



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et géologie

# *Memoire de Fin d'Etudes*

**En vue de l'obtention du Diplôme de Master**

**Filière : Génie Minier**

**Option : Valorisation des Ressources Minérales**

*Présenté par*

**Mr DADDA Nasreddine**

**M<sup>lle</sup> BENAMARA Nour El Houda**

**Thème**

***Valorisation de la bentonite Algérienne dans la  
formulation de boue de forage à base d'huile  
(Cas de Maghnia)***

Soutenu le 27/06/2018 devant le jury composé de:

Présidente  
Promotrice  
Examinatrice

Mme S. BOUNAB  
Mme K. KICHER  
Mme N. BOUZIDI

MCB  
MAB  
MCA

U.A.M.Bejaia  
U.A.M.Bejaia  
U.A.M.Bejaia

***Promotion : 2017-2018***

***« Ce que les autres ont réussi, on peut toujours le réussir »***

*Antoine De Saint-Exupéry*

## *Remerciements*

*Nos remerciements s'adressent d'abord à ALLAH (الله) le tout puissant pour les aides qui nous sont offertes pour réaliser ce travail et à son prophète MOHAMMED (paix et salut sur lui).*

*Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, consciente, d'un grand nombre de personnes. Nous souhaitons ici les remercier.*

*Nous voudrions présenter nos chaleureux remerciements à notre encadreur M<sup>me</sup> KICHER Kahina que nous avons pu tout au long de nos recherches bénéficier de sa compétence, et lui témoigner notre gratitude pour sa patience, sa confiance et son soutien ainsi que ses précieux conseils qu'elle nous a prodigué afin de mener notre travail à bon port.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury (la présidente M<sup>me</sup> BOUNEB Samia et l'examinatrice M<sup>me</sup> BOUZIDI Nedjima) pour l'intérêt qu'elles ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*De même nous remercions vivement nos parents et toute personne qui a contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail*

*Nous dirigeons aussi nos sincères reconnaissances à l'ENTP de Hassi Messaoud « OVERGLA » et plus précisément aux personnels du chantier TP 196, aux personnels du société AVA , ENOF et d'université de Boumerdes pour leurs accueils.*

*Enfin, nous tenons également à remercier aussi le personnel de notre département ainsi nos enseignants.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude*

- ❖ *À l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi mon père.*

*Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon bien être.*

*Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consenti pour mon éducation et ma formation*

- ❖ *À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; à celle qui représente pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, à toi chère maman.*

*Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.*

*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.*

*Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

- ❖ *À la mémoire de très chère grand-mère.*
- ❖ *Mes chères sœurs Khaldia, Nabila et Nadjia.*
- ❖ *Mon unique cher frère Abdelmalek,*
- ❖ *Ma tante Nabila et ma très chère cousine Souad.*
- ❖ *Toute la famille BENAMARA et FADHEL.*
- ❖ *Mes très chères sœurs Asma et Biba, votre amitié m'est plus précieuse que de l'or*
- ❖ *Mes chères copines Ines et Amira, Boudjelal en souvenir des moments agréables que nous avons passés ensemble*
- ❖ *Mon binôme Nacereddine.*
- ❖ *Tous mes amis(es).*

*NourElHouda*

# *Dédicaces*

*A mes très chers, respectueux et magnifiques parents ;*

*A mes chères sœurs Chacha et Zineb ;*

*A mon chère neveu Salim ;*

*A ma chère fiancée Hadjer ;*

*A tous les membres de ma famille ;*

*A ma binôme Nour El Houda ;*

*A mes chères amis et collègues ;*

*Tout personnes qui m'ont encouragé ou aidé au long de mes études ;*

*Nasreddine* 

---

## Liste des Abréviations

---

Bn : Bentonite ;

Bn-Na : Bentonite Sodique ;

C : Concentration de l'espèce absorbante (en mol. m<sup>-3</sup>) ;

CEC : Capacité d'Echange Cationique ;

d<sub>hkl</sub> : Distance entre 2 plans d'indice de Miller hkl (Å) ;

DRX : Diffraction par Rayons X ;

DTAB : DodecylTrimethyl Ammonium Bromide ;

ENOF : Entreprise Nationale des Substances Utiles et Matériaux non Ferreux ;

HT/HP : Haut température/ Haut pression ;

IRTF : Infra-Rouge à Transformée de Fourier ;

L : Longueur du trajet optique (en m) ;

OBM : Oil Based Mud ;

PAF : Perte Au Feu ;

PE : Primary Emulsifier ;

SBM : Synthetic Based Muds ;

SE : Second Emulsifier ;

Va : Viscosité Apparente ;

Vp : Viscosité Plastique ;

WBM : Water Based Mud ;

YP : Yield Point ou Value ;

$\zeta$  : Coefficient d'extinction molaire de l'espèce absorbée (en  $\text{mol}^{-1}.\text{m}^2$ ) ;

$\theta$  : L'angle de Bragg (rad) ;

$\lambda$  : Longueur d'onde du faisceau de rayons X utilisé ( $\text{\AA}$ ).

lb : La livre est une unité de masse fait 0,45359237 kilogramme

ft : Un pied fait 0,3048 mètre

---

## Liste des figures

---

### Chapitre I : Les fluides de forage

Figure I.1 : Schéma du circuit boues de forage .....	3
Figure I.2 : Les types des fluides de forage.....	7
Figure I.3 : Cycle du fluide sur le site de forage .....	14

### Chapitre II : Généralités sur les argiles

Figure II.1 : Eléments structuraux : les tétraèdres et les octaèdres .....	19
Figure II.2 : Structure interne d'un feuillet de phyllosilicate 2:1 .....	19
Figure II.3 : Structure de la montmorillonite .....	22
Figure II.4 : Microstructure de la montmorillonite, selon Lepluart .....	23
Figure II.5 : Schéma montrant la structure de la montmorillonite .....	25

### Chapitre III : Matériels et méthodes

Figure III.1 : Les différentes étapes du procédé de traitement organophile .....	36
Figure III.2 : Produit fini (traité) .....	36
Figure III.3 : Les étapes de préparation de la bentonite organophile à partir de la bentonite naturelle.....	37
Figure III.4 : Les étapes de préparation de la bentonite organophile à partir de la bentonite activée .....	38
Figure III.5 : Agitateur de la boue .....	45
Figure III.6 : Densimètre .....	46



## Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV.1 : Diffractogramme DRX de la bentonite naturelle <b>Bn.1</b> .....	47
Figure IV.2 : Diffractogramme DRX de la bentonite activée <b>Bn.2</b> .....	48
Figure IV.3 : Diffractogramme DRX de la bentonite purifié <b>Bn.1.p</b> .....	49
Figure IV.4 : Spectres infra rouge de bentonites naturelle et purifié .....	50
Figure IV.5 : Diffractogramme DRX de la bentonite sodique <b>Bn-Na</b> .....	51
Figure IV.6 : Diffractogramme DRX de la bentonite organophile <b>Bn.1.0,5CEC</b> .....	53
Figure IV.7 : Diffractogramme DRX de la bentonite organophile <b>Bn.1.1CEC</b> .....	53
Figure IV.8 : Diffractogramme DRX de la bentonite organophile <b>Bn.1.2CEC</b> .....	54
Figure IV.9 : Diffractogramme DRX de la bentonite organophile <b>Bn.2.1CEC</b> .....	55
Figure IV.10 : Diffractogramme DRX de la bentonite organophile <b>Bn.2.0,5CEC</b> .....	55
Figure IV.11 : Diffractogramme DRX de la bentonite organophile <b>Bn.2.2CEC</b> .....	56
Figure IV.12 : Orientation des ions de DTAB dans l'espace interfoliaire de montmorillonite .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure IV.13 : Variation des paramètres rhéologiques des différents échantillons des boues formulées .....	59
Figure IV.14 : Variation de Gel 10s et Gel 10 min des différents échantillons .....	60
Figure IV.15 : Valeurs de densité mesurée des différent échantillons .....	60

---

## Liste des tableaux

---

### Chapitre I : Les fluides de forage

Tableau I.1 : Additifs utilisés dans la formulation des fluides de forage .....	15
---	----

### Chapitre II : Généralités sur les argiles

Tableau II.1 : Composition minéralogique de la bentonite naturelle .....	32
--	----

Tableau II.2 : Composition chimique de la bentonite de maghnia.....	33
---	----

### Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau IV.1 : Distances réticulaire de la bentonite sodique et organophile à différentes concentrations de DTAB .....	57
--	----

Tableau IV.2 : Lectures sur rhéomètre Fann 35 des différents échantillons .....	58
---	----

Tableau IV.3 : Caractéristiques rhéologiques des différents échantillons .....	59
--	----

---

## Table de Matière

---

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

### Partie Bibliographique

#### Chapitre I : Les fluides de forage

<b>Introduction.....</b>	<b>2</b>
<b>I.1 Définition.....</b>	<b>2</b>
<b>I.2 Principales actions des boues de forage.....</b>	<b>3</b>
<b>I.3 Types des fluides de forage.....</b>	<b>6</b>
I.3.1 Boues à base d'eau .....	7
I.3.2 Boues à base d'huile .....	8
I.3.3 Fluides de forage gazeux.....	9
<b>I.4 Caractéristiques et propriétés physiques des fluides de forage.....</b>	<b>9</b>
I.4.1 Densité .....	10
I.4.2 Rhéologie.....	11
I.4.3 Filtration .....	13
<b>I.5 Cycle de la boue de forage.....</b>	<b>14</b>
<b>I.6 Formulation des fluides de forage.....</b>	<b>14</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>16</b>

#### Chapitre II : Généralités sur les argiles

<b>Introduction.....</b>	<b>17</b>
<b>II.1 Généralité .....</b>	<b>17</b>

II.1.1 Structure des minéraux argileux.....	18
II.1.2 Types des minéraux argileux .....	20
<b>II.2. Les argiles montmorillonitiques (bentonites).....</b>	<b>20</b>
II.2.1 Mode de formation .....	21
II.2.2 Gisements de bentonite .....	21
II.2.3 Structure de la bentonite.....	21
II.2.4 Microstructure de la montmorillonite .....	23
II.2.5 Formule chimique de la montmorillonite : .....	24
II.2.6 Caractéristiques physiques des montmorillonites .....	25
II.2.6.1 Capacité d'échange cationique (CEC).....	25
II.2.6.2 La surface spécifique .....	26
II.2.6.3 Propriétés de gonflement et le rôle du cation compensateur .....	26
II.2.7 Les différents types de bentonite .....	27
II.2.7.1 Bentonites naturelles .....	27
II.2.7.2 Bentonites activées.....	27
II.2.7.3 Bentonite organophile .....	27
II.2.8 Champs d'application des bentonites .....	28
<b>II.3 Les argiles dans les fluides de forage.....</b>	<b>29</b>
<b>II.4 L'argile organophile comme viscosifiant dans les boues de forage à base d'huile .....</b>	<b>30</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>31</b>

## Partie Expérimentale

### Chapitre III : Matériels et méthodes

<b>Introduction.....</b>	<b>32</b>
--------------------------	-----------

<b>III.1 Préparation de la bentonite organophile .....</b>	<b>32</b>
<b>III.1.1 Matières premières .....</b>	<b>32</b>
<b>III.1.2 Réactifs et matériels.....</b>	<b>33</b>
<b>III.1.3 Purification de la bentonite .....</b>	<b>34</b>
<b>III.1.4 Préparation de la bentonite sodique.....</b>	<b>34</b>
<b>III.1.5 Modification organophile de la bentonite .....</b>	<b>35</b>
<b>III.1.6 Schémas récapitulatifs des procédures .....</b>	<b>37</b>
III.1.6.1 Préparation d'une bentonite organophile à partir de la bentonite naturelle .....	37
III.1.6.2 Préparation d'une bentonite organophile à partir de la bentonite activée .....	38
<b>III.1.7 Techniques de caractérisation .....</b>	<b>38</b>
III.1.7.1 Diffraction par rayons X (DRX) .....	38
III.1.7.2 Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) .....	39
<b>III.2 Formulation de la boue à base d'huile.....</b>	<b>39</b>
<b>III.2.1 Matières premières .....</b>	<b>40</b>
<b>III.2.2 Formulation de la boue.....</b>	<b>43</b>
<b>III.2.3 Matériels utilisées.....</b>	<b>44</b>
III.2.3.1 Mesure de la viscosité avec le viscosimètre FANN 35 .....	44
III.2.3.2 Agitateur à boue .....	45
III.2.3.3 Densimètre.....	46
<b>Conclusion .....</b>	<b>46</b>

## **Chapitre IV : Résultats et discussions**

<b>Introduction.....</b>	<b>47</b>
<b>IV.1 Caractérisation de la matière première .....</b>	<b>47</b>
<b>IV.1.1 Bentonite naturelle .....</b>	<b>47</b>

IV.1.2 Bentonite activée.....	48
<b>IV.2 Caractérisation de la bentonite purifiée .....</b>	<b>49</b>
IV.2.1 Caractérisation par DRX .....	49
IV.2.2 Caractérisation par FTIR.....	50
Commentaire.....	51
<b>IV.3 Caractérisation de la bentonite sodique.....</b>	<b>51</b>
IV.3.1 Caractérisation par DRX .....	51
Commentaire.....	52
<b>IV.4 Caractérisation de la bentonite organophile .....</b>	<b>52</b>
IV.4.1 Caractérisation par DRX .....	52
Commentaire.....	56
<b>IV.5 Evaluation des caractérisations rhéologiques des boues formulées .....</b>	<b>58</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>61</b>
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>62</b>
<b>Références Bibliographiques .....</b>	<b>64</b>

## **Introduction Générale**

Le succès du forage d'un puits de pétrole ou de gaz dépend essentiellement du bon choix de la qualité des fluides de forage utilisés. L'optimisation d'une bonne formulation de ce dernier permet de réduire d'une manière significative le coût global de forage. A cet effet la boue de forage est choisie en fonction de la nature des formations traversées, de l'architecture du puits, des objectifs de sondage et des contraintes environnementales et économiques (KHODJA.M ; 2008).

