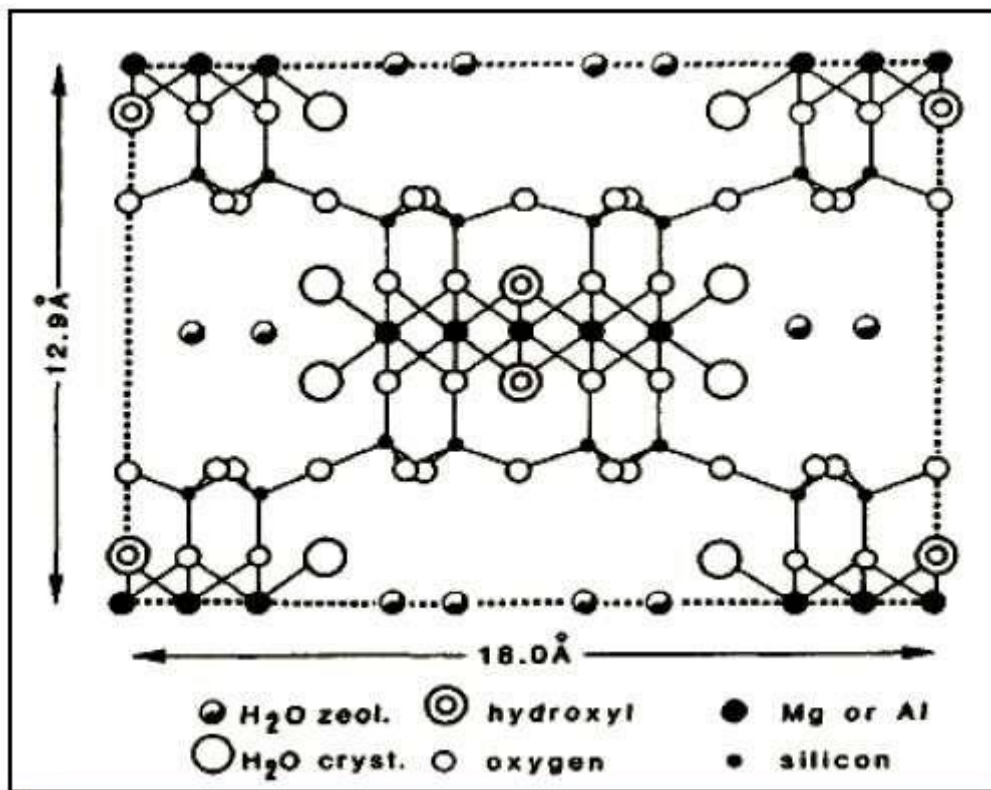


Fig. III.7 : Argiles fibreuses (chamley ,1989)

Propriétés des argiles :

Les minéraux argileux se caractérisent par trois propriétés principales:

- Leur forme et leur surface spécifique.
- Leur capacité d'adsorption d'eau et de gonflement.
- Leur multiple possibilité d'échanges ioniques.

Forme et surface spécifique :

Les argiles se présentent sous trois formes :

- En flocons, caractérisés par même dimension dans les deux directions et une épaisseur équivalente à 1/20^{ème} de la longueur.
- En latte, avec une dimension plus longue, épaisseur toujours équivalente à 1/20^{ème} de la longueur.
- En aiguilles, deux dimensions identiques et la 3^{ème} beaucoup plus grande.

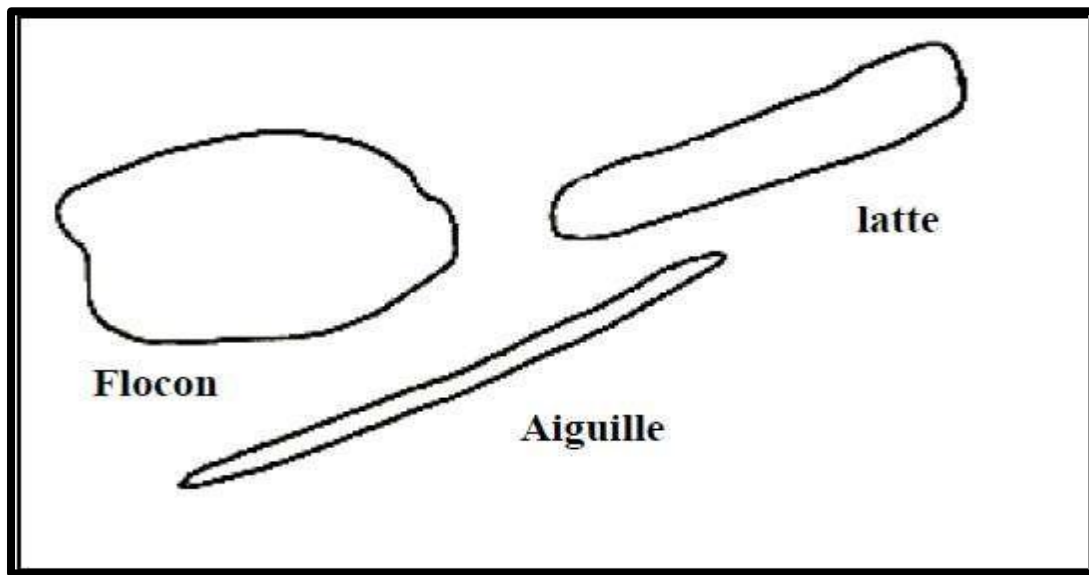


Fig. III.8 : Forme des particules argileuses (Velde, 1995)

Les argiles sont définies depuis le XIX siècle comme des minéraux de petite taille. Ces minéraux ne sont donc pas identifiables au microscope optique. En fait, la majorité des argiles ont des caractéristiques communes, ce qui justifie à posteriori la définition. La fine taille des argiles leur confère une surface importante par rapport au volume des particules. La surface relative augmente avec la diminution du diamètre. La surface des argiles est supérieure par rapport à celles de minéraux de même taille mais de forme différente. Le rapport épaisseur/largeur est de l'ordre de 20 pour les argiles.

Les propriétés des argiles sont principalement contrôlées par leur surface. Le Tableau 2 donne les valeurs caractéristiques des surfaces des grandes familles argileuses. La surface totale comprend la surface externe, comprise entre les particules argileuses, et la surface interne, correspondant à l'espace interfoliaire (Fig. III.9). Les smectites ont les surfaces totales maximales: surface Smectites > Vermiculites >>> Illites > Kaolinites = Chlorites.

Tableau III.2 : Surface spécifique des particules argileuses (Eslinger et peaver, 1988).

| Type d'argile/surfac spécifique (m ² /g) | Interne | Externe | Total |
|---|---------|---------|-------|
| Smectite | 750 | 50 | 800 |
| Vermiculite | 750 | 1 | 750 |
| Chlorite | 0 | 15 | 15 |
| Kaolinite | 0 | 15 | 15 |
| Illite | 5 | 25 | 30 |

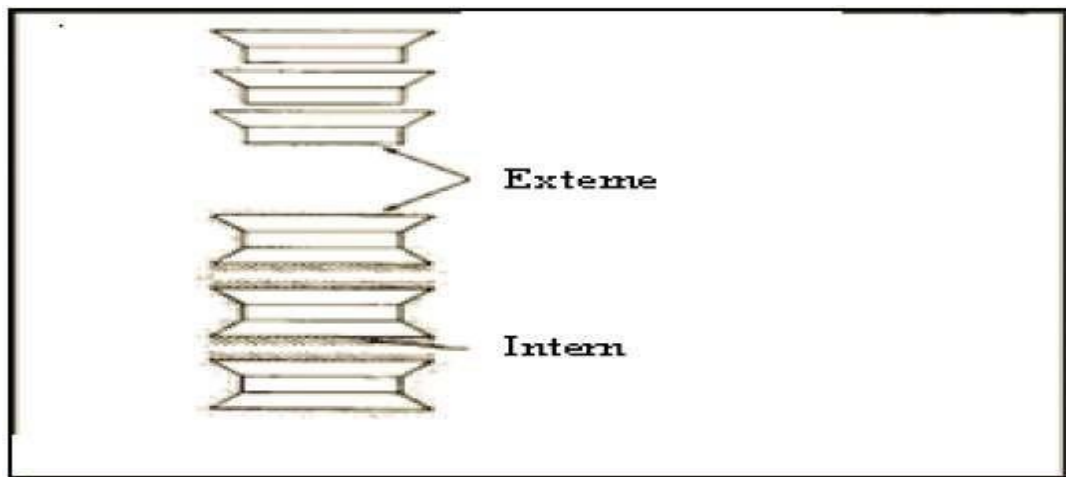


Fig. III.9 : Surface des particules argileuses.