Plusieurs types de fluides peuvent être utilisés lors d'un forage. Le choix d'un type par rapport à un autre dépend essentiellement de la formation traversée. A cet effet on peut utiliser des fluides à base d'eau, à base d'huile ou bien gazeux. L'industrie pétrolière fait appel à des matières naturelles et synthétiques dans la formulation des fluides de forage afin d'assurer le bon déroulement des opérations de forage ; notamment le contrôle des propriétés physico-chimique et rhéologique des fluides à savoir la contrainte seuil (yield point), la viscosité apparente et plastique, le gel ( $10''/10'$ ) et la thixotropie.

Parmi les substances les plus utilisées dans le contrôle rhéologique lors de la circulation de la boue de forage pétrolier on cite la bentonite. Cette dernière qui est un minéral argileux, est constituée essentiellement de montmorillonite. Elle se caractérise par trois propriétés principales : leur forme et leur surface spécifique, leur capacité d'adsorption et de gonflement, et leurs multiples possibilités d'échanges cationiques.

Le travail que nous avons entrepris, consiste essentiellement à valoriser la bentonite Algérienne en suivant des procédés bien déterminés (une activation et un traitement organophile) afin d'obtenir une argile organophile susceptible d'être utilisée dans la formulation de boue de forage.

Ce travail est subdivisé en deux grandes parties :

- Une partie théorique : dans laquelle nous avons évoqué des généralités sur les boues de forage et des généralités sur les argiles, la bentonite et la montmorillonite ;
- Une partie pratique : dans laquelle nous avons exposé notre travail au laboratoire, les résultats obtenus et leurs interprétations.

On termine avec une conclusion générale.

## **Introduction**

Les boues de forage sont des fluides utilisés pour le creusement des opérations de génie civil, de construction et de forage de pétrole et de gaz. Leur principale mission est de permettre un forage plus sûr et rapide. Elles sont en général utilisées comme fluides à base aqueuse ou huileuse.

Le succès du forage d'un puits de pétrole ou de gaz dépend essentiellement sur le bon choix de la qualité des fluides de forage utilisé. L'optimisation d'une bonne formulation d'une boue de forage permet de réduire d'une manière significative le coût global de forage d'un puits. A cet effet, la boue de forage est choisie en fonction de la nature des formations, de l'architecture du puits, des objectifs du sondage et des contraintes environnementales et économiques.

Dans ce chapitre on va définir les fluides de forage, donner leurs rôles et caractéristiques basés sur des références bibliographiques.

### **I.1 Définition**

En 1979, l'American Petroleum Institute (API) définit le fluide de forage comme un fluide en circulation continue durant toute la durée du forage, aussi bien dans le sondage qu'en surface. 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, tensioactifs, déblais, ciments, ...).

Le fluide de forage est préparé dans des bacs à boues, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil d'où il remonte dans l'annulaire, chargé de déblais formés au front de taille (Figure I.1). 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, puis il est ensuite réutilisé (KHODJA.M ; 2008).



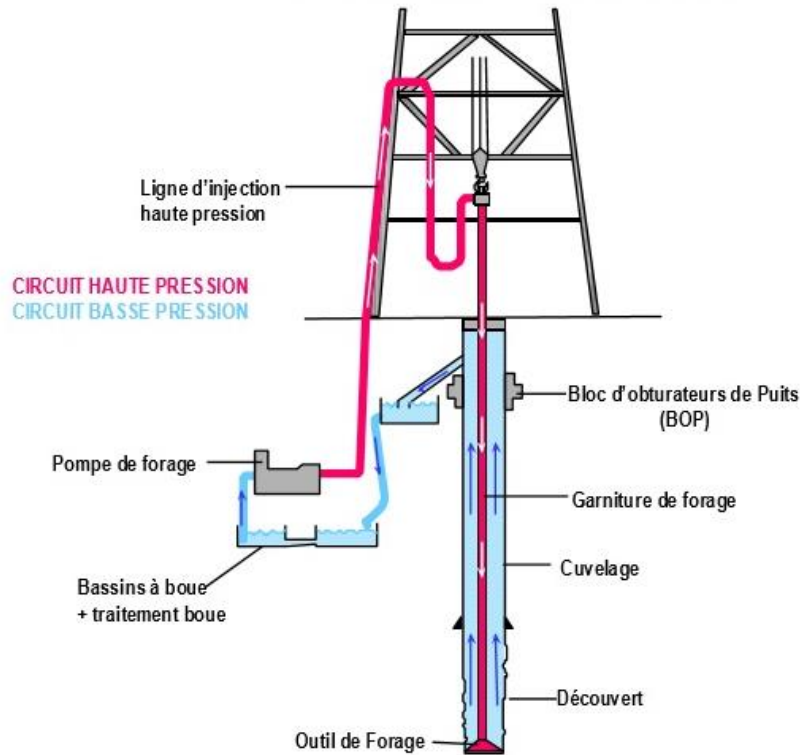


Figure I.1 : Schéma du circuit boues de forage ( in FOURAR.K ; 2007)

## I.2 Principales actions des boues de forage

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

Afin de réunir ces qualités, quelles sont les principales fonctions des boues de forage.

### I.2.1 Nettoyage de puits

La boue doit débarrasser le trou des formations forées qui se présentent sous forme de déblais appelés plus couramment "Cuttings".

L'aptitude de la boue à entraîner les déblais dépend des variables suivantes : sa rhéologie ; sa densité ; et sa vitesse de circulation dans l'espace annulaire. Si la rhéologie et la densité relèvent de la boue elle-même, il n'en va pas de même de la vitesse de remontée qui dépend du débit des pompes à boues, du diamètre de forage et de celui du train de sonde. (Milpark.C ; 1990).

**I.2.2 Maintien des déblais en suspension**

La boue doit non seulement débarrasser les puits des déblais de forage durant les périodes de circulation, mais elle doit également les maintenir en suspension pendant les arrêts de circulation, dans le but d'empêcher la sédimentation des déblais afin de redémarrer le forage sans coincement, et ceci est possible grâce à la nature thixotrope du fluide. (Belhouari et al ; 2016)

**I.2.3 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, afin de les éliminer. Bien qu'apparemment ces deux aptitudes semblent contradictoires, elles ne sont pas incompatibles. En effet, dans le cas du maintien en suspension dans le sondage, c'est à tous les déblais et particulièrement aux particules les plus grosses que nous nous intéressons.

En surface le problème est différent car c'est une boue débarrassée des déblais éliminés sur les toiles des vibreurs. Le fluide ne conserve pas donc en suspension que les particules les plus fines et les plus denses dans un circuit favorisant la décantation (GARCIA.C et al ; 1968).

**I.2.4 Refroidissement de l'outil et la diminution des frottements de 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 la garniture de forage et de l'outil. Cet échauffement est dû d'une part à la température de fond et d'autre part à la transformation d'une partie de l'énergie mécanique en énergie calorifique.

La circulation de la boue au centre de l'outil assure son nettoyage ainsi que sa lubrification. Cette dernière est bien sûr en fonction du type de boue et de ses caractéristiques.

Une addition d'huile émulsionnée dans la phase aqueuse est souvent un élément favorable. Des additifs antifrictions et des lubrifiants d'extrêmes pressions ont été mis au point. Additionnés à la boue, ils permettent de réduire considérablement les coefficients de frottement, prolongeant ainsi la durée de vie des outils, du train de sonde et de toutes les pièces métalliques en mouvement dans le puits. De plus le dépôt d'un film de boue (cake) sur les parois du puits diminue le frottement de la garniture de forage, en rotation et en manœuvre.

### **I.2.5 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. Le film est appelé Cake.

Sa formation dépend, non seulement de la vitesse de filtration, mais de la distribution, de la compressibilité des particules solides, de la pression différentielle de filtration et de la température.

Le dépôt du cake permet de consolider et de réduire la perméabilité des parois du puits. De ce fait il est possible de réaliser des découverts importants, donc de réduire le nombre des tubages techniques et de réaliser ainsi une économie notable.

Ce cake doit posséder certaines qualités qui sont fonction du type de boue et de l'équilibre physico-chimique du fluide.

La pression hydrostatique est contrôlée par la masse volumique de la boue. Cette pression doit être assez élevée pour maintenir les parois du puits mais pas trop grande pour éviter la fissuration de la roche. Le calcul de la masse volumique nécessaire est donc primordial (RAGOUILLIAUX.A ; 2007).

### **I.2.6 Prévention des venues d'eau, du gaz ou d'huile**

Afin d'éviter le débit dans le sondage des fluides contenus dans les réservoirs rencontrés en cours de forage, la boue doit exercer une pression hydrostatique suffisante pour équilibrer les pressions de gisements. La pression hydrostatique souhaitée est maintenue en ajustant la densité entre des valeurs maximales et minimales : un minimum afin de contrôler la pression des couches et maximum afin de ne pas créer des suppressions qui pourraient endommager les formations et les réservoirs.

### **I.2.7 Augmentation de la vitesse d'avancement**

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

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

**I.2.8 La récupération des informations géologiques**

Les déblais remontés par la boue sont la principale source d'information du géologue, ainsi que l'évolution physico-chimique du fluide de forage (pH, température, taux de chlorure, etc) ( in RAGOUILLIAUX.A ; 2007).

**I.2.9 Contamination des formations productrices**

Il est bien évident que la présence au droit d'une formation poreuse et perméable d'une boue, exerçant une pression hydrostatique supérieur à la pression du gisement, peut nuire à la future mise en production. L'action de la boue sur la couche peut se schématiser en deux phases :

- La boue elle-même envahit la proximité du sondage.
- Le cake se forme et le filtrat de la boue pénètre dans la formation.

Afin d'éviter des colmatages, il est indispensable de choisir le type de boue ayant la composition et les caractéristiques les mieux adaptées à la nature de la formation et du fluide qu'elle contient.

**I.2.10 Corrosion et usure du matériel**

La boue peut accélérer l'usure du matériel de sondage par une action mécanique, si elle recèle des matériaux abrasifs (sable). Elle peut aussi dans certains cas avoir une action corrosive électrolytique qui devra être minimisée en ajustant son équilibre chimique et physique par l'addition des agents anti corrosifs.

**I.2.11 Toxicité et sécurité**

La boue de forage ne devra pas présenter un danger pour la santé du personnel. Elle ne devra non plus créer de risque d'incendie, tout particulièrement dans le cas d'utilisation d'un type de boue à base d'huile. L'huile de fabrication devra être suffisamment dégazée et avoir un point d'inflammabilité compatible avec les normes de sécurité en usage sur les chantiers.

**I.3 Types des fluides de forage**

La composition des fluides de forage est passée d'un simple mélange d'eau et d'argile vers des combinaisons de plusieurs éléments, ayant une formulation adaptée pour chaque forage.

Ces combinaisons associent l'eau, les huiles, et une multitude d'additifs avec de chacun d'entre eux une fonction bien précise (viscosifiant, réducteur de filtrat, alourdissant, colmatant, lubrifiant, etc....).

En général, les fluides de forage sont identifiés par les classes suivantes : Water-Based Muds (WBM), Oil-Based Muds (OBM), Synthetic based muds (SBM), fluides de forage gazeux, fluides de forage HTHP (KHOUDJA.M ; 2008).

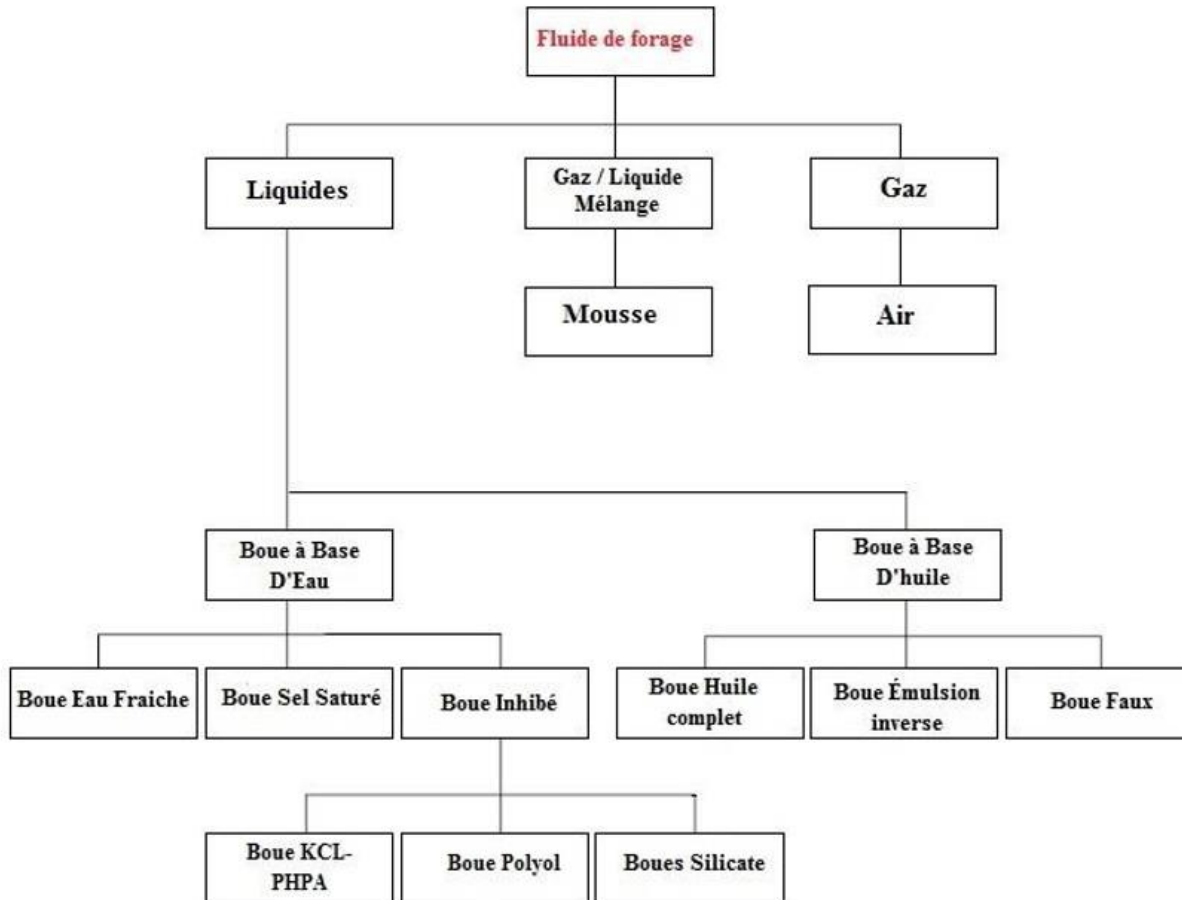


Figure I.2 : Les types des fluides de forage. ( in Institute of Petroleum Engineering, HeriotWatt Université, drilling fluids ch-9 ;2005)

### I.3.1 Boues à base d'eau

Les fluides de forage à base d'eau sont des fluides dont la phase continue est l'eau, notamment chargée en électrolytes et autres additifs dont des polymères. Ces fluides constituent le type de boue le plus utilisé dans le domaine du forage (AVA Manuel ; 2014).

On classe généralement les boues à base d'eau en trois grandes familles, selon la teneur en NaCl:

- Boues douces : salinité de l'ordre de quelques grammes par litre.
- Boues salées : présentant une teneur d'environ une dizaine de g/l.
- Boues salées saturées : la saturation est atteinte pour une concentration de 320g/l environ en NaCl.

Ces fluides sont souvent désignés par « Water-Based Muds » ou WBM. Ils sont dans la plupart des cas constitués par des suspensions de bentonites dans l'eau dont les caractéristiques rhéologiques et de filtration sont souvent ajustées par des polymères. La nature des électrolytes et leur concentration dans les formulations de boues à l'eau sont choisies en prenant en compte les caractéristiques de la formation, (activité de l'eau des formations argileuses, dissolution des formations salines) (KHODJA.M ; 2008).

Parmi les additifs on peut trouver :

- Des viscosifiants : argiles naturelles (souvent des bentonites).
- Des réducteurs de filtrat : servant à consolider le cake de filtration pour limiter l'invasion par le fluide.
- Des inhibiteurs de gonflement et de dispersion des argiles : KCL, glycérol, silicates ou divers polymères.
- Des alourdisants : comme la barytine (sulfate de baryum  $\text{BaSO}_4$ ) et la calcite (carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ) qui sont les plus utilisés pour assurer à la boue une densité convenable. On note aussi l'utilisation de l'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ou de la galène ( $\text{PbS}$ ) ; la calcite est souvent recommandée pour le forage de la phase réservoir à cause de sa solubilité dans l'acide et de son utilisation selon une granulométrie variable pour réduire les problèmes de pertes et d'endommagement.
- Des colmatants : additifs plutôt exotiques comme des granuleux (coquilles de noix).

### **I.3.2 Boues à base d'huile**

Les fluides à base d'huile sont des fluides dont la phase continue est une huile minérale (pétrole brut, fuel, gasoil...) et la phase dispersée est l'eau, dont la proportion peut atteindre 50% ou plus en volume. Selon le pourcentage d'eau, ces boues peuvent être classées en deux types :

- Boues à émulsion inverse « contiennent plus de 5% d'eau ».
- Boues à l'huile « contiennent moins de 5% d'eau ».

Ces fluides sont souvent désignés par « Oil-Based Muds » ou OBM. La phase continue la plus utilisée jusqu'à ces dernières années était le gasoil, mais actuellement la législation relative à la protection de l'environnement impose l'utilisation des huiles minérales ou « synthétiques » contenant plus de composés aromatiques. Des agents émulsifiants et mouillants sont alors utilisés pour favoriser la stabilité de l'émulsion (KHODJA.M 2008).

Les propriétés rhéologiques de cette émulsion sont ajustées par l'addition d'agents viscosifiants, généralement des argiles organophiles. Les formulations peuvent contenir également des agents réducteurs de filtrats et d'autres additifs spéciaux. Il faut signaler qu'aujourd'hui la plupart des travaux de recherche portent sur l'amélioration des boues inverses synthétiques, vu leurs avantages économiques et environnementaux, comparativement aux fluides classiques à base de gasoil (DELAMBALLERIE.G 1968).

### **I.3.3 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 ajoutés intentionnellement. Le gaz peut être de l'air, du gaz naturel, de la mousse ou du brouillard (FOURAR.K ; 2007).

## **I.4 Caractéristiques et propriétés physiques 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. Les tests relatifs à l'étude des caractéristiques des fluides de forage sont généralement basés sur quatre paramètres : densité, viscosité, filtrat et réactivité.

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 (MIDOUX.N).

**I.4.1 Densité**

La densité est le rapport de la masse d'un corps à la masse volumique d'un corps de référence dans des conditions qui doivent être spécifiées pour les deux corps (l'eau à 4 °C pour les liquides et les solides, et l'aire pour les gaz). Elle s'exprime par un nombre sans dimension (MILPARK.C ; 1990).

La densité est un paramètre important dans les boues de forage. Elle doit être suffisamment élevée pour contrebalancer la pression exercée par les venues d'eau, d'huile et de gaz et par conséquent les éruptions. Cependant, elle ne doit pas dépasser la limite de résistance des parois du puits (formations traversées) pour ne pas les fracturer et ne pas risquer une perte de boue au cours de la circulation. Pour l'alourdissement de la boue, le sulfate de baryum ( $\text{BaSO}_4$ ) a été utilisé dès 1922. La pression exercée par la boue sur les parois de puits, est donnée par l'expression suivante (KHODJA.M ; 2008) :

$$P=h*d/10 \quad (I.1)$$

Avec :

P : Pression de la formation ( $\text{kg/cm}^2$ ) ;

h : Profondeur de la couche traversée (m) ;

d : Densité de la boue.

A cause de cette pression de contrebalancement en conditions normales de forage, une diffusion du fluide dans les milieux poreux est possible. Pour diminuer autant que possible cette invasion, un produit de filtration, de faible épaisseur, appelé cake, est formé sur les parois du trou foré. Ce cake doit être de perméabilité faible et doit être facilement enlevé avant la cimentation.

En conséquence nous serons amenés à augmenter ou diminuer la densité des boues pour satisfaire ces impératifs.

Alors qu'aucun traitement de boue en cours ne peut affecter la densité (Milpark.C ; 1990) :

1) Un accroissement en cours de forage est l'indice :

- D'un enrichissement de la boue en particules solide en provenance de la formulation.



- D'une venue de fluide de densité supérieure à celle de la boue (eau salée saturée en chlorures).
- 2) Une diminution en cours de forage est l'indice :
- D'une venue de fluide de densité inférieure à celle de la boue (eau, huile, gaz).
  - D'un bullage de la boue causé par une prise d'air accidentelle dans le circuit de surface ou par une action secondaire d'un des additifs en présence dans la boue.

#### I.4.2 Rhéologie

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

L'objectif principal des études rhéologiques est de caractériser et de quantifier les effets des interactions entre particules sur les propriétés macroscopiques des suspensions (Milpark.C ; 1990).

- **La viscosité**

Si on veut définir ce que représente la viscosité, on peut dire, en première approche, que c'est une estimation de la résistance à l'écoulement d'un fluide ou encore une estimation des forces de frottements internes du fluide considéré.

La viscosité dépend avant tout de la teneur en solides contenue dans la boue et de la présence des polymères (KHODJA.M ; 2008). Une augmentation de viscosité ne pourra donc être combattue que par l'élimination de solides. D'un point de vue pratique, on définit deux types de viscosité (exprimées en cP) : une viscosité apparente (VA) et une viscosité plastique (VP) souvent liée à la taille des particules, et à leur forme.

$$VA = L600 / 2 \quad (I.2)$$

$$VP = L600 - L300 \quad (I.3)$$

Où L600 et L300 représentent respectivement les lectures à 600 et 300 tr/mn sur le rhéomètre fann. Le rhéomètre utilisé est de type Couette (cylindres concentriques rotatifs). C'est la classe de rhéomètres la plus fréquemment utilisée où la substance étudiée est emprisonnée entre deux cylindres de révolution, coaxiaux, de rayons distants de quelques mm.

Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant à l'un des cylindres un mouvement de rotation uniforme de vitesse angulaire  $\omega$ , 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  $\omega$  (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.

- **La contrainte seuil (yield point)**

Les solides présents dans la boue de forage influencent un paramètre autre que la viscosité, qui est la contrainte seuil (exprimée en Pa ou en lb/100 ft<sup>2</sup>), plus connue sous le nom de "yield value" ou "yield point".

$$YP = L300 - VP = (VA/VP).2 \quad (I.4)$$

La contrainte seuil représente la résistance initiale à vaincre, pour que le fluide s'écoule. Cette résistance est due aux forces électrostatiques attractives localisées à la surface des particules. C'est une mesure dynamique. La contrainte seuil dépend du type des solides présents et de leurs charges de surface respectives, de la concentration de ces solides, et du type et de la concentration des autres ions ou sels éventuellement présents (KHODJA. M ; 2008).

- **Gels et thixotropie**

Une boue de forage laissée au repos édifie progressivement une structure qui augmente sa rigidité et qui peut être réduite par agitation. On appelle thixotropie le fait que ce phénomène soit non instantané et réversible (MARTIN.M ; 1970).

La thixotropie est une propriété souhaitable dans les boues de forage, afin de tenir en suspension les particules dispersées, pendant les arrêts de circulation. Elle ne doit toutefois, pas être trop importante et ne pas avoir de conséquences fâcheuses pendant les manœuvres des tiges ou lors de la remise en circulation. Le degré de thixotropie dépend de la composition de la boue.

Le caractère thixotrope d'une boue est évalué en mesurant le "gel 0" et le "gel 10". Le gel 0 représente la résistance du gel aussitôt après agitation de la boue. Ils sont mesurés à l'aide du viscosimètre Fann35 à une vitesse de 3 tr/min et exprimé en lb/100ft<sup>2</sup>. Le gel 10 représente la résistance du gel après un repos de la boue de 10 minutes.

Le gel 0 varie pratiquement comme la viscosité plastique et le gel 10 comme la contrainte seuil avec cependant, pour ce dernier, une sensibilité particulière au traitement chimique. La connaissance des propriétés rhéologiques est d'une grande importance pour la résolution des problèmes de forage et permet de recommander et de prévoir le comportement des fluides au cours du forage. Il faut souvent arriver à un compromis entre les caractéristiques des fluides. Une viscosité maximale améliore la mise en suspension des déblais et réduit l'infiltration et l'érosion, tandis qu'une faible viscosité facilite le pompage du fluide, améliore la lubrification et réduit les pertes de charges, accélérant ainsi l'avancement du forage. De plus, une valeur importante de contrainte seuil permet le bon nettoyage du trou et la mise en suspension des solides (KHODJA. M ; 2008).

### **I.4.3 Filtration**

Le mécanisme de la filtration peut être schématisé de la manière suivante :

Nous avons d'une part une formation poreuse et perméable et d'autre part une suspension argileuse dans l'eau qui sous l'effet d'une pression différentielle tentera à pénétrer dans la formation (MILPARK.C ; 1990).

- a) Si toutes les particules de la boue sont plus petites que les pores du milieu perméable, toute la suspension traversera le milieu perméable et se comportera comme un système monophasique ;

Ce cas extrême est entre autres celui des pertes de circulation. Les caractéristiques rhéologiques peuvent freiner ou même arrêter le phénomène, si la pression motrice est faible.

- b) Si une partie des particules est plus grosse que les pores du milieu perméable, elle sera retenue tandis que le liquide et les particules les plus fines pénétreront dans la formation. Après un temps plus ou moins long les particules les plus fines colmateront le dépôt déjà formé par les particules grossières et ainsi sera formé un film plus ou moins imperméable qui laissera filtrer peu ou pas de phase liquide. Ce phénomène est appelé filtration, le liquide qui passe filtrat et le dépôt solide sur la paroi cake ;
- c) Si toutes les particules sont plus grosses que les pores du milieu perméable, seul le liquide ou filtrat pénètre dans la formation. Ce cas diffère peu du précédent car c'est la perméabilité du cake qui intervient dans la valeur de filtration et non pas celle de la formation.

Les phénomènes de filtration de la boue sont extrêmement importants car ils conditionnent en partie :

- La vitesse d'avancement du forage ;
- La tenue des terrains forés ;
- L'envahissement des couches perméable.

### I.5 Cycle de la boue de forage

La boue de forage est en circulation continue durant toute la durée de forage aussi bien dans le sondage qu'en surface.

Le fluide est préparé dans des bacs à boue, il est injecté à l'intérieur des tiges jusqu'à l'outil, ensuite il remonte par l'espace annulaire chargé des déblais pour être recueillie en surface dans un tube appelé « tube fontaine ». Elle est ensuite acheminée par un « tube goulotte » vers un « tamis vibrant » qui la tamise en enlevant les déblais et laissant la boue débarrassée des solides venus du puits retourner dans le bac d'où elle a été pompée afin de subir des traitements chimiques (dilution, ajout de produits,) et à réajuster ses caractéristiques physico-chimiques aux valeurs initiales avant d'être réinjectée dans le puits (AVA S.P.A, 2004).