Capacité d'adsorption et de gonflement :

Degré d'hydratation :

Le degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre. Certains minéraux argileux ont la capacité d'incorporer dans leur structure des molécules d'eau. Cette eau modifie la dimension de la couche en provoquant son gonflement. Ces argiles sont appelées argiles gonflantes. Les smectites, vermiculites et minéraux interstratifiés offrent des capacités d'expansion beaucoup plus importantes que celles des autres espèces argileuses.

Les minéraux gonflants ont une structure de base à 10Å. Selon l'hydratation, une couche d'eau de 2,5 à 5,2Å d'épaisseur se développe. Cette hydratation conduit à une augmentation de volume pouvant atteindre 95%. Notons qu'il existe des minéraux comprenant de l'eau adsorbée mais qui n'ont pas pour autant de propriétés de gonflement.

Surfaces argileuses:

Les minéraux argileux se caractérisent par une surface électrique non neutre. Il existe deux types de charge :

- Une charge permanente ou structurale liée aux substitutions ioniques (Al^{3+} pour Si^{4+} dans T, Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+} dans O), de signe négatif.
- Une charge de surface variable selon le pH du milieu, liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux ou suite à l'adsorption de surfactants, de signe (+) ou (-).

La charge de surface est liée à l'hydrolyse de liens rompus Si^-O et Al^-OH , le long des surfaces.

A faible pH, l'argile se caractérise par une capacité d'échange anionique, H^+ se lie plus par rapport à OH^- , une charge positive se développe, à fort pH, une capacité d'échange cationique (CEC) se développe, les OH^- se lient davantage que H^+ et une charge négative se développe. [18]

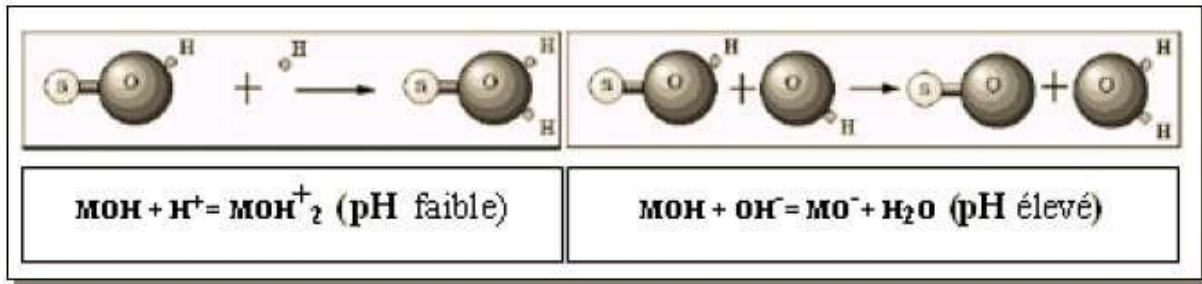


Fig. III.12 : Rôle du PH sur l'adsorption à l'équilibre et échange ionique (Schroeder, 2002).

III.5. Formation et utilisations de la bentonite :

Les bentonites sont issues de l'altération de produits du volcanisme soit par sédimentation de cendres en milieu lacustre ou lagunaire soit par altération des roches volcaniques sous forme de filons [19]. Théoriquement, les bentonites sont des roches constituées à plus de 50 % de smectite. De nombreux autres minéraux, témoins des roches originelles, néoformées ou transportées peuvent y être associés.

Les bentonites sont utilisées sous de nombreuses formes depuis le simple concassage du matériau jusqu'à son extraction et son traitement approfondi [20] [21] [22]. En particulier, les smectites contenues dans les bentonites confèrent des propriétés adsorbantes, d'étanchéité, de transport ou de liant largement utilisées dans la construction [23] [24], l'industrie chimique [25] [26] et l'ingénierie environnementale [27] [28].

Les bentonites sont utilisées sous différentes formes de la poudre ou granulés (associé à un géotextile), jusqu'à la suspension plus ou moins concentrée et plus ou moins traitée (fluides de forage). Les applications dans les domaines liés à l'agroalimentaire, la pharmacie et la cosmétiques nécessitent une connaissance accrue de la minéralogie de la bentonite étudiée. Leur utilisation est alors soumise à des règles strictes de composition. [16]

Les travaux souterrains : forage, excavation Lors d'un forage, la boue bentonitique est injectée sous pression à l'intérieur de la tige de forage puis remonte le long des parois du forage. Sur son passage, la boue va tout d'abord lubrifier la tête de forage puis englober les déblais afin de faciliter leur extraction et enfin déposer une pellicule stabilisatrice sur les parois. Lors d'un arrêt temporaire des travaux, la boue se gélifie et les déblais sont maintenus en suspension, évitant ainsi leur sédimentation. Lors de la reprise, la boue se fluidifie et les travaux reprennent. Si les pertes en circulation ne sont pas trop importantes, la boue utilisée est recyclée puis éventuellement réinjectée dans le forage. L'ajustement des propriétés de la boue peut, dans certaines conditions, permettre de colmater les pertes [14].

Les recherches sur la synthèse des argiles pourraient apporter de nouvelles solutions, mais leur élaboration reste difficile, coûteuse et dans des quantités souvent incompatibles avec leur utilisation industrielle.

CHAPITRE.IV.

MATERIAUX ET RESULTTATS

CHAPITRE.IV.

Introduction

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. Ce chapitre consiste à calculer et trouver les caractéristiques rhéologiques

Matériels utilisés

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

Les expériences de rhéologie, ont été réalisées à l'aide d'un rhéomètre rotatif (AR2000 TA Instruments). Le rhéomètre AR 2000 de TA instruments est un rhéomètre à contrainte contrôlée et a vitesse contrôlée capable de tester différents types d'échantillons de matière, en utilisant une large gamme de géométries de différents types et dimensions. Le rhéomètre est désigné pour remplir les conditions de mesure comme convenu par la signification du terme Rhéologie ; définie comme étant l'étude de la déformation et l'écoulement de la matière. Le système que nous avons utilisé est le système cône-plan pour les solutions de polymères et les solutions et fluides de polymères ; où l'échantillon est placé entre un cône de rayon défini de 60 mm et un angle de 2° et une surface plane perpendiculaire à l'axe du cône ; le Peltier Le choix du diamètre du cône et son angle sont en fonction des conditions expérimentales et de la viscosité du matériau.



Figure IV.I : Image du Rhéomètre AR 2000.

Méthode et caractérisation de matériaux pour le test de conformité

La bentonite qu'on a choisie est une argile locale de Maghnia (Algérie), souvent utilisée dans la composition des fluides de forage. Une caractérisation rhéologique des suspensions à base de cette argile a été effectuée et la mise en évidence de l'effet de l'ajout des polymères et des électrolytes sur le comportement rhéologique de cette bentonite. Ainsi, ce travail servira de faire un test de conformité de bentonite avant d'étudiés le comportement rhéologique a laide de rhéomètre.

L'analyse par microscope électronique à balayage a été effectuée au Laboratoire Géologie-CRD/Sonatrach avec un microscope électronique à balayage du type Philips XL-20. Cette analyse a permis de visualiser la structure en feuillet de l'échantillon de bentonite

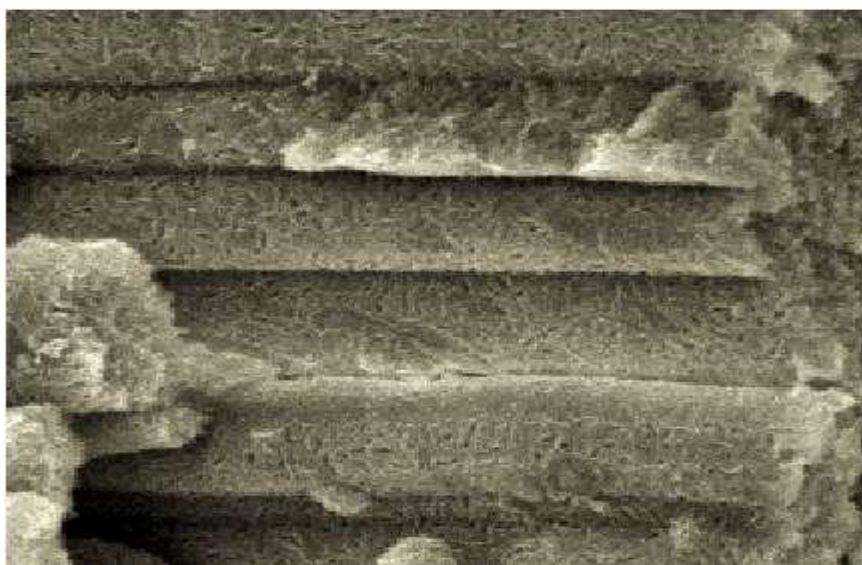


Figure IV.2 : Image microscopique de la bentonite de MAGHNA

Test de conformité.

Le test de conformité est effectué selon la norme API 13A : une suspension de 22.5 g de bentonite dissoute dans 350 ml d'eau distillée et vieillie durant 24 heures à $T=16^{\circ}$ C. Les essais exigés sont :

- Le volume du filtrat pendant 30 mn sous une pression de 7 bars.
- La viscosité plastique (VP).
- La yield point (YP).
- Le rapport (YP/VP).

La bentonite de forage sera considérée pour répondre à ces spécifications si un échantillon composé ne représentant pas plus de la production journalière répond aux exigences physiques requises sur le Tableau suivant

Tableau IV.1 : Propriétés physiques requis pour la bentonite (API 13A)

| | |
|---|--------------------------------|
| Lecture a 600 Rpm sur le viscosimètre | 30 minimum |
| Rapport Yield point/viscosité plastique | 3 maximum |
| Volume du filtrat | 15,0 cm ³ , maximum |
| Refus supérieur a 75 micromètres | 4,0 wt.percent maximum |
| Humidité | 10,0 wt.percent maximum |

lecture à 600 Rpm, viscosité plastique, yield point

1) Equipements

- Thermomètre : 32-220 ± 1F° (0-105 ± 0,5°C)
- Balance : précision de ± 0,01
- Mixeur
- Récipient
- Spatule
- Un rhéomètre
- Filtre presse
- Cylindre gradué 500 ± 5 cm³
- L'eau distillée

2) Procédure

- Préparer une suspension de bentonite, ajouter 22,5 ± 0,01 g d'argile a 350 ± 5 cm³ d'eau distillée durant toute en remuant dans le mixeur.
- Après l'agitation pendant 5 ± 0,5 minutes, enlever le récipient du mixeur et gratter les surfaces du récipient avec une spatule afin d'enlever toute particules qui peut rester sur les parois. Soyez sûr que toute la bentonite accrochée à la spatule est incorporée dans la suspension.
- Remettre le récipient dans le mixeur et continuer à remuer. Le récipient a besoin d'être enlevé du mixeur et nettoyer ces parois de toutes trace de bentonite après chaque 5 et 10 minutes. Le temps total d'agitation égalera 20 ± 1 minutes.
- Laisser vieillir la suspension de bentonite plus de 16 heures dans un récipient fermé. Enregistrer la température et la durée de stockage.
- Après vieillissement de la suspension de bentonite, agiter bien et verser la suspension dans le récipient du mixeur. Remuer la suspension dans le mixeur pendant 5 ± 0,5 minutes.
- Verser la suspension dans le récipient du viscosimètre à lecture directe, prendre les lectures a 600 et 300 Rpm, la prise de lecture doit se faire lorsque l'aiguille du viscosimètre donne une valeur constante a chaque vitesse atteinte. Les lectures doivent être prises a une température de la suspension de 77 ± 2°F (25 ± 1°C).

3) Calcul : Viscosité plastique et yield value

Viscosité plastique, $V_P = [\text{lecture } 600 \text{ rpm}] - [\text{lecture } 300 \text{ rpm}]$

Yield value, = $[\text{lecture } 300 \text{ rpm}] - \text{Viscosité plastique}$

Le rapport yield value/viscosité plastique = yield value /viscosité plastique

Enregistrer les valeurs calculées de la viscosité plastique, la yield value et du rapport yield value/viscosité plastique.

volume de filtrat

1) Procédure

- Recombiner toute la suspension préparée et testée précédemment, la remuer pendant $1 \text{ min} \pm 0,5$ minutes dans le mixeur. Ajuster la température de la suspension a $77 \pm 2 \text{ }^\circ\text{F}$ ($25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$).

- Verser la suspension dans une cellule de filtre presse. Avant l'ajout de la suspension, s'assurer que chaque coin de la cellule du filtre presse est sec et toute la garniture n'est pas gauche ou chaude. Ajouter la boue jusqu'à environ $\frac{1}{2}$ inch (13 mm) du haut de la cellule. Compléter l'assemblage de la cellule du filtre presse. Placer la cellule dans sa place et fermer la vanne de sécurité. Placer le récipient sous le tube de drain.

- Régler un chronomètre à $7,5 \pm 0,1$ minutes et le deuxième à $30 \pm 0,1$ minutes. Déclencher les deux chronomètres en même temps et ajuster la pression dans la cellule a $100 \pm 5 \text{ psi}$ ($690 \pm 35 \text{ kPa}$). Ces deux étapes doivent être complétées dans un temps record moins que 15 secondes. La pression sera fournie par de l'air comprimé, de l'Azote ou de l'Hélium.

- A $7,5 \pm 0,1$ minutes passées du premier chronomètre enlever le récipient et nettoyer tous liquide adhérent a la surface. Placer un cylindre gradué de 10 cm^3 sous le tube de vidange et continuer de collecter le filtrat à la fin des 30 minutes affichées par le deuxième chronomètre. Enlever le cylindre gradué et enregistrer le volume du filtrat collecté.

2) Calcul du volume du filtrat

Calculer le volume du filtrat de la suspension d'argile comme suit :

Volume du filtrat, $\text{cm}^3 = 2 \times V_c$

Où : $V_c =$ volume du filtrat collecté entre 7,5 et 30 minutes.

Humidité

1) Equipement

- Etuve de séchage réglée a $220 \pm 5 \text{ }^\circ\text{F}$ ($105 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Balance de précision de $\pm 0,01 \text{ g}$
- Creuset en porcelaine
- Spatule
- Dessiccateur

2) Procédure

- Peser $10 \pm 0,01$ g d'échantillon de bentonite dans un creuset taré
- Sécher l'échantillon dans l'étuve de séchage jusqu'à poids constant
- Refroidir dans un dessiccateur
- Repeser le creuset taré contenant la bentonite sec, enregistrer le poids

3) Calcul

$$H = 100.(W_1 - W_2)/W_1$$

Où : H = l'humidité, poids, pourcent

W₁ = le poids initial de l'échantillon, g

W₂ = le poids sec de l'échantillon, g

IV.2.1.4. les Résultats obtenus.

Tableau IV.2 : tableau récapitulatif des résultats obtenus.

| L600 | L300 | V _P | Y _P | V _P / Y _P | Humidité | Volume du filtrat |
|------|------|----------------|----------------|---------------------------------|----------|-------------------|
| 32 | 25 | 7 | 18 | 2.57 | 10 | 14 |

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la bentonite de Maghnia est conforme à la norme API 13A. Donc on peut faire tout les essais pour étudier le comportement rhéologique de notre fluide de forage (bentonite de Maghnia)

NOTA :

Notre travail se base surtout sur l'effet de la température et l'ajout de différents sels et l'alcalinité sur le comportement rhéologique d'une boue à base de bentonite.

Matériaux et appareillages :

La bentonite utilisée lors de notre expérimentation est une argile locale de Maghnia (Algérie), souvent utilisée dans la composition des fluides de forage.

Pour déterminer le comportement rhéologique des différentes suspensions de bentonite que nous étudierons, nous utilisons un viscosimètre « Thermo HAAKE VT 550 » (**Figure IV.3**). C'est un viscosimètre de système couette qui contrôle et caractérise des fluides en mode de rotation déterminant leur comportement rhéologique, par exemple détermination de la viscosité, de la contrainte seuil et de la thixotropie. La technique la plus utilisée avec ce type de viscosimètre, consiste à imposer une vitesse de cisaillement et calculer la contrainte de cisaillement et la viscosité apparente. Un régulateur de température de type (HAAKE DC 30) pour but de maintenir la température à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et cela pour tout nos essais. Nous avons choisi le système couette de notre viscosimètre. Tout les résultats sont reportés dans l'affichage numérique intégré le LED ou dans rheowin-logiciel facultatif de HAAKE.