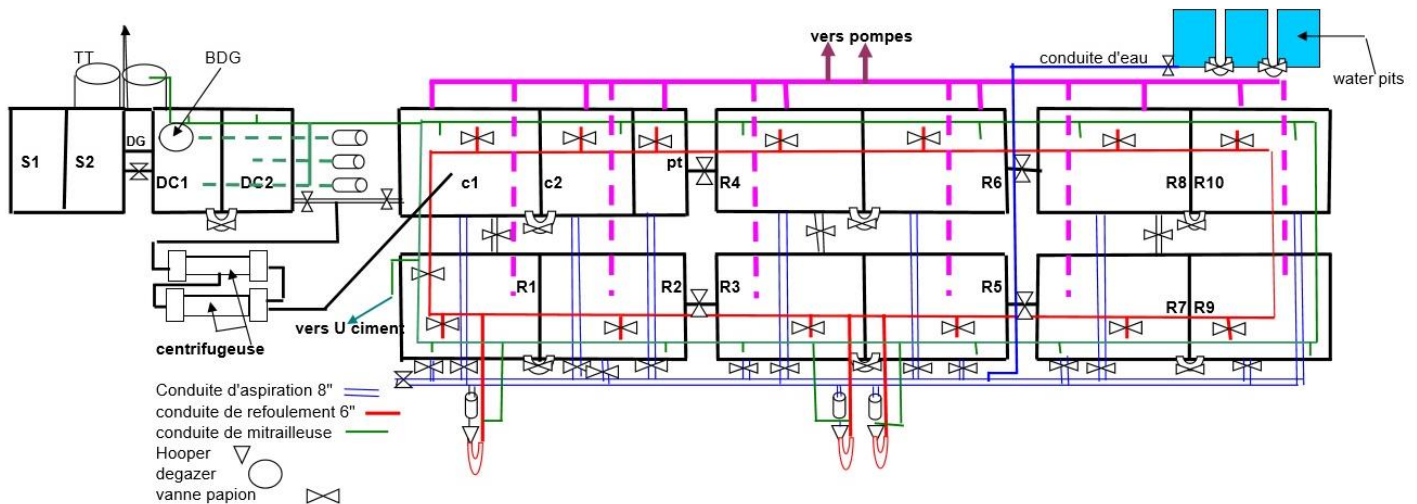


Figure I.3 : Cycle du fluide sur le site de forage (fourni par AVA, TP199, Hassi Masoued)

### I.6 Formulation des fluides de forage

Les problèmes rencontrés dans les forages, ont conduit à l'amélioration des propriétés des fluides de forages. Leurs formulations ont connu une évolution continue, passant d'un simple mélange (eau - argile), à des formulations complexes, renfermant plusieurs substances, dans le but

d'améliorer les propriétés rhéologiques de ces fluides, et afin d'optimiser la capacité de production du gisement. Une multitude d'additifs est identifiée dans les formulations des fluides de forages. Ces additifs peuvent être des : agents alourdissants, inhibiteurs de corrosion, réducteurs de filtrat, émulsifiant, viscosifiants, défloculants...etc.

Le tableau suivant présente quelques additifs utilisés dans la formulation des fluides de forage :

Table I.1 : Additifs utilisés dans la formulation des fluides de forage ( in DADA.M ; 2011)

<b>Additif</b>	<b>Substance utilisée</b>	<b>Fonction</b>
Viscosifiant	Argiles naturelles (bentonite)	Augmentation de la viscosité
Réducteur de filtrât	Amidons, carboxy-méthylcelluloses (CMC), celluloses polyanioniques (PAC), résines	Consolidation de la perméabilité du cake
Inhibiteur de gonflement	KCl, glycérol, silicates, polymères (polyacrylamide partiellement hydrolysé« PHPA », les polyalkylèneglycols « PAG »)	Empêchement du gonflement du fluide de forage
Alourdissant	Barite, calcite, hématite	Augmentation de la densité du fluide
Colmatant	Granulés (coquille de bois), fibres (fibre de bois, canne à sucre), lamellaires (céréales)	Prévention contre les pertes de fluides lors de la circulation
Lubrifiant	Huiles désaromatisées, éthers	Lubrification des outils de forage
Mouillant	Acides sulfoniques, amides, polyamides	Diminution des tensions interfaciales

Emulsifiant	Chaux (Hydroxyde de calcium), métaux lourds	Stabilisation des émulsions
-------------	--	--------------------------------

Pour donner au fluide de forage toutes les fonctions nécessaires au bon déroulement du forage, la formulation doit être réalisée avec une attention particulière. L'ajout de certains constituants va directement influencer telle ou telle fonction.

## **Conclusion**

Les fluides ou boues de forages, qu'ils soient à base d'eau ou à base d'huile, regroupent différentes substances chimiques ou naturelles dans leur préparation afin d'atteindre les caractéristiques recherchées pour effectuer l'opération de forage selon la géologie des terrains traversés.

## **Introduction**

Depuis longtemps l'argile a été utilisée dans beaucoup de domaines en dehors de son utilisation comme matériaux de construction. C'est une matière que l'on trouve dans l'élaboration des cosmétiques, en pharmacie, dans l'élaboration des matériaux polymères, dans le raffinage des huiles alimentaires et également dans la préparation des boues de forage.

C'est un minéral prédominant dans l'écorce terrestre et en tant que constituant dans les boues de forage elle permet de contrôler les caractéristiques rhéologiques tel-que la viscosité.

### **II.1 Généralité**

Les argiles proviennent de l'altération et de la dégradation des roches : altération physique sous l'effet des variations de température, et surtout altération chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules très fines. Les conditions dans lesquelles cette dégradation a eu lieu, ainsi que l'état d'avancement de cette dégradation peuvent expliquer la grande diversité des argiles (KHENIFI. A ; 2010).

L'argile, matériau naturel qui contient habituellement des phyllosilicates (silicates en feuillets) est plastique à l'état humide et durcit par séchage ou chauffage. Elle peut également renfermer des matériaux qui n'induisent aucune plasticité (le quartz par exemple) et/ou de la matière organique : ce sont des phases associées (GARMIA.D ; 2014).

Les phyllosilicates sont l'un des principaux composants de la croûte terrestre, ils ont été abondamment étudiés par diffraction de rayon X qui est l'outil fondamental pour leur identification et dont la structure confère à ces matériaux (comparativement à d'autres types de sols ou de roches) des propriétés bien spécifiques quant à leur interaction avec l'eau. Le fait de parler de ces minéraux implique que l'on en sélectionne une certaine catégorie en fonction de leur comportement, le caractère argileux est lié à quatre types de critère (GARMIA.D ; 2014) :

- Division : les minéraux doivent se présenter à l'état de très petites tailles inférieures à 2  $\mu\text{m}$  ;
- Faciès : leurs particules dissymétriques à tendance lamellaire peuvent glisser les unes sur les autres, ce qui leur confère la plasticité, cette forme favorise également le piégeage de molécules liquides en particulier de l'eau ;

- Dispersion : ces espèces doivent pouvoir constituer la suspension colloïdale plus ou moins stable avec l'eau, les propriétés interfaciales doivent donc jouer un grand rôle ;
- Constitution chimique : ce sont des silicates car seuls ces composés semblent pouvoir être caractérisés par les propriétés qui viennent d'être évoquées.

Les argiles sont toujours accompagnées d'impuretés, elles sont en conséquence constituées par des substances diverses sous formes de particules de très petite taille telles que :

- Oxydes et hydroxydes de silicium : (le quartz et la cristobalite) ;
- Minéraux ferri-fères : l'hématite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , la magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ;
- Carbonates : la calcite  $\text{CaCO}_3$ , la dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  ;
- Oxydes et hydroxydes d'aluminium : La gibbsite  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ;
- Matières organiques.

### **II.1.1 Structure des minéraux argileux**

Les silicates constituent le modèle de base. Ils sont formés par un agencement de tétraèdre dans lesquels un atome de Si est entouré de quatre atomes d'Oxygènes (**FigII.1**). Les tétraèdres s'agencent en se partageant les oxygènes en maille hexagonale (**figII.1**). Les hexagones s'agencent et forment une double chaîne. Dans les phyllosilicates, les tétraèdres forment des feuillets composés de six tétraèdres. Les Oxygènes non partagés pointent tous dans la même direction. Le feuillet octaédrique est composé d'un cation central et six  $\text{OH}^-$ . Il est constitué de deux plans de (OH) ou d'Oxygène (**FigII.1**).

L'organisation structurale des phyllosilicates est basée sur une charpente d'ions  $\text{O}^{2-}$  et  $\text{OH}^-$  (S.Caillère, 1982.). Ces anions occupent les sommets d'assemblages octaédriques ( $\text{O}^{2-}$  et  $\text{OH}^-$ ) et tétraédrique ( $\text{O}^{2-}$ ). Dans les cavités de ces unités structurales élémentaires viennent se loger des cations de tailles variables ( $\text{Si}^{+4}$ ,  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ) en position tétraédrique ou octaédrique. Ces éléments s'organisent suivant un plan pour constituer des couches octaédriques et tétraédriques dont le nombre détermine l'épaisseur du feuillet. L'espace entre deux feuillets parallèles s'appelle espace interfoliaire (**FigII.2**).



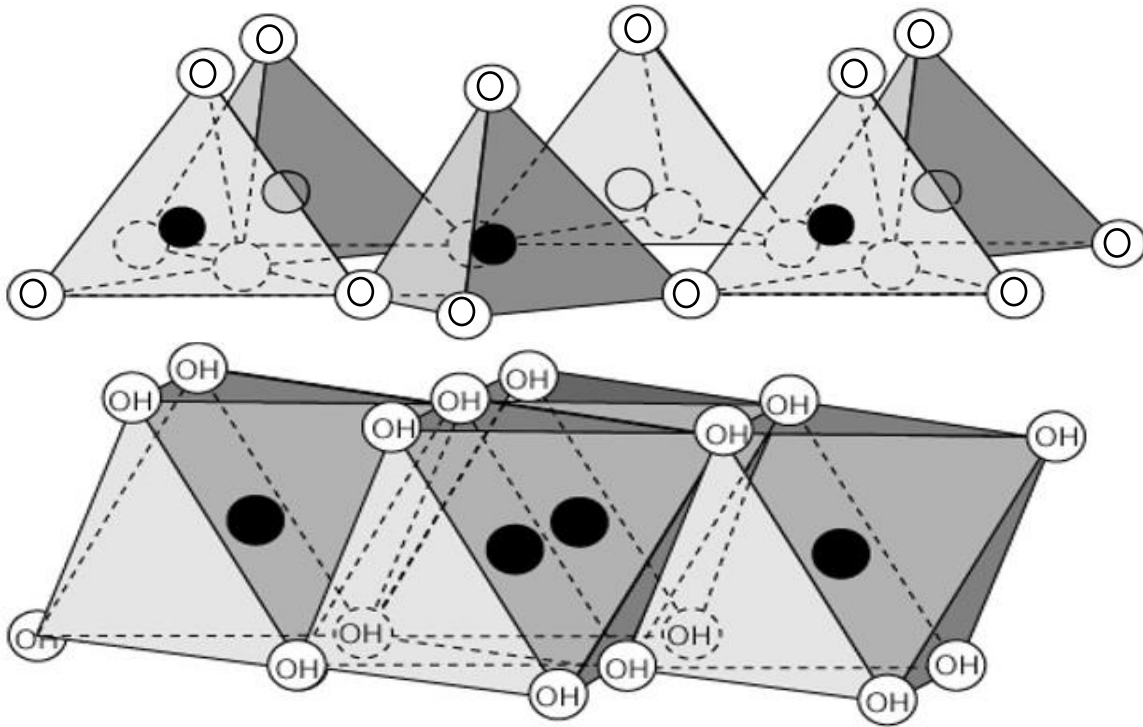


Figure II.1 : Eléments structuraux : les tétraèdres et les octaèdres (AVA manuel ; 2014)

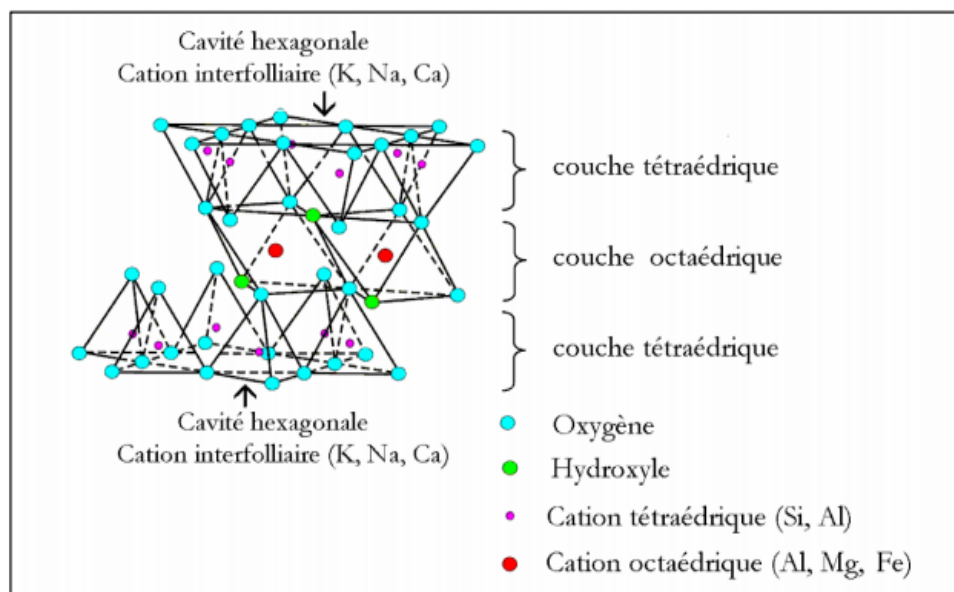


Figure II.2 : Structure interne d'un feuillet de phyllosilicate 2:1 (Caillère. S ; 1982)

Lorsque deux cavités sur trois de la couche octaédrique sont occupées par  $Al^{+3}$  (ou un autre ion métallique trivalent), la structure dénommée dioctaédrique. Quand la totalité des cavités octaédriques est occupée par des ions métalliques bivalents, la structure s'appelle trioctaédrique (MEHDI.F ; 2014).