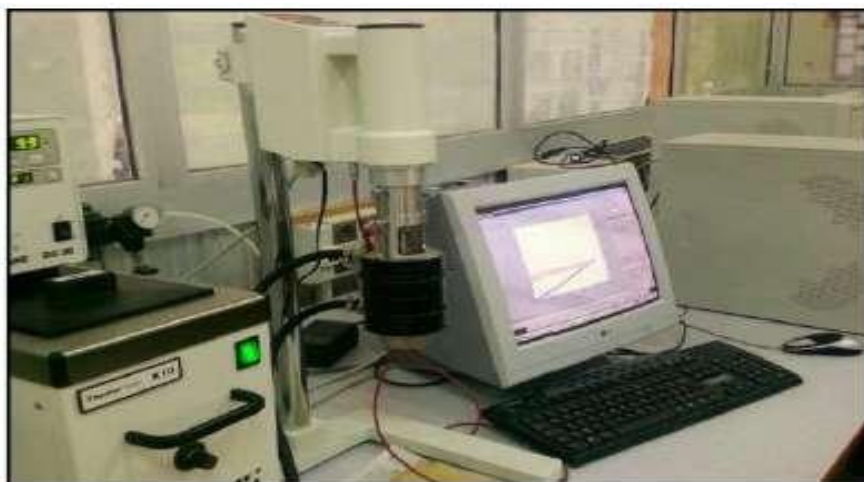


Figure IV.3 : Image de viscosimètre thermo HAAKE VT 550

Mode opératoire :

La préparation des suspensions est d'une importance considérable sur leur comportement rhéologique. Les échantillons étudiés sont préparés de la façon suivante :

La suspension de la bentonite : Une quantité d'eau distillée, préalablement déterminée, est soumise à une agitation magnétique. La bentonite, à la concentration voulue, est alors versée par petites quantités dans cette eau pour éviter la formation d'agrégats. Pour assurer une bonne homogénéisation, la suspension obtenue est soumise à une agitation magnétique continue pendant 24 heures.

L'effet de sel dans ce travail est effectué par le mode opératoire suivant : on ajoute la quantité voulue du sel à une quantité d'eau distillée soumis à une agitation magnétique, puis on ajoute la quantité voulue du mélange dans cette eau salée. Le mélange obtenu est agité magnétiquement pendant 24 heures.

Notons qu'avant chaque test rhéologique, le mélange est agité pendant 1 heure.

Etude rhéologique des suspensions de fluide de forage.

Dans le cadre des suspensions diluées, le calcul de la viscosité du fluide peut être réalisé à partir de l'équation d'Einstein pour des concentrations inférieures à 2%, et pour de plus grandes fractions volumiques en solides (< 10%) par l'équation de Batchelor. Pour des suspensions moyennement concentrées ou concentrées, beaucoup d'approches théoriques ont également été proposées. Cependant, pour de fortes concentrations en solide, un contact direct peut apparaître entre deux particules. Ceci est possible si les forces attractives sont suffisamment fortes par rapport aux forces répulsives.[29]

Etude rhéologique et physico-chimique de suspension bentonitique Pour étudier l'effet de la température sur le comportement rhéologique sur la suspension, nous avons représenté l'évolution de la viscosité apparente et de la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement pour une solution de bentonite (3%).

Effet de la température sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique

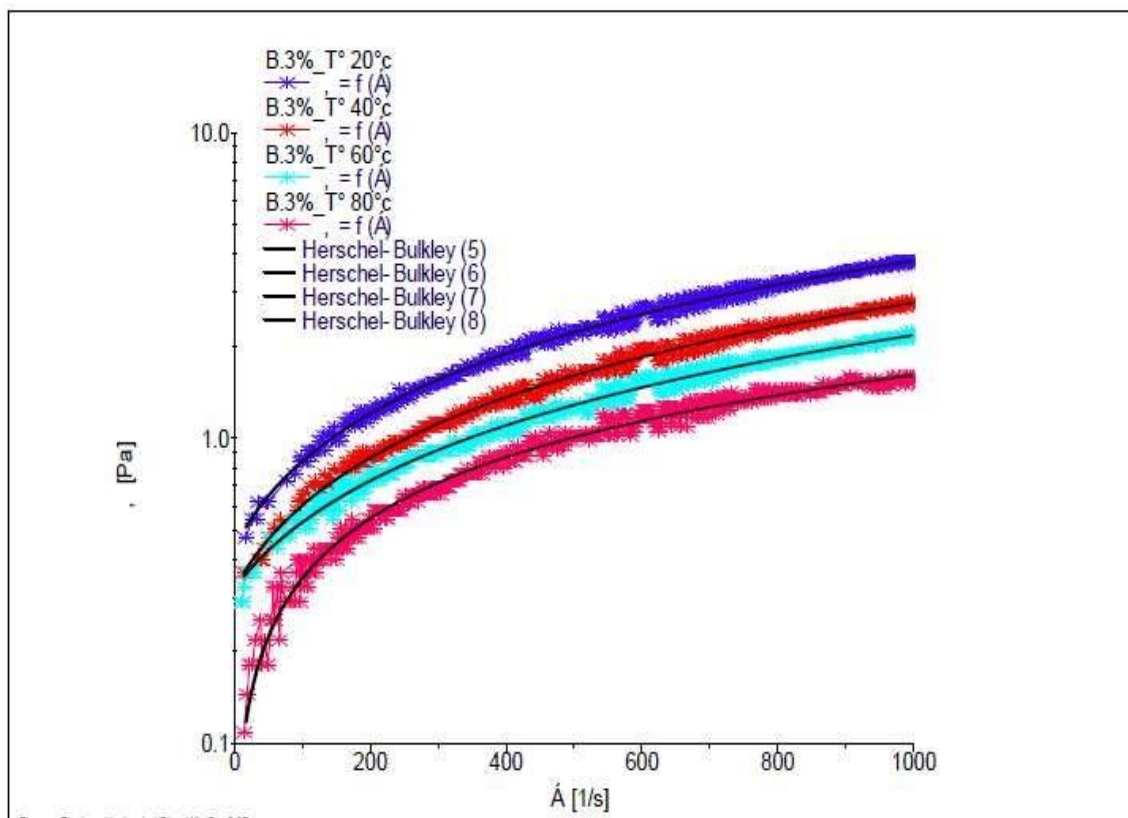


Figure. IV.4: Contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différentes températures.

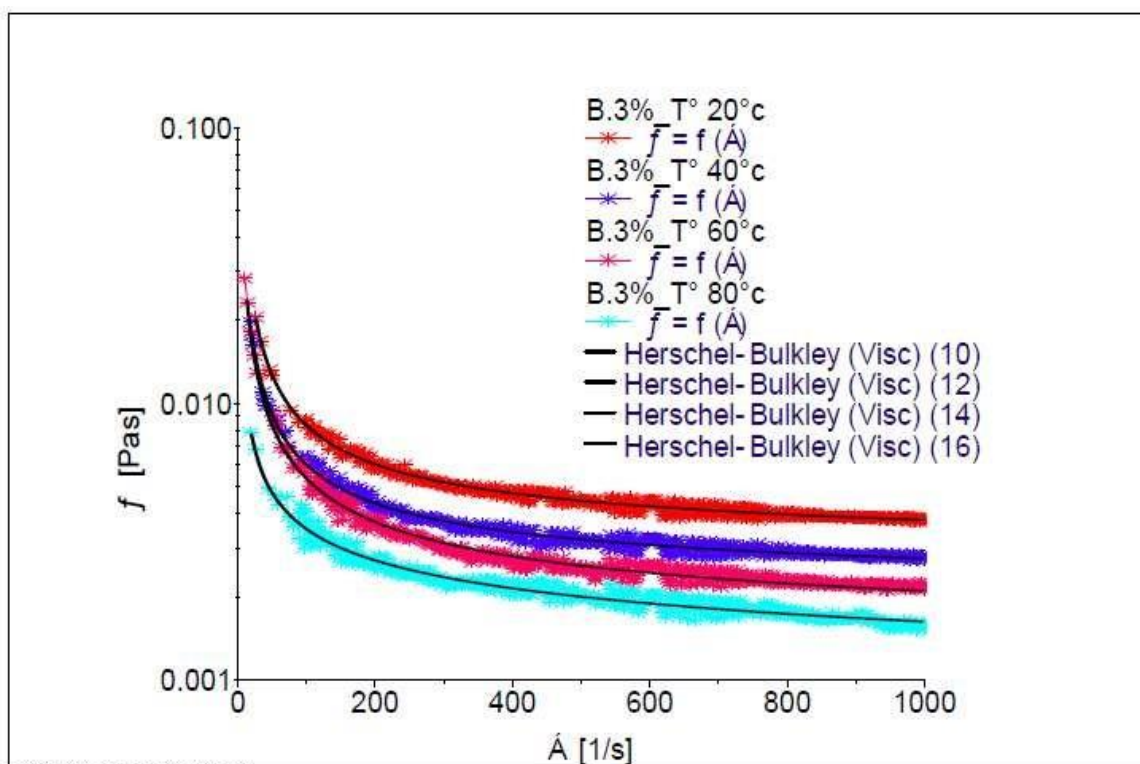


Fig. IV.5 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3% pour différentes températures.

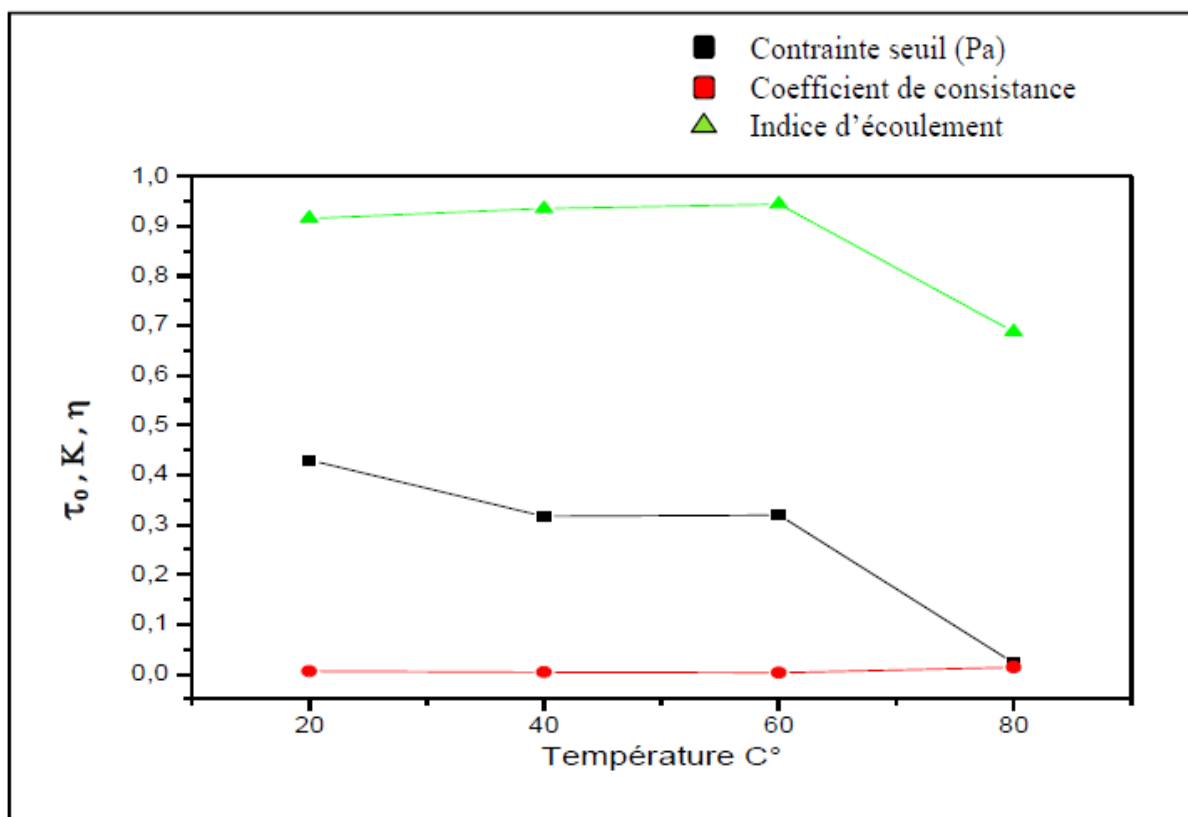


Figure IV.6: Contrainte seuil, coefficient de consistance et indice d'écoulement en fonction de la température d'une suspension de bentonite 3%.

✚ Interprétation :

La **Figure. IV.4** et la **Figure. IV.5** montrent que l'augmentation de la température diminue la viscosité apparente de la suspension bentonitique. Pour différentes températures par exemple, le passage de la température de 20 °c à 80 °c fait décroître la viscosité apparente d'environ un facteur de 2,18 lorsque le fluide subit un taux de cisaillement de 100 s-1.

Dans le cas des suspensions argileuses, la contrainte seuil est toujours liée à la formation d'un état du gel résultant des différents types d'associations entre particules. La contrainte seuil comme étant la contrainte minimale qu'il faut appliquer pour que la suspension commence à s'écouler d'une manière clairement observée.

Le gel dû aux interactions bord-face est renforcé par la diminution du pH qui accentue la différence de potentiel entre les bords et les faces des feuillets. Donc, le gel dû aux interactions face-face est renforcé par tous les paramètres favorisant la contraction des doubles couches électriques, augmentant ainsi l'épaisseur des particules et ce, tant que le nombre d'unités structurales est suffisant pour obtenir un réseau tridimensionnel.[30],[31]

Pour des températures plus élevées, on a observé une diminution de la viscosité (**FigureIV.6**) en fonction de l'augmentation de la température, et une diminution de la contrainte seuil (**Figure. IV.6**) (due à la disparition du maximum primaire) qui entraîne une diminution du nombre de liens entre particules.

Effet des sels sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique

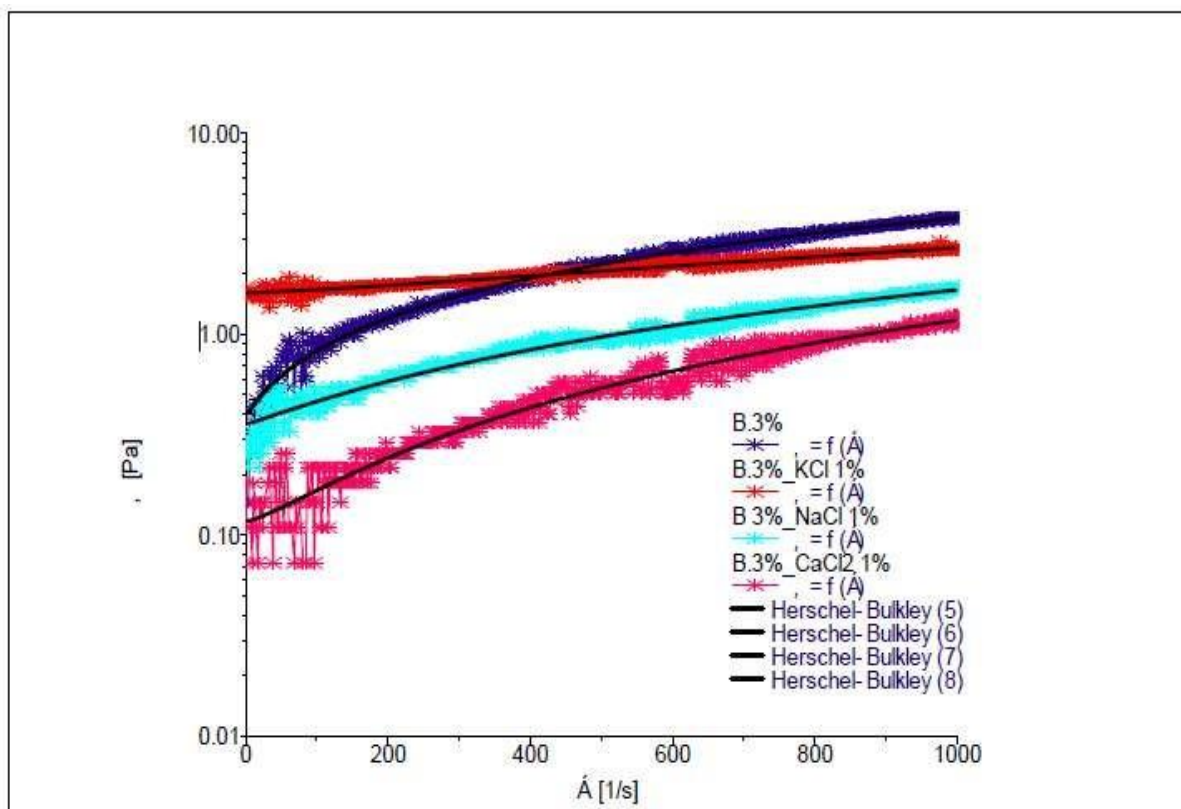


Figure IV.7 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d’une suspension de bentonite 3% pour différents types de sels.