### **II.1.2 Types des minéraux argileux**

D'après la structure du feuillet, on distingue principalement les argiles selon :

- **Les minéraux de type 1:1 (ou T-O)**, ont une couche d'octaèdres et une couche de tétraèdres. L'équidistance caractéristique est d'environ 7,1 Å. Ce type correspond aux groupes de la kaolinite ;
- **Les minéraux de type 2:1 (ou T-O-T)**, ont une couche d'octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques. L'équidistance caractéristique varie de 9,4 à 15 Å, et cela est selon le contenu de l'interfeuillet. Ce type correspond aux groupes du talc, des smectites, et celui des micas ;
- **Les minéraux de type 2:1:1 (ou T-O-T-O)**, ont une couche d'octaèdres encadrée par deux couches tétraédriques, et un interfeuillet constitué par une couche d'octaèdres. L'équidistance caractéristique est alors d'environ 14 Å ; à ce type correspond le groupe du chlorite ;
- **Minéraux Interstratifiés**, L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes (MOUSSAOUI Z ; 2012).

### **II.2. Les argiles montmorillonitiques (bentonites)**

L'utilisation des argiles dans divers domaines de l'industrie fait l'objet de nombreuses études où l'intérêt est orienté vers la détermination et l'amélioration des performances qu'elles peuvent offrir. Parmi ces argiles qui constituaient le substrat de base de plusieurs recherches, c'est celle dénommée bentonite.

La bentonite est une roche argileuse, friable et tendre, sa teinte dépend des composés minéraux et impuretés (matière organique et oxydes des métaux) qui lui sont étroitement associés. Elle se caractérise par une capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement. Elle contient comme minéral prédominant, la montmorillonite, associée à d'autres minéraux argileux

comme la Kaolinite, l'illite, le chlorite, en présence d'impuretés sous forme de quartz et de carbone (MOUSSAOUI.Z ; 2012).

### **II.2.1 Mode de formation**

La bentonite est une roche volcanique qui s'est déposée sous forme de cendres volcaniques dans des eaux douces ou salées il y a des millions d'années. Ces cendres se sont chimiquement modifiées en bentonite. La bentonite sodique est formée des cendres déposées dans l'eau de mer, tandis que la bentonite calcique est formée des cendres déposées dans l'eau douce. La bentonite provient aussi de l'altération de roches siliceuses comme le basalte et le granite. Le terme bentonite désigne actuellement le nom commercial d'un minéral qui contient essentiellement des smectites, dont la forme minéralogique la plus commune est la montmorillonite, appellation dérivant du nom d'un gisement à Montmorillon, au sud de la France. Selon la nature du gisement, la bentonite peut contenir une variété de minéraux autres que la montmorillonite. Il s'agit de minéraux argileux comme l'attapulgit, le kaolin, le mica et l'illite ou de minéraux non argileux comme le quartz, le feldspath, la calcite et le gypse (ASSAAD.E ; 2006).

### **II.2.2 Gisements de bentonite**

La plupart des gisements de bentonite datent de la période tertiaire et du Mésozoïque (il y a plus de 230 millions d'années). L'absence de gisements de bentonite plus anciens est peut-être due à la transformation de bentonite en illite. L'exploitation des premières mines de bentonite a débuté, en 1888, dans les régions du Wyoming, du Montana et du Dakota du Sud (USA).

Les États-Unis sont toujours le premier pays producteur d'argiles, suivis de la Grèce et de l'Allemagne (ASSAAD. E ; 2006).

En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'Oranie (ouest algérien). On relève en particulier le gisement de Maghnia (Hammam Boughrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et de celle de Mostaganem (M'zila) avec des réserves de deux millions de tonnes (FERHAT.M ; 2012).

### **II.2.3 Structure de la bentonite**

La bentonite est une roche tendre, friable, très onctueuse au touché, de teinte blanchâtre, grisâtre ou légèrement teintée de bleu. C'est une terre dotée d'un pouvoir gonflant au contact de l'eau. Elle est constituée principalement, par un minéral argileux appelé Montmorillonite, dont la

structure reste peu connue, c'est pourquoi diverses hypothèses sont admises, notamment celle d'Hoffmann et de Mc Conald.

L'étude de la structure de la montmorillonite a fait l'objet de plusieurs déterminations :

### ➤ Hypothèse d'Hoffman

D'après Hoffman et ses collaborateurs la montmorillonite est un aluminosilicate, composé d'unités structurales dites feuillets. Celles-ci sont constituées d'une couche octaédrique (aluminomagnésienne) comprise entre deux couches tétraédriques (silice oxygène). Certains atomes d'oxygènes sont communs aux couches de tétraèdres et d'octaèdres. Ils occupent une partie des groupements hydroxyles OH (**fig II.3 (a)**) (EDDELMANN.G et al ; 1940).

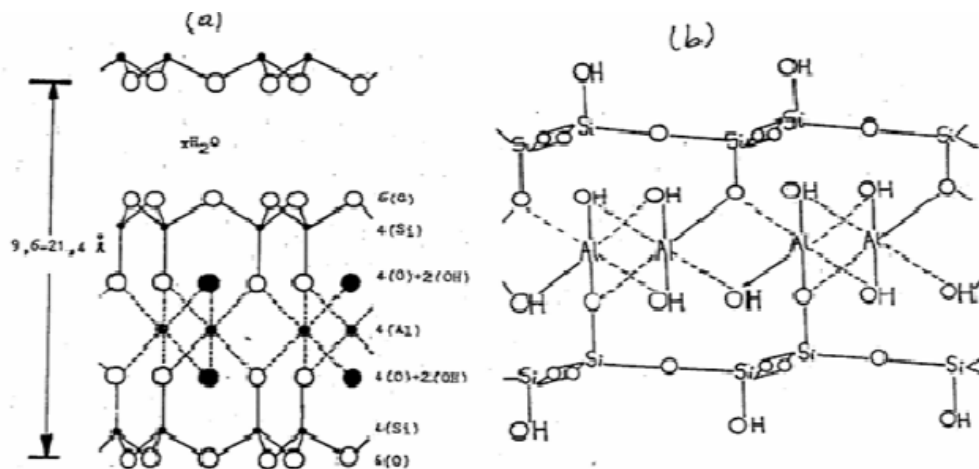


Figure II.3 : (a) Structure de la montmorillonite d'après Hoffmann

(b) Structure de la montmorillonite d'après Edelman ( in BENEDJAMA.A ;1982)

### ➤ Hypothèse de Mc Conald

Mc Conald a proposé, en s'appuyant sur des recherches basées sur la déshydratation thermique, une structure dans laquelle un nombre d'atomes oxygènes de la couche silice sont remplacés par des groupements OH qui peuvent ou non être groupés en tétraèdres. Le centre de ces derniers demeure vide au lieu d'être occupé par un ion Si ou Al (BENEDJAMA.A ; 1982).

### ➤ Hypothèse d'Edelmann

Edelmann et ses collaborateurs ont proposé un autre schéma de structure de la montmorillonite où des tétraèdres de silicium dans les deux couches sont orientés dans des

directions opposées (**fig II.3 (b)**). Les mêmes auteurs, mentionnent que dans certains de ces tétraèdres de silicium, des groupements hydroxyles prennent la place des atomes d'oxygènes. G. Eddelmann (EDDELMANN.G et al ; 1940).

## II.2.4 Microstructure de la montmorillonite

Les montmorillonites ont différentes représentations structurales par rapport à la méthode de mesure de leur échelle (GHAYAZA.M ; 2012). Nous présentons dans cette partie différents caractères spécifiques structurales multi- échelles (1 nm le feuillet, 8-10 nm la particule primaire et 0.1-10  $\mu\text{m}$  l'agrégat). Celles-ci sont présentées par le schéma suivant :

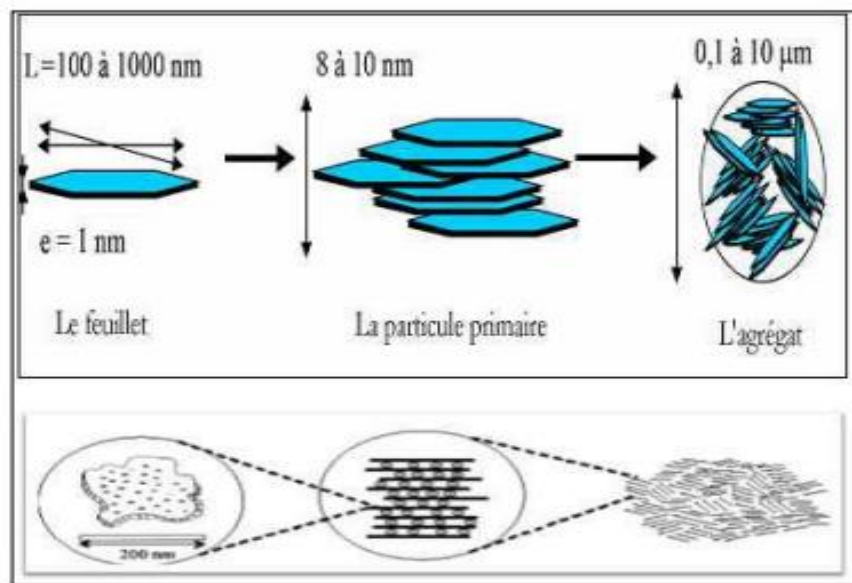


Figure II.4 : Microstructure de la montmorillonite, selon Lepluart ( in BELAIDI.N ; 2010)

### ➤ Les feuillets

Les feuillets sont les unités structurales de base définissant la nature minéralogique, l'appartenance au type d'argile, les propriétés physico-chimiques ainsi que le comportement macroscopique. Le feuillet est l'empilement horizontalement successive dans les directions X et Y pour la demi-maille, il a la forme d'un disque ou d'une plaquette avec des dimensions d'environ cent et mille nanomètre de longueur et de dix Angström d'épaisseur. Ces plaquettes sont très souples surtout en présence de l'eau donc elles sont déformables (DERAFA.G ; 2014).

➤ **La particule primaire**

Elle se compose au maximum de dix feuillets empilés grâce à des forces électrostatiques attractives entre les ions compensateurs et les feuillets, l'épaisseur est d'environ de 8 à 10 nanomètres pour la taille de particule primaire qui est restée à peu près constante. Donc on peut constater que lorsque la montmorillonite est gonflée, l'espace interfoliaire est augmenté, à ce moment il y a moins de feuillets dans une particule. La montmorillonite présente des substitutions isomorphes de type dioctaédrique. L'arrangement global des feuillets d'une particule primaire de montmorillonite est turbostratique. Ils se présentent irrégulièrement sur le plan (X;Y) mais sont tous perpendiculaires à la direction Z comme l'indiquait le schéma précédant (**fig II.4**) (BELAIDIN ; 2010).

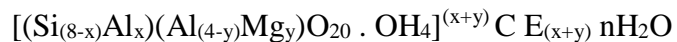
➤ **L'agrégat**

Le terme "agrégat" représente les argiles à l'état poudreux, c'est un ensemble de petites particules ayant une forme plus ou moins rectangulaire appelée "particules primaires" orientées dans toutes les directions, ces particules sont reliées entre elles par des forces colombiennes ou par des dépôts d'hydroxydes ou de matière organique.

Les agrégats ont une taille qui varie de 0,1 à 10 microns comme il est montré sur la figure au-dessus (GARMIA.D ; 2014).

**II.2.5 Formule chimique de la montmorillonite :**

La formule idéalisée d'une maille unitaire de la montmorillonite peut s'écrire (GARMIA.D ; 2014) :



$[(\text{Si}_{(8-x)}\text{Al}_x)(\text{Al}_{(4-y)}\text{Mg}_y)\text{O}_{20} \text{OH}_4]^{(x+y)} \text{C E}_{(x+y)} \text{nH}_2\text{O}$ : Macro anion qui compose le feuillet.

Y/8 : Proportion de Si substituée par Al dans la couche tétraédrique.

X/4 : Proportion d'Al dans la couche octaédrique substitué par Mg.

CE<sub>(x,y)</sub>: Cations échangeables dans l'espace inter-foliaire.

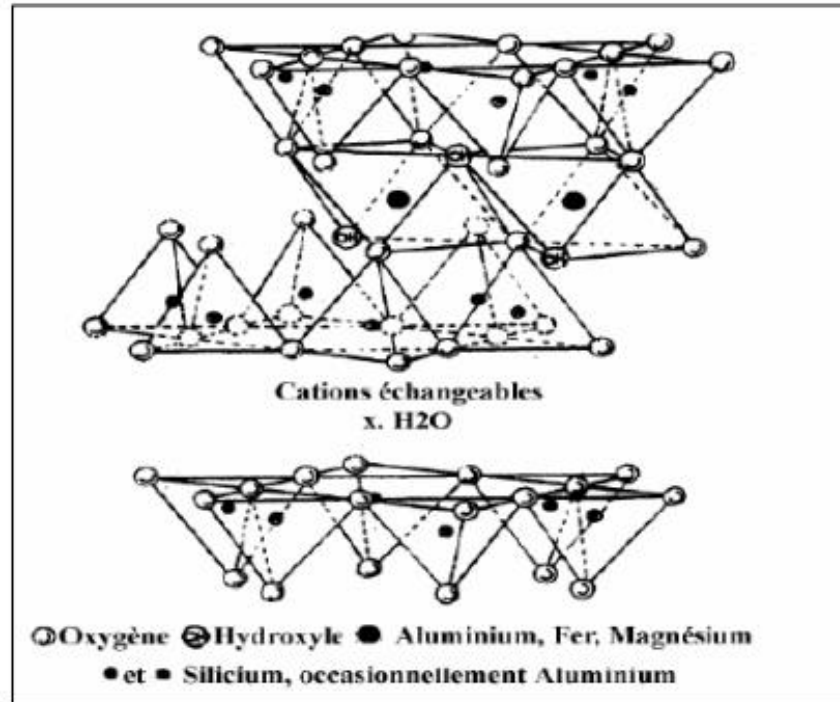


Figure II.4 : Schéma montrant la structure de la montmorillonite ( in GARMIA.D ; 2010)

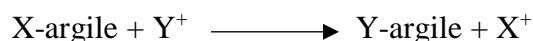
### II.2.6 Caractéristiques physiques des montmorillonites

Les montmorillonites possèdent des propriétés particulières comme : la capacité d'échange cationique, la surface spécifique, la densité de charge spécifique, le gonflement et le rôle du cation compensateur.