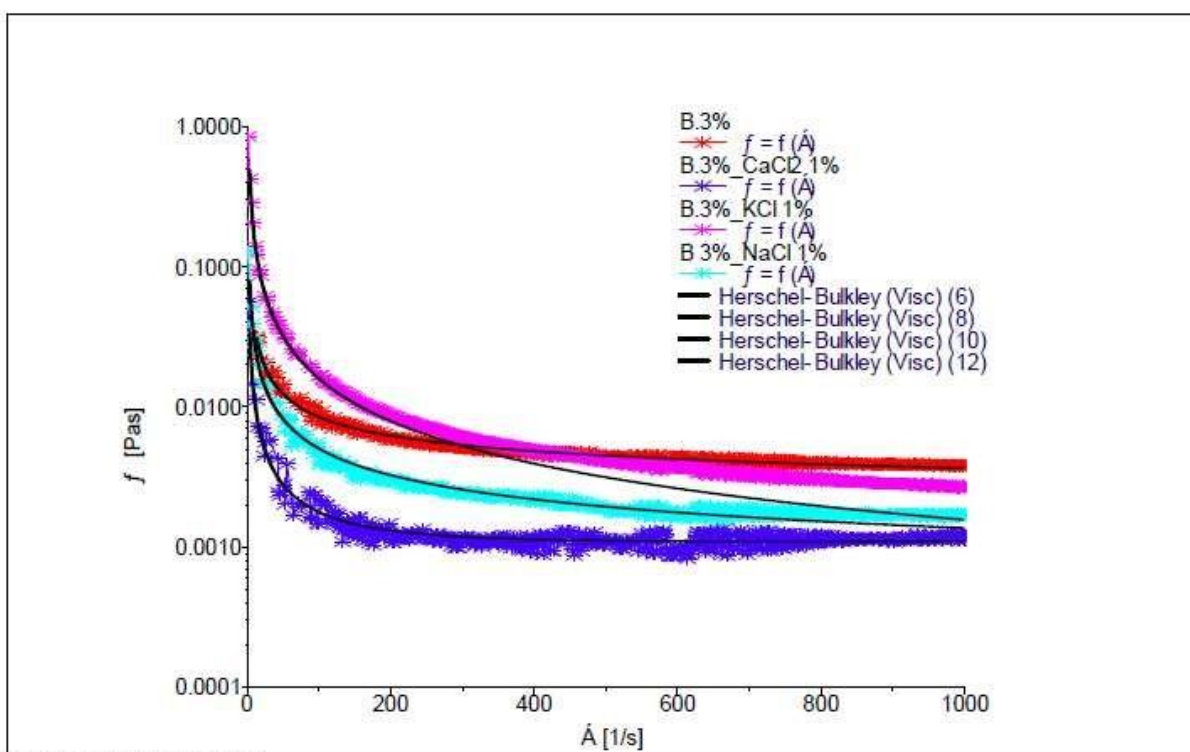


Figure IV.8 : Viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d’une suspension de bentonite 3% pour différents types de sels.

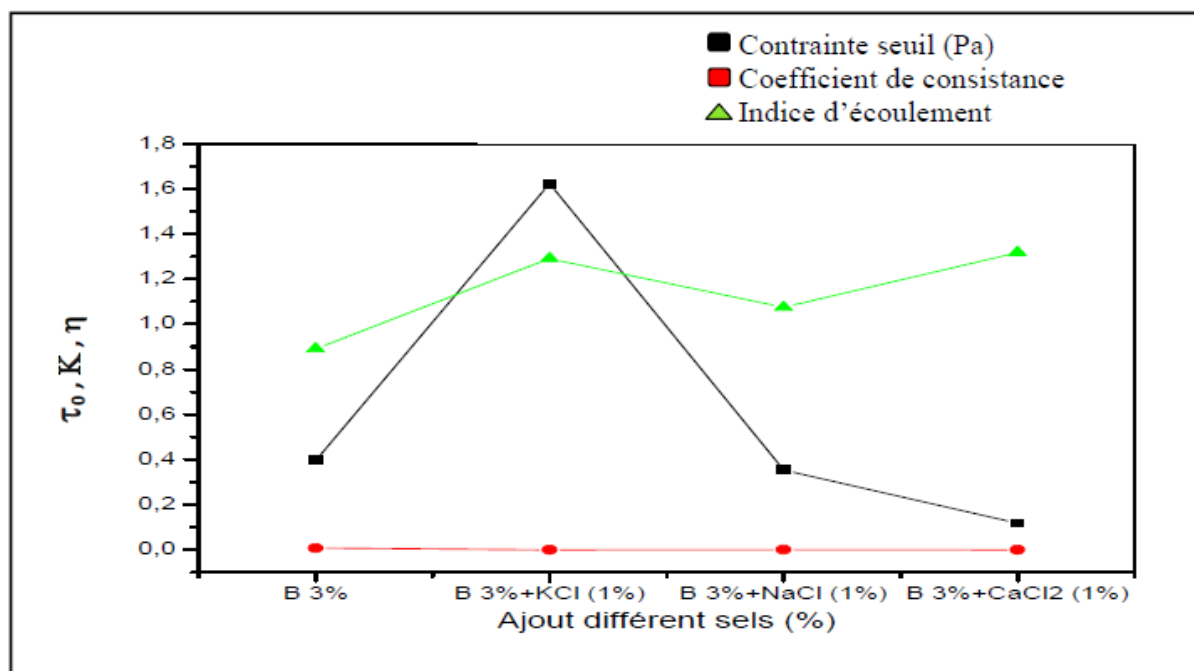


Figure IV.9 : Contrainte seuil, coefficient de consistance et indice d'écoulement en fonction de l'ajout de différents sels d'une suspension de bentonite 3%.

✚ Interprétation :

Nous présentons sur la **Figure IV.7** et le **Figure IV.8**, l'effet de l'ajout de KCl, NaCl et CaCl₂ sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite de référence.

Les figures montrent que la présence de KCl (1%), augmente la viscosité apparente et la contrainte seuil (bentonite 3%). Par contre, le NaCl (1%) et CaCl₂ (1%), diminuent la viscosité et la contrainte seuil du mélange.

En effet, d'après la littérature, on note que l'augmentation de la contrainte seuil est liée à l'évolution de l'agrégation des particules argileuses. Cette agrégation est causée par la diminution des forces répulsives due à la compression de la double couche électrique.

Lorsqu'on ajoute une concentration de KCl, l'agrégation se renforce dans le système et des paquets de particules rigides sont formés. Ce rapprochement progressif des particules argileuses favorise la réorganisation des particules en un réseau tridimensionnel où les associations de type face-face sont dominantes [31].

Lorsqu'on ajoute une concentration de NaCl ou CaCl₂, les particules se dispersent dans le système (défloculation), ce phénomène vient de la pénétration des cations Na⁺ et Ca²⁺ qui se localisent entre les feuillets de la bentonite provoquant la dispersion sous l'effet des forces répulsives.

Par conséquent, la viscosité et la contrainte seuil du mélange diminuent. On remarque aussi que le coefficient de consistance (K) reste presque constant dans les suspensions (**Figure IV.9**).

IV.2.1.3. Effet de l'alcalinité sur le comportement rhéologique de la suspension bentonitique

Certaines bentonites ont tendance à libérer des particules colloïdales qui ne peuvent être retirés de la dispersion, même par ultracentrifugation. Il est bien connu que le détachement de particules colloïdales de bentonites dépend de la quantité de Na^+ échangeable, le pH et de la force ionique. [32]

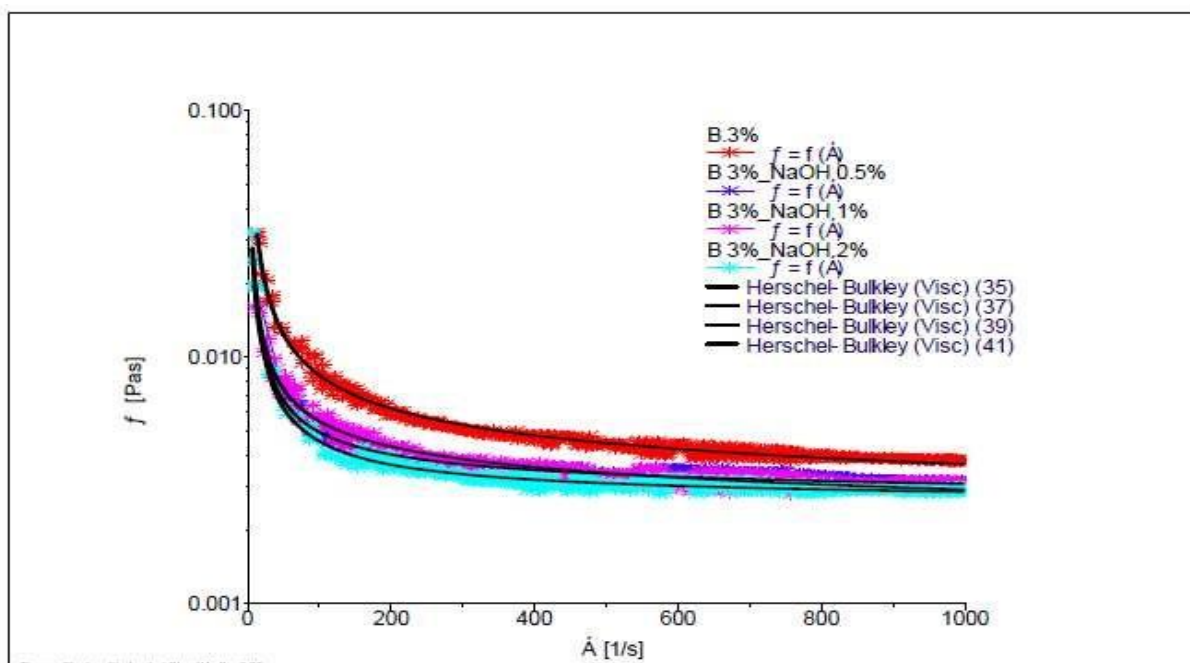


Figure IV.10 : Effet de l'alcalinité sur la viscosité apparente en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3%.