#### II.2.6.1 Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique (CEC) correspond au nombre de cations monovalents qu'il est possible de substituer aux cations compensateurs pour compenser la charge négative de 100 grammes d'argiles. Elle s'exprime généralement en milliéquivalent pour 100 grammes (GARMIA.D ; 2010).

La montmorillonite a la capacité d'adsorber certains cations et de les maintenir dans un état d'échange, cela signifie que ces cations intercalés peuvent être échangés par le traitement d'autres cations dans une solution aqueuse. Les cations échangeables les plus communs sont  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{NH}_4^+$ . En effet, si l'argile est placée dans une solution d'un électrolyte donné, un échange se produit entre les ions de l'argile ( $\text{X}^+$ ) et ceux de l'électrolyte ( $\text{Y}^+$ ) (MOUSSAOUI.Z ; 2012).



Il est important de noter que les molécules et les cations organiques peuvent être également adsorbés par la montmorillonite. Dans le cas des molécules organiques, cela donne lieu à de nombreuses applications dans le domaine du traitement des eaux et dans le domaine pharmaceutique.

#### II.2.6.2 La surface spécifique

La surface spécifique est égale au rapport des volumes sur la surface des phyllosilicates. Pour cette raison les méthodes les plus utilisées qui déterminent la surface spécifique des phyllosilicates sont basées sur l'introduction progressive d'un réactif dans une suspension aqueuse jusqu'à sa saturation. Pareillement on mesure le volume qui est additionné jusqu'à la saturation du phyllosilicate.

Le réactif sélectif est nécessaire, il peut se développer depuis l'interaction spécifique avec le phyllosilicate étudié jusqu'à couvrir toute sa surface. L'éthylène glycol est utilisé dans ce cas ; des liaisons hydrogènes sont développées entre le réactif et les atomes d'oxygène de surface (MOUSSAOUI.Z ; 2012).

#### II.2.6.3 Propriétés de gonflement et le rôle du cation compensateur

Le gonflement est une séparation des feuillets de montmorillonite jusqu'à l'équilibre interfoliaire et sous une pression donnée. Cette distance peut atteindre jusqu'à 100 Angströms, sous pression atmosphérique pour certaines montmorillonites sodiques. Presque toute la surface interfoliaire est occupée par les anions, donc les propriétés de gonflement des montmorillonites sont dues au caractère hydrophilique ; ce qui est évident car il existe des cations compensateurs dans les galeries interfoliaires. Cependant, cette condition n'est pas suffisante car ces propriétés de gonflement ne concernent que le greffage des cations inorganiques dans les galeries, ce qui n'est pas valable pour tous les phyllosilicates. Dans le cas des micas, dans la couche tétraédrique on localise un fort déficit de charges qui constituent des liaisons très fortes entre les ions compensateurs et les surfaces interfoliaires, ce qui provoque l'hydratation des cations (MOULLAHCEN.F ; 2008).

Les substitutions octaédriques sont meilleures que les tétraédriques au gonflement, car l'interaction des feuilles qui changent les cations compensateurs est très aisée. C'est pour



cette raison que nous pouvons dire que les montmorillonites sont les phyllosilicates ayant les meilleures propriétés de gonflement (MOUSSAOUI.Z ; 2012).

### **II.2.7 Les différents types de bentonite**

#### **II.2.7.1 Bentonites naturelles**

En fonction de la nature du cation échangeable présent, il existe à l'état naturel deux types de bentonites :

- Bentonites sodiques, où le sodium est le cation échangeable majoritaire, elles ont un fort pouvoir de gonflement et d'adsorption ;
- Bentonites calciques, où le calcium est le cation échangeable majoritaire, elles ont un pouvoir de gonflement et d'adsorption plus faible que les bentonites sodiques.

Ces deux types de bentonites, éventuellement après un séchage à 80-90°C, sont simplement broyées avant leur commercialisation (MOUSSAOUI. Z ; 2012).

#### **II.2.7.2 Bentonites activées**

Afin d'améliorer les propriétés d'adsorption des bentonites calciques, ces dernières sont le plus souvent activées par du carbonate de sodium puis séchées et broyées ; on obtient ainsi des bentonites calciques activées dont les propriétés sont égales ou supérieures à celles des bentonites sodiques.

Les propriétés de ces bentonites ainsi activées ou permutées sont moins stables dans le temps (3 à 18 mois) et dépendent de l'activation et des taux de magnésium, calcium et sodium (MOUSSAOUI.Z ; 2012).

#### **II.2.7.3 Bentonite organophile**

Le traitement organophile est un échange cationique, les cations compensateurs inorganiques naturellement présents dans l'espace interfoliaire de l'argile sont remplacés par des cations organiques porteurs de chaînes alkyles (des surfactants), les surfactants les plus couramment utilisés sont les ions alkylamines. Lors de la réaction d'échange, la tête polaire du tensioactif remplace le cation et le surfactant se loge dans l'espace interfoliaire rendant ainsi l'argile organophile et augmente la distance interfoliaire et l'affinité d'adsorption des molécules organiques. La littérature montre qu'il y a une grande tendance à utiliser les argiles organophiles,

leur première application (55%) est le domaine des nanocomposites, leur deuxième application est les procédés d'adsorption (GARMIA.D ; 2014).

Les propriétés d'argiles organophile est étroitement lié à l'environnement moléculaire des cations organiques présent dans l'espace interfoliaire des argiles. La technique la plus utilisée pour caractériser ces matériaux est la diffraction des rayons X, qui donne l'espacement « d » basale indirectement liées au nombre et à l'orientation moyenne des couches intercalées par rapport au plan de l'argile, plusieurs études ont déterminé avec précision la localisation des surfactants dans les montmorillonites organomodifiées, les ions s'intercalent préférentiellement dans la région interfeuillets par échange cationique ; ils sont liés aux sites présents à la surface du feuillet inorganique par les interactions électrostatiques, lorsque la CEC excède la CEC de l'argile non modifiée, les molécules de surfactants en excès se placent dans l'espace interfeuillets et interagissent avec les cation adsorbés à la surface des feuillets inorganique par forces de Van der Waals (KHENIFI.A ; 2010).

Selon la quantité d'organomodifiant, la longueur et la configuration de chaîne alkyle substituée, la distance interfeuillets de la montmorillonite peut augmenter. Globalement, cet espace, initialement d'environ 10 Å dans le cas de la montmorillonite sodique, peut augmenter jusqu'à 40 Å et atteindre 30 Å dans le cas des montmorillonites modifiée par des ammoniums quaternaires (HONGPING.H et al ; 2004).

Ces différents types de bentonites se présentent sous forme de poudre ou de granulés sphériques ou cylindriques. Elles ont des couleurs très variables allant du blanc pour les produits les plus purs au gris, beige ou vert pour les autres.

### **II.2.8 Champs d'application des bentonites**

Du fait des propriétés présentées par la montmorillonite, elles connaissent un champ d'applications très variées (BELAIDI.N ; 2010) :

- Dans l'industrie pétrolière, notamment dans le domaine de la catalyse ;
- Dans le forage comme un fluide de forage ;
- Dans le domaine de la dépollution, la bentonite connaît un vaste champ d'application visant soit la dégradation des composés organiques polluants soit leur transformation en des produits moins nocifs ;

- En chromatographie comme phase stationnaire ;
- En travaux publics dans l'aménagement des barrages et des routes.

### **II.3 Les argiles dans les fluides de forage**

Plusieurs types d'argiles sont utilisés dans les fluides de forage :

➤ **La sépiolite (écume de mer) :**

La sépiolite est un silicate de magnésium. Cette argile a un faciès fibreux. Son faciès est développé en baguette allongée. Elle se disperse et reste en suspension en milieu salé.

➤ **L'attapulgite :**

L'attapulgite est une argile de type sépiolite dans lequel une partie des cations  $Mg^{+2}$  est remplacée par des cations  $Al^{+3}$ . Le rendement de l'attapulgite est plus élevé que celui de la sépiolite. Cette argile est souvent vendue sous la dénomination de « Salt gel ».

La sépiolite et l'attapulgite sont utilisées comme Viscosifiant dans les boues à base d'eau de mer, dans les boues salées et dans les boues salées saturées.

La sépiolite substitue à la bentonite en boue douce pour les forages géothermiques de haute enthalpie (200-300°C), et donne de très bonnes caractéristiques de viscosité. La dispersion de la sépiolite nécessite un brassage très violent pour rompre les faisceaux fibreux. En raison de sa structure et de sa surface spécifique, la sépiolite peut être utilisée sous forme de bouchon de nettoyage à la place de l'amiante.

➤ **Les bentonites :**

Les bentonites sont des argiles de type montmorillonite que l'on exploite en carrières. Ces minéraux sont surtout des silicates d'alumine dont la forme cristallographique est très stable.

La cohésion entre les feuillets est faible, ainsi le clivage est spontané dans l'eau, d'où une grande dispersion du produit, il y a deux sortes de bentonites naturelles :

- Les bentonites sodiques qui sont les plus rares ont un pouvoir de dispersion en eau douce élevée ;
- Les bentonites calciques que l'on trouve dans la plupart des gisements ont un pouvoir de dispersion beaucoup plus faible.

Les bentonites constituent le support colloïdal des boues à base d'eau. A cause de leurs propriétés de gonflement, elles leur confèrent des caractéristiques rhéologiques, thixotropiques et de filtration.

#### **II.4 L'argile organophile comme viscosifiant dans les boues de forage à base d'huile**

Les argiles sont utilisées pour viscosifier les fluides à base d'huile. Les argiles organophiles ne se produisent pas naturellement. Une brève description de leur nature précèdera à la discussion de leur comportement.

Les smectites ont la capacité d'adsorber certaines molécules organiques sur leur surface. Les argiles organophiles ayant réagi sont basées sur cette propriété. Ils sont rendus organophiles en remplaçant les cations échangeables par une molécule organique, typiquement un sel d'ammonium quaternaire. L'argile la plus couramment utilisée est la montmorillonite.

La structure du feuillet d'argile résultante est représentée sur la figure II.5. Le feuillet d'argile revêtu de la molécule organique est maintenant capable de se disperser dans un milieu organique approprié.

De nombreuses théories ont été avancées pour expliquer comment les argiles organophiles fonctionnent ; le plus largement accepté étant la formation de liaisons hydrogène entre les plaquettes d'argile dissoutes.

La taille de la molécule cationique ayant réagi sur la surface de l'argile détermine l'espacement de la structure.

Les faibles forces de Van der Waals (AVA Manuel ; 2004) entre les chaînes alkyles peuvent expliquer une partie de la structure de l'argile traitée organiquement, mais les forces de liaison prédominantes sont dues à la liaison hydrogène sur les groupes oxygène et hydroxyles exposés sur les bords des plaquettes argileuses. Une molécule polaire telle que le glycol ou l'alcool peut être ajoutée pour induire une liaison hydrogène, mais dans la plupart des fluides de forage à base d'huile normale, suffisamment d'eau est présente pour activer les argiles et induire un développement structurel.

Comme les propriétés rhéologiques de l'argile organophile sont à la fois pseudo-plastiques et thixotropes, une augmentation de la concentration en argile ne se manifeste pas aussi rapidement

qu'une augmentation de la viscosité plastique. La raison en est que les plus grandes forces de liaison ont plus d'effet sur la rhéologie que l'augmentation de la concentration des solides (AVA manuel ; 2004).

### **Conclusion**

De la revue bibliographique que nous avons effectuée, nous pouvons conclure que cette thématique montre le grand intérêt que présente l'argile (bentonite) à cause de ses propriétés intrinsèques, ce qui a encouragé un grand nombre de chercheurs, à entamer des études approfondies sur le sujet.

La disponibilité de la documentation en question, nous a permis de nous familiariser avec les travaux de certains chercheurs en matière de protocoles expérimentaux.

## Introduction

La bentonite est une argile très utilisée dans le domaine pétrolier. Elle joue le rôle de viscosifiant dans les fluides de forage. Dans les chantiers pétroliers algériens, les sociétés exploitantes, étatiques ou étrangères, font souvent appel à des produits d'importation pour les fluides de forage ce qui augmente considérablement le coût de revient de la production. Le but de cette étude expérimentale est la préparation d'un fluide de forage en utilisant une bentonite locale comme additif dans le but de remplacer l'argile importée.

Cette partie expérimentale est articulée autour de deux grandes parties : préparation de la bentonite organophile et formulation de la boue de forage.