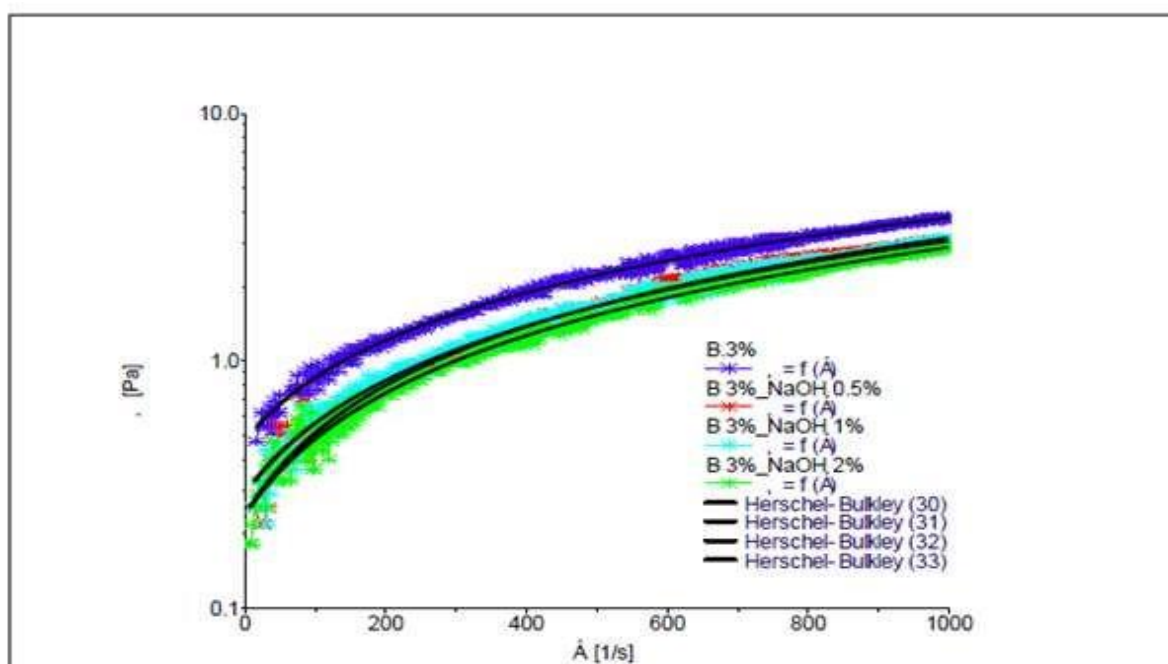
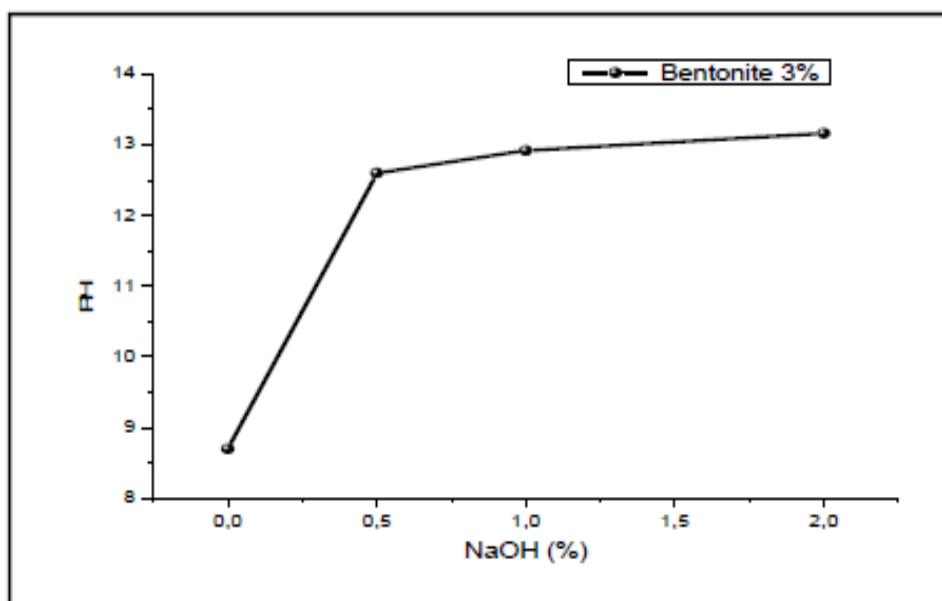
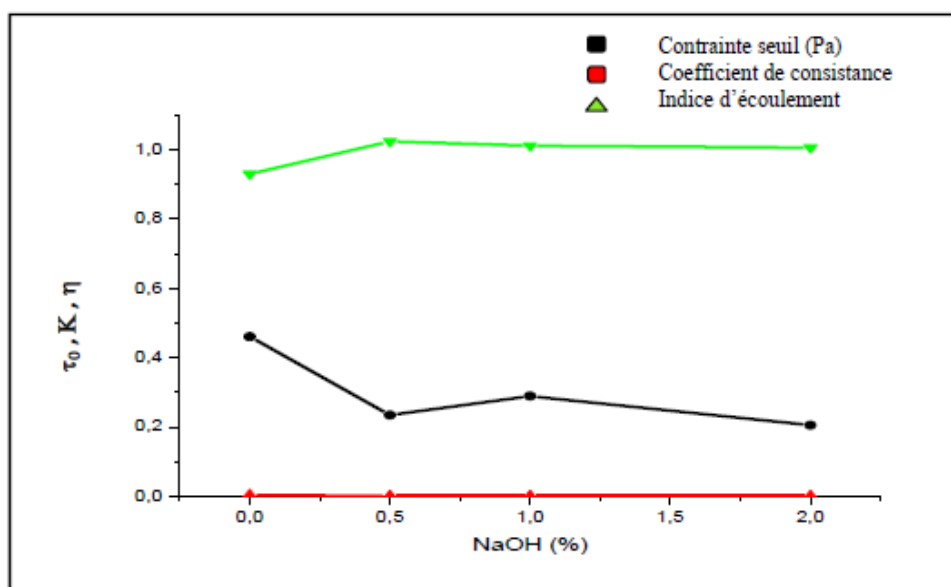


Figure IV.11: Effet de l'alcalinité sur la contrainte de cisaillement en fonction du taux de cisaillement d'une suspension de bentonite 3%.

Tableau IV.3 : Effet de l'ajout de NaOH sur le PH de la solution de bentonite 3%.

| T°= 27°c | NaOH % | PH |
|--------------|--------|-------|
| Bentonite 3% | 0 | 8,7 |
| Bentonite 3% | 0,5 | 12,6 |
| Bentonite 3% | 1 | 12,92 |
| Bentonite 3% | 2 | 13,16 |

**Figure IV.12 :** Effet de l'alcalinité sur le PH de la suspension de bentonite 3%.**Figure IV.13 :** Effet de l'alcalinité sur la contrainte de seuil, le coefficient de consistance et l'indice d'écoulement de la suspension de bentonite à 3%.

Interprétation

L'ajout de NaOH augmente la quantité de Na^+ dans la suspension de bentonite ce qui influe sur les particules colloïdales et le PH.

Dans la **Figure IV.10** et la **Figure IV.11**, on remarque que l'ajout de NaOH (0.5%, 1% et 2%) fait diminuer la viscosité apparente de la suspension de bentonite. Cette diminution est due à l'augmentation de la quantité de Na^+ dans la solution.