### III.1 Préparation de la bentonite organophile

#### III.1.1 Matières premières

L'argile utilisé dans notre étude est une bentonite algérienne de deux types : naturelle et activée, nommées **Bn.1** et **Bn.2** respectivement, provenant du gisement de Maghnia fourni par ENOF (Entreprise Nationale des Substances Utiles et Matériaux non Ferreux). **Bn.1** est le minéral brut qui n'a subi aucun traitement chimique ; **Bn.2** est traité par une solution de  $\text{NaCO}_3$ , les échantillons de bentonite récupérés étaient déjà séchés et préparés mécaniquement (concassage, broyage, tamisage etc...).

La composition minéralogique et chimique de la bentonite de Maghnia sont données dans les tableaux suivant :

Tableau III.1 : Composition minéralogique de la bentonite naturelle (ENOF)

Minéraux argileux		Minéraux non argileux		
Sauconite	Montmorillonite	Calcite	Dolomite	Quartz

Tableau III.2 : Composition chimique de la bentonite de maghnia (ENOF)

Composition chimique	Bentonite naturelle	Bentonite activée
SiO <sub>2</sub>	55-65%	55-65%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12-18%	12-19%
TiO <sub>2</sub>	0.18%	0.20%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.88%	1-3.4%
Na <sub>2</sub> O	1-3%	1-3%
CaO	1-5%	1-2%
K <sub>2</sub> O	0.76-1.75%	0.5-1.18%
MgO	2-3%	2-3.4%
PAF	7.40%	8.2%

**PAF** : Perte au feu à 1100°C.

**CEC** : Capacité d'échange cationique CEC = 80meq/100g (ENOF).

### III.1.2 Réactifs et matériels

Dans notre manipulation le matériel et réactifs utilisés sont : (labo 24, université de bejaia)

Le matériel :

- Balance : pour peser les quantités des réactifs et d'échantillons préparées ;
- Becher, Fiole, pipette, entonnoir, creusé, papier filtre ;
- Un mortier et une tamiseuse pour le broyage et la récupération d'une fraction inférieure à 63 µm ;
- Agitateur magnétique pour réaliser les différents procédés de traitement aqueuse ;
- Etuve dont la quelle on débarrasse de la phase liquide.

Les réactifs :

- HCl : (37%), densité=1.19, masse molaire :36.47 g/mole ;
- NaCl : (99.5%) de masse molaire 58.44 g/mole ;
- Eau oxygénée : (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ;
- Dodecyltrimethyl ammonium bromide (DTAB) : (98.0%) de formule chimique, C<sub>15</sub> H<sub>34</sub> BrN et masse molaire 308.34 g/mol.

### **III.1.3 Purification de la bentonite**

L'échantillon brut, qui provient du milieu naturel contient dans sa formation des impuretés qu'il est préférable de les éliminer. Parmi ces impuretés, se trouvent de quartz, de la cristobalite et une certaine quantité d'oxydes de fer. Donc le traitement préliminaire de la bentonite naturelle consiste à la débarrasser de toutes ces phases cristallines ( in GARMIA.D ; 2014).

#### **➤ Mode opératoire**

Nous avons mis 100g de bentonite naturelle dans l'eau distillée sous une agitation de 20 minutes, puis la solution obtenue est laissée en repos pour une sédimentation complète de la bentonite et la séparée de l'eau de lavage.

La fraction récupérée qui a été lavé est mis dans une solution de HCl que nous avons préparée de (0.05mole/L) sous une agitation pendant 4 heures afin de détruire les carbonates dans les particules d'argile, ensuite la solution a était filtré.

Le solide récupéré est dispersé dans un litre d'eau oxygéné (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ; 10 volumes) pendant 8 heures à l'aide d'une agitation mécanique puis nous avons chauffé à 70°C pendant 30min afin d'éliminer la matière organique (BELAIDI.N ; 2010) (MOUSAOUI.Z ; 2012).

Le solide est récupéré à nouveau par une filtration puis séché dans l'étuve à 60°C et broyé à l'aide d'un mortier jusqu'à l'obtention d'une poudre homogène, l'échantillon final est nommée **(Bn.1.p)** (ZHIJIN.G et al ; 2016).

### **III.1.4 Préparation de la bentonite sodique**

Ce procédé a pour but de traiter la bentonite purifiée par homoionisation sodique (sodification), qui permet de remplacer tous les cations échangeables de natures diverses par des



cations de sodium tous identiques. Ceci permet aussi d'avoir des fractions granulométriques bien définies, de taille inférieure à 63 microns ( $\leq 63\mu\text{m}$ ) (BELAIDI.N ; 2010).

### ➤ Mode opératoire

L'échantillon purifié dans le procédé précédent **Bn.1.p**, est enrichi par 1L d'une solution de NaCl (0.5M). La suspension est agitée pendant 24h. le procédé est renouvelé avec une nouvelle solution de NaCl afin d'assurer la saturation. Par échange d'ion, on obtient la bentonite sodique ; les ions  $\text{Cl}^-$  gênants sont éliminés par lavage à l'eau permutée (3 fois), à chaque fois que nous enlevons l'eau nous faisons un test de  $\text{AgNO}_3$  (0.1 mole/litre) pour confirmer l'absence des ions  $\text{Cl}^-$  (BOUBERKA.Z et al ; 2011).

La bentonite- $\text{Na}^+$  recueillie par filtration est séchée à  $60^\circ\text{C}$  à l'étuve pendant 24 heures puis broyé jusqu'à l'obtention d'une fraction granulométrique inférieure à 63 micromètres, l'échantillon résultant est nommé **Bn-Na**.

### III.1.5 Modification organophile de la bentonite

La bentonite organophile est obtenue en remplaçant le cation d'échange inorganique naturel de la bentonite- $\text{Na}$  par des cations DTAB (dodecyltriméthyle ammonium bromide) par une réaction d'échange d'ions. Pour la synthèse, la quantité de DTAB correspondant à 50% ; 100% ; 200% de la capacité d'échange cationique de la Na-bentonite a été dissoute dans 1 L d'eau distillé et ajoutée à 20 g de Na-bentonite (YAPAR.S et al ; 2004) (ANIRUDHAN. T.S. et al ; 2006) (BOUBERKA.Z et al ; 2011).

La suspension est agitée pendant 6 h à  $60^\circ\text{C}$ , lavée à plusieurs reprises avec de l'eau distillée. Un test de  $\text{AgNO}_3$  confirme l'absence des ions de  $\text{Br}^-$ , l'échantillon est filtré puis séché à  $60^\circ\text{C}$  pendant 24h. le produit est ensuite broyé et passé par un tamis de  $63\mu\text{m}$ .

La bentonite de Maghnia présente une capacité d'échange cationique  $\text{CEC}=80\text{ meq}/100\text{g}$  d'argile, donc les calculs pour préparer la concentration de 1CEC, sont comme suit :

$$1 \cdot 80\text{ meq} \longrightarrow 100\text{g de bentonite ;}$$

$$X\text{ meq} \longrightarrow 20\text{g de bentonite ;}$$

$$\text{Soit } X = n = \text{nombre de moles ;}$$

$$X = n = 20 \cdot 80 / 100 \quad n = 16\text{meq ;}$$

Sachant que :  $1\text{meq} = 10^{-3}$  moles ;  $M_{(\text{DTAB})} = 308.34 \text{ g/mol}$  ;

Donc,  $n = 16\text{meq} = 16 \cdot 10^{-3}$  moles ;

$M_{(\text{DTAB})} = n \cdot M \cdot 16 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot 308.34 \text{ g/mol} = 4.9\text{g}$  ;

Donc, pour 20g d'argile, nous utiliserons 4.9 g de DTAB.



Figure III.1 : Les différentes étapes du procédé de traitement organophile (labo 24 )



Figure III.2 : Produit fini (traité) (labo 24)

### III.1.6 Schémas récapitulatifs des procédures

#### III.1.6.1 Préparation d'une bentonite organophile à partir de la bentonite naturelle

Le premier procédé consiste à préparer une bentonite organophile à partir de la bentonite naturelle **Bn.1**, la bentonite naturelle est purifiée dans le but d'éliminer les impuretés et la matière organique, puis traité avec NaCl afin de remplacer les différents cations échangeables par les cations de  $\text{Na}^+$  (procédé de l'homoionisation), Na-bentonite obtenue est traitée par un surfactant organique (Dodecyltrimethyl ammonium bromide) à différentes concentration par rapport à la capacité d'échange cationique de l'argile, afin de lui rendre organophile c'est-à-dire convenable avec un milieu organique qui est la boue de forage dans notre cas.

Les procédés sont schématisés dans la figure ci-dessous :

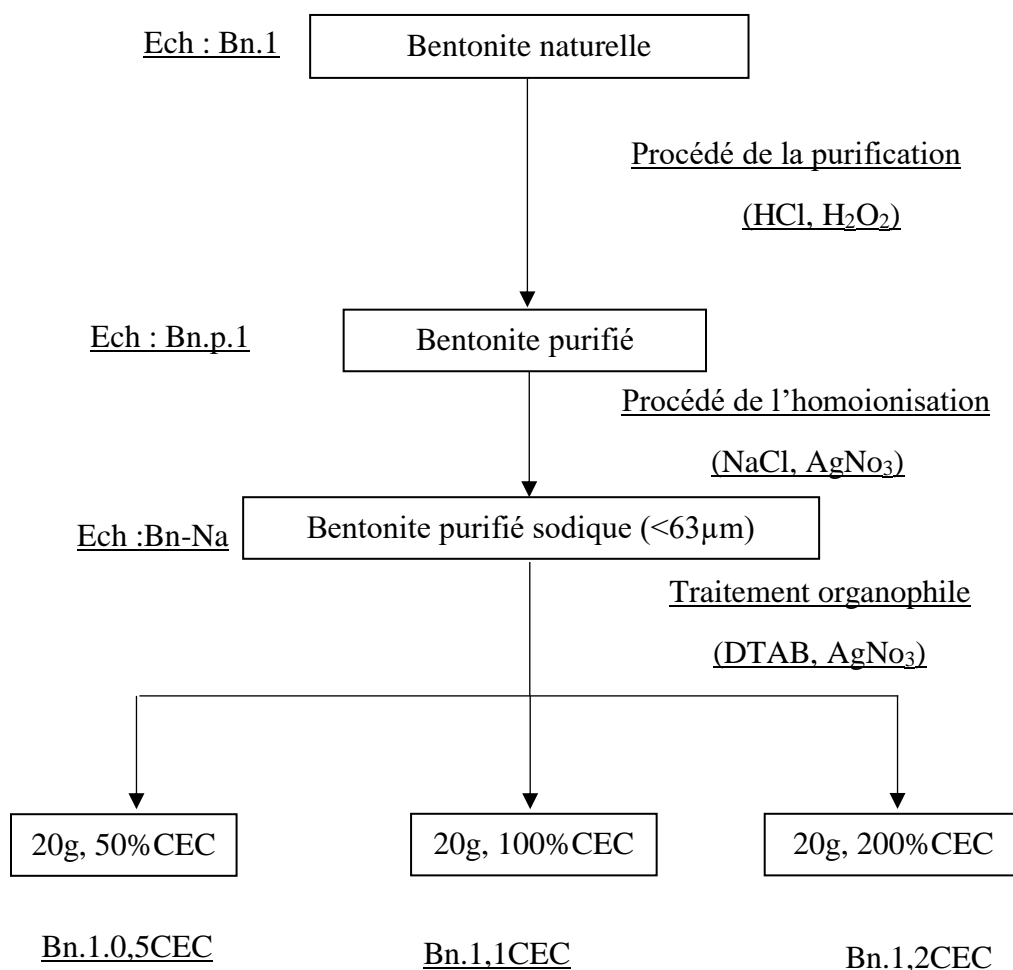


Figure III.3 : Les étapes de préparation de la bentonite organophile à partir de la bentonite naturelle

### III.1.6.2 Préparation d'une bentonite organophile à partir de la bentonite activée

La bentonite activée par  $\text{NaCO}_3$  (déjà homoionisée) nécessite un seul procédé qui est le traitement organophile, le schéma ci-dessous présente la procédure :

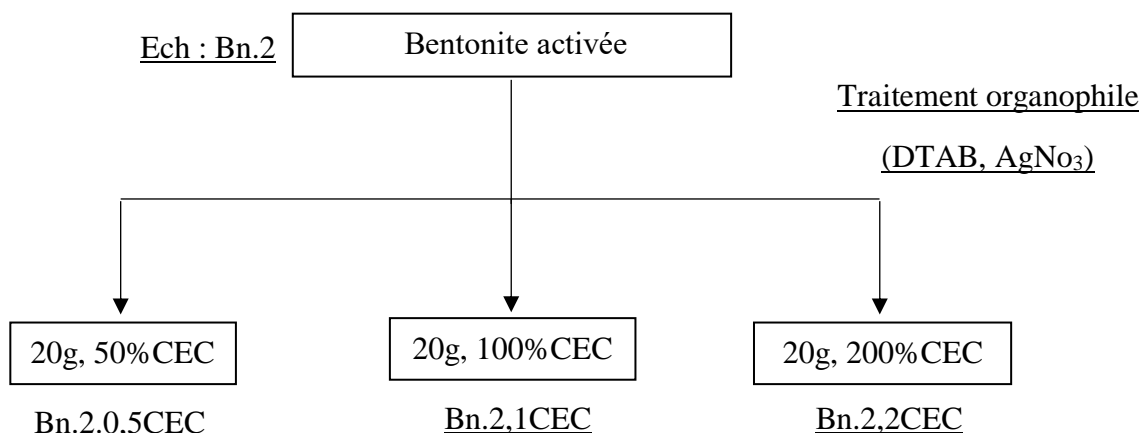


Figure III.4 : Les étapes de préparation de la bentonite organophile à partir de la bentonite activée

### III.1.7 Techniques de caractérisation

#### III.1.7.1 Diffraction par rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une technique non destructive. C'est l'une des techniques les plus utiles et les plus répandues pour l'identification détaillée des structures cristallographiques de produits naturels ou synthétisés (cristaux, minéraux, argiles...) (BOUYAKOUB.A. Z ; 2001).

##### ➤ Principe

Consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X et à mesurer l'intensité des rayons X qui est diffusée selon l'orientation de l'espace (BOUYAKOUB.A. Z ; 2001). La diffraction des rayons X est une méthode d'analyse des solides basée sur la loi de Bragg.

$$2 d_{hkl} \sin \theta = n \lambda \quad (\text{III.1})$$

Où :

$d_{hkl}$  : est la distance entre 2 plans d'indice de Miller hkl ( $\text{\AA}$ ) ;  $\theta$  est l'angle de Bragg (rad) ;

$\lambda$  : est la longueur d'onde du faisceau de rayons X utilisé ( $\text{\AA}$ ).

Elle consiste en l'enregistrement de l'intensité des rayons diffractés par un échantillon en fonction de l'angle entre les rayons incidents et l'échantillon sur le support. Le fonctionnement en mode  $\theta/\theta$  du diffractomètre implique que la source des rayons X et le détecteur forme toujours des angles égaux avec le support. La position des pics de diffraction évolue en fonction de la distance réticulaire ( $d$ ). Chaque pic est associé à un plan atomique imaginaire passant par les atomes, désigné par les indices de Miller ( $hkl$ ) (BOUYAKOUB.A.Z ; 2001).

### III.1.7.2 Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

La spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau, c'est l'aspect qualitatif et elle permet en outre une mesure quantitative, l'absorption infrarouge étant régie par la loi de Beer-Lambert (BOUYAKOUB.A.Z ; 2001) :

$$A = \zeta \cdot L \cdot C \quad (\text{III.2})$$

Avec :

C : Concentration de l'espèce absorbante (en  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

L : Longueur du trajet optique (en m).

$\zeta$  : Coefficient d'extinction molaire de l'espèce absorbée (en  $\text{mol}^{-1} \cdot \text{m}^2$ ).

#### ➤ Principe

Lorsque la longueur d'onde (l'énergie) apportée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et on enregistrera une diminution de l'intensité réfléchie ou transmise. Le domaine infrarouge entre  $4000 \text{ cm}^{-1}$  et  $400 \text{ cm}^{-1}$  ( $2,5 - 25 \mu\text{m}$ ) correspond au domaine d'énergie de vibration des molécules (BOUYAKOUB.A.Z ; 2001).

## III.2 Formulation de la boue à base d'huile

Vu le rôle et l'importance des matières premières intervenant dans la fabrication des boues de forage sur leurs caractéristiques physiques, chimiques et rhéologiques, nous allons définir et donner le rôle de ces matières premières (Carbonates, baryte, saumure...etc.). Ces produits sont fournis par la société de service AVA Drilling Fluids & Services.

### III.2.1 Matières premières

#### i. Avabentoil SA

*Avabentoil SA* est une argile organophile traitée, utilisée comme viscosifiant pour les boues à base d'huile et pour tous les systèmes de boue inverses. Les particules d'argile sont spécialement traitées avec un additif organique qui les réunit fortement et les empêche de se disperser dans la phase-huile.

C'est un viscosifiant pour les boues à base d'huile et tous les systèmes de boues à émulsion inverse. Ce viscosifiant augmente la contrainte seuil et la viscosité à faible contrainte de cisaillement de la boue. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Aspect : Poudre fine colorée, sans odeur ;
- Densité : 1,8 ;
- Argile organophile : 95% minimum ;
- Stabilité thermique : 200°C environ.

#### ii. Avoil PE (Primary Emulsifier)

*Avoil PE* est un émulsifiant primaire utilisé uniquement pour les systèmes de boue à base d'huile. Il produit une boue à émulsion inverse très stable. La phase huile peut être carburant diesel ou hydrocarbure paraffinique ; la phase aqueuse est soit saumure de chlorure de sodium ou de calcium.

*Avoil PE* donne des filtrats HT/HP sans eau, même en l'absence de réducteur de filtrat, ainsi il améliore le pouvoir mouillant par l'huile des solides dispersés dans l'émulsion inverse. Avoil PE peut être utilisé dans une large gamme de températures et en présence de la plupart des contaminants. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Aspect : Liquide sombre ambré ;
- Densité : 0,91 à 0,93 ;
- Point de congélation : - 10°C ;
- Inflammabilité : > 110°C.

**iii. Avoil SE (Second Emulsifier)**

*Avoil SE* est un émulsifiant très concentré et très efficace, ainsi qu'un agent mouillant pour les systèmes de boues à base d'huile.

*Avoil SE* produit une boue à émulsion inverse très stable. La phase huile peut être du carburant diesel ou du brut ; la phase aqueuse sera de préférence de la saumure de chlorure de sodium ou de calcium, ou un mélange des deux. Il donne des filtrats HPHT sans eau, même en l'absence de réducteur de filtrat, et améliore le pouvoir mouillant par l'huile des solides dispersés dans la boue à émulsion inverse. *Avoil SE* doit être utilisé comme émulsifiant secondaire quand *Avoil PE* est utilisé comme émulsifiant primaire. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Aspect : Liquide sombre ambré ;
- Densité : 0,92 à 0,94 ;
- Point de congélation :  $< -10^{\circ}\text{C}$  ;
- Point éclair :  $> 100^{\circ}\text{C}$  ;
- Viscosité : 600 cP à  $20^{\circ}\text{C}$  ;
- Température maximale :  $> 260^{\circ}\text{C}$  (même en présence de la plupart des contaminants).

**iv. Saumure**

La saumure est une eau salée saturée préparée avec un sel industriel qui est le Na Cl. Le sel (NaCl) est utilisé pour la saturation des boues destinées au forage d'évaporites et pour la fabrication de saumures de complétion de densité moyenne (max.  $d=1,20$ ). Combiné avec du chlorure de calcium, il permet des densités supérieures à 1,40.

- Pour saturer de l'eau douce, ajouter  $351 \text{ kg/m}^3$ .
- Pour saturer de l'eau de mer, ajouter  $316 \text{ kg/m}^3$ .

Dans un système de sels mixtes, la solubilité du sel est considérablement abaissée par de fortes teneurs en magnésium et chlorure de potassium. Ajouter le Na Cl en léger excès (20 à 60  $\text{kg/m}^3$ ).

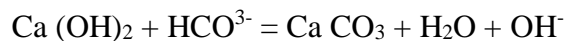
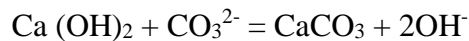
- Aspect : Grains blancs ;
- Densité : 2,16 à 2,17 ;
- Pureté : 98 à 99% ;

- Solubilité : 351 kg/m<sup>3</sup> à 20°C.

v. **Chaux** hydroxyde de calcium Ca(OH)<sub>2</sub>

La chaux est utilisée pour contrôler le pH et la contamination par les bicarbonates. C'est un composant primaire des boues à base de la chaux, et les systèmes de boues à émulsion inverse.

La chaux hydratée sert à combattre la contamination due à la présence de carbonates et de bicarbonates. Les réactions chimiques sont les suivantes :



La chaux est utilisée pour contrôler le pH dans les boues à l'eau. La quantité de chaux requise va dépendre du type et de la concentration de solides présents ainsi que de l'augmentation de pH désirée. La chaux est utilisée comme source de calcium pour convertir les boues bentonitiques, où l'ion calcium va se substituer au sodium entre les plaquettes d'argiles. Le niveau d'ions calcium en solution est contrôlé par l'ajout de la soude caustique.

Dans les systèmes de boues à émulsion inverses, la chaux est utilisée pour activer les émulsifiants à base d'huile en les transformant en sels de calcium. Un excès est généralement utilisé pour protéger les systèmes des contaminations par des gaz acides comme le CO<sub>2</sub> ou l'H<sub>2</sub>S. La dose de base est de 17 à 30 kg/m<sup>3</sup>.

- Aspect : Fine poudre blanche ;
- Densité : 1,81 en sacs – 2,09 en silos ;
- pH (solution saturée) : 12,4 à 25°C;
- Teneur en CaO : > 70%.

vi. **Baryte (BaSO<sub>4</sub>)**

La baryte est universellement utilisée comme agent alourdissant pour les boues à base d'eau et à base d'huile.

D'une grande densité et d'un coût bas, la baryte est l'alourdissant le plus communément utilisé. Les boues alourdies avec la baryte (jusqu'à d=2,4) restent cependant pompables. Elle est aussi non-abrasif, contient peu d'impuretés et ne réagit avec aucun autre produit boue de forage. La baryte, ou le sulfate de baryum (BaSO<sub>4</sub>) est universellement employé comme une matière de



charge. Elle est pratiquement insoluble dans l'eau et ne réagit pas avec d'autres composants de la boue.

La quantité d'AVABARITE nécessaire est donnée par la formule :

$$\text{Poids de la baryte requis} = 4,25 (d_2 - d_1) / (4,25 - d_2)$$

(Quantité en kg, d1 étant la densité initiale, d2 la densité à obtenir).

- Aspect : Poudre fine de couleur beige ;
- Densité vrac : 4, 2 ;
- Solubilité : Insoluble dans eau ou huile.

### III.2.2 Formulation de la boue

Nous avons préparé des boues avec un rapport huile/eau (H/E) et la densité ayant des valeurs suivantes : H/ E=70/30 et d=1,20.

- Gasoil.....300 ml
- SA.....4 g
- PE.....5,5 g
- SE: .....5,5 g
- Chaux : .....15 g
- Saumure.....150 ml
- Baryte.....140 g

- **Mode opératoire**

Après avoir versé 300 ml de gasoil d'une densité d= 0,84 dans un bécher de 500 ml ; nous avons ajouté 4 g d'AVA SA, sous une agitation de 10 minutes puis nous avons rajouté 5,5 g d'avabentoil PE pendant 5 min d'agitation, ensuite 5,5g d'avabentoil SE de la même durée d'agitation, 15g de la chaux était rajouté, après 10 min d'agitation nous avons versé lentement 150 ml de la saumure de chlorure de sodium d'une concentration de 32% en poids pendant 10 min d'agitation, nous avons terminé par l'ajout d'une quantité d'alourdissant (baryte) pour avoir une densité requise, pour 15 min d'agitation.

Ensuite nous avons passé à la mesure de ses paramètres rhéologiques.

Nous avons préparé une boue de référence **Réf** et 6 autres boues dont l'Avabentoil SA était remplacé par la bentonite organophile que nous avons préparé. Les échantillons des boues sont référés comme suite : **Bn1.0,5CEC** ; **Bn1.1CEC** ; **Bn1.2CEC** ; **Bn2.0,5CEC** ; **Bn2.1CEC** ; **Bn2.2CEC**.

### III.2.3 Matériels utilisées

#### III.2.3.1 Mesure de la viscosité avec le viscosimètre FANN 35

C'est un appareil à cylindres coaxiaux. Il comporte six vitesses de rotation (600-300- 200- 100-6-3 t/min) où le rotor est entraîné par un moteur électrique. Cet appareil est normalisé par l'A.P. I (American Petroleum Institute) On détermine en fonction du taux de cisaillement (déduit de la vitesse de rotation) la tension de cisaillement (déduite de la lecture de la graduation). Les lectures sur la graduation sont appelées lectures ofites.

##### i. Mode opératoire

- Prendre de la boue, agiter 5 min à l'aide d'un agitateur, puis remplir le godet du viscosimètre ;
- Immerger les cylindres coaxiaux (l'appareil est muni d'un système de coulisse avec une molette de blocage) jusqu'à ce que le trait du rotor affleure la surface de la boue ;
- Faire tourner le rotor à 600 tr/min en choisissant la position convenable du bouton de changement de vitesse et de l'interrupteur. Lire la déviation sur le cadran ;
- Sans arrêter l'entraînement du rotor, régler la vitesse de rotation à 300 t/min lire la déviation de la graduation ;
- Pour la lecture de gel 0 et gel 10 : Faire tourner le rotor à 600 Tr/min pendant 4 secondes laissez la boue au repos pendant 10 secondes puis, faire tourner le rotor à 3 tr/min et lire. De même pour gel 10 sauf qu'après 10 min.

##### ii. Méthodes de calcul

- Viscosité apparente

$$V_a \text{ (cP)} = L_{600}/2 \quad (\text{III.3})$$

L600 : Lecture ofite à 600 tr/min.

- Viscosité plastique

$$V_p \text{ (cP)} = L600 - L300 \quad (\text{III.4})$$

L300 : Lecture ofite à 300 tr/min.

- **Contrainte seuil (Yield point )**

$$Y_p \text{ (lb/100ft}^2\text{)} = L300 - P_v \quad (\text{III.5})$$

$$Y_p \text{ (g/100cm}^2\text{)} = (L300 - P_v) / 2 = V_a - V_p \quad (\text{III.6})$$

- **Thixotropie (Gel strength)**

$$\text{Gel strength (lb/100 ft}^2\text{)} = L3 \text{ pour 10s ou 10min} \quad (\text{III.7})$$

$$\text{Gel strength (g/100cm}^2\text{)} = L3/2 \text{ pour 10s ou 10min} \quad (\text{III.8})$$

L3 : Lecture ofite à 3 tr/min.

### III.2.3.2 Agitateur à boue

L'agitateur à boue est constitué d'un moteur électrique portant une tige en métal terminée par des pales. Cet appareil permet de :

- Fabriquer des boues au laboratoire ;
- Faire des essais-pilotes sur la boue de circulation ;
- Agiter la boue avant de réaliser certaines mesures.



Figure III.5 : Agitateur de la boue

### III.2.3.3 Densimètre

Ce sont des appareils de chantier robustes, permettant de mesurer des densités jusqu'à 2,20. Les résultats ne sont pas affectés par les changements de températures.



Figure