Dans la littérature S.Kaufhold et R.Dohrmann, ont montré que Na^+ et le pH sont liés, et la **Figure IV.12**, illustre l'effet de l'ajout de NaOH sur le PH de la solution de bentonite à 3%.

La modélisation des courbes d'écoulements a révélé que l'ajout de NaOH n'influe pas sur le modèle rhéologique de la bentonite qui reste toujours proche du modèle de Herschel Buckley.

Aussi, le coefficient de consistance (K) et l'indice d'écoulement (n) restent stables en fonction de la concentration de NaOH dans les suspensions (**Figure.IV.13**).

CONCLUSION GENERALE

La formulation des fluides de forage ainsi que la nouvelle technologie relative aux outils utilisés, ont beaucoup évolué afin d'apporter de meilleures solutions aux problèmes soulevés et assurer une amélioration continue des opérations de forage.

Plusieurs travaux ont montré, qu'au cours du forage, la stabilité des parois du puits est intimement liée à plusieurs phénomènes incluant les interactions fluides-roches le comportement anormal des formations géologiques traversées ainsi que certaines pratiques inappropriées lors du forage.

L'objectif principal de ce travail d'initiation à la recherche, était d'aboutir à une caractérisation des propriétés rhéologiques et de contribuer à comprendre la relation entre les propriétés rhéologiques mesurées et la géologie de site. Il porte sur une étude du comportement rhéologique en précisant l'effet de chaque contaminant (Température, sels et alcalinité) sur le comportement rhéologique de ces suspensions.

Notre mémoire traite dans une première partie, une recherche bibliographique assez modeste. Cette synthèse bibliographique porte sur les boues de forage et la rhéologie des boues de forage, tout en mettant l'accent sur la microstructure des argiles.

Dans la deuxième partie, qui porte sur une expérimentation, a été entamée par un test de conformité de notre échantillon de bentonite pour vérifier la conformité avec la norme API 13A.

Enfin, une étude rhéologique sur la suspension de la bentonite a été effectuée à la fin de notre travail de recherche, en vue de comprendre le comportement rhéologique de la bentonite à une concentration de 3%, sous l'effet de température, des sels et de l'alcalinité. Ces trois facteurs ont montré que l'augmentation de température diminue la viscosité apparente et la contrainte seuil de la suspension bentonitique, la présence des sels (KCl, NaCl et CaCl₂) de concentration (1%) dans la suspension, a montré que KCl (1%) augmente la viscosité apparente de (bentonite 3%), tandis que NaCl et CaCl₂ diminuent la viscosité de même suspension (bentonite 3%).

Il a été établi que l'ajout du KCl a provoqué l'agrégation du système colloïdal, et l'ajout du NaCl et CaCl₂ ont produit un milieu plus dispersé. Le troisième facteur (l'alcalinité) a montré que la concentration de NaOH (0.5%, 1% et 2%) fait diminuer la viscosité apparente de la suspension de bentonite en fonction de la quantité de Na⁺ dans la solution.

La modélisation des courbes d'écoulements de la suspension bentonitique a révélé que l'effet de trois facteurs déjà cités n'a pas d'influence sur le modèle rhéologique de la bentonite qui reste toujours proche au modèle de Herschel Bulkley.

Ainsi, suite à notre travail de recherche d'une manière générale, nous pouvons retenir, que les fluides de forage sont des éléments primordiaux dans le processus de forage pétrolier.

On notera que l'étude détaillée de ces systèmes ouvre des perspectives pour la mise au point de formulations de boues destinées à être utilisées dans des zones appropriées dans des recherches ultérieures.

Références Bibliographiques

- [1] M^{me} BOUSSAK H. "Caractérisation rhéologique d'une substance polymérique. cas une suspension bentonitique", M. Magister. Boumerdès (2008).
- [2] Landriot, G : "Fluide de forage", édition Technip, France (1968).
- [3] ENSPM -Formation Industrie "LES FLUIDES DE FORAGE"- IFP Training, France (2006).
- [4] Peysson, Y. "Solid/Liquid Dispersions in Drilling and Production". Oil and Gas Science and Technology -IFP (2004).
- [5] Nguyen J,P "Le forage, Technique d'exploitation pétrolière", Technip, France (1993).
- [6] Ryaen, C., G. et Chillingar, V. "Drilling fluids : state of the art, Journal of petroleum science and engineering" (1996).
- [7] ECONOMIDES, M.J et al, "Petroleum well construction", édition John wiley & sons (1988).
- [8] M^{me} BOUSSAK H. "Caractérisation rhéologique d'une substance polymérique. cas une suspension bentonitique", M. Magister. Boumerdes (2008).
- [9] Herzhaft, B. "Les fluides de forage : un exemple de fluides complexes industriels", 36^{ème} colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie, Marne-la-Vallée France, (2001).
- [10] M^{me} AKMOUCI-T S, "contribution à l'étude des boues de forage : isolement et évaluation de la capacité de quelque souches microbiennes à dégrader le gasoil", Mémoire de Magister, Boumerdes (2009).
- [11] FOURAR K, "Amélioration des propriétés rhéologiques des fluides de forage à base de biopolymères : application aux puits horizontaux", Mémoire de Magister, Boumerdès (2007).
- [12] CD manual of drilling fluids, MI-SWACO
- [13] HOWARD A. BARNES, "A handbook of elementary rheology", University of Wales, 2000.
- [14] N. Kherfella and S. Bekkour, K. et Benhadid. Utilisation de systèmes argileux pour le colmatage des pertes de boues de forage en circulation. Rhéologie, 7 : 48–54, 2005.
- [15] M. Khodja et M. Khodja-Saber ; Etude comparative du pouvoir inhibiteur des fluides de forage à base d'eau sur le champ de Hassi Messaoud
- [16] : PAUMIER Sandrine, Facteurs déterminant l'organisation et la rhéologie du système argile – eau pour des suspensions de smectites. Thèse, Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers , France 2006.
- [17] : Z-G. Shen *et al.* Dispersion of nanosized aqueous suspensions of barium titanate with ammonium polyacrylate, Journal of Colloid and Interface Science, 275, 158-164 (2004).
- [18] : M^{me} BOUSSAK Hassina ; Caractérisation rhéologique d'une substance polymérique. Cas d'une suspension bentonitique. Thèse Magistère (2008).

Références Bibliographiques

- [19] M. Ddani, A. Meunier, M. Zahraoui, D. Beaufort, M. El Wartiti, C. Fontaine, B. Boukili, and B. El Mahi. Clay mineralogy and chemical composition of bentonites from the Gourougou volcanic massif (northeast Morocco). *Clays and Clay Minerals*, 53 : 7250–267, 2005.
- [20] H-H. Murray. Clays in industry. In Elsevier, editor, *A Clay Odyssey – 12th International Clay Conference*. Bahía Blanca, Argentina, 2001.
- [21] F. Bergaya and G. Lagaly. Surface modification of clay minerals. *Applied clay science*,
- [22] A. Meunier. *Argiles*. Géosciences. Editions Scientifiques Gb, 434 p., 2003.
- [23] A. Besq, C. Malfoy, A. Pantet, P. Monnet, and D. Righi. Physicochemical characterization and flow properties of some bentonite muds. *Applied Clay Science*, 23 : 275–286, 2003.
- [24] C. Malfoy, M. Ddani, A. Pantet, and P. Monnet. Les bentonites : transfert et échanges. Un matériau aux propriétés évolutives et variables. In *Actes du Colloque National sur les propriétés de transfert dans les matériaux, TRANSFERT 2006*, page 15 p. Lille, 2006.
- [25] T. Permien and G. Lagaly. The rheological and colloidal properties of bentonite dispersions in the presence of organic compounds. V. Bentonite and sodium montmorillonite and surfactants. *Clays and Clay Minerals*, 43 : 229–236, 1995.
- [26] G. Lagaly and S. Ziesmer. Colloid chemistry of clay minerals : the coagulation of montmorillonite dispersions. *Colloid and Interface Science*, 100–102 : 105–128, 2003.
- [27] P. Coussot. Rhéologie des boues et laves torrentielles. Etude de dispersions et suspensions concentrées. PhD thesis, Institut national polytechnique de Grenoble, Etudes du CEMAGREF, série Montagne n° 5, 1992. 415 p.
- [28] G. Didier and L. Comeaga. Hydratation, gonflement, conductivité hydraulique. Influence de produits chimiques. In *Actes du congrès Géo–Bento, étanchéité par géosynthétiques bentonitiques : état de l’art*, pages 74–95. Paris, 1998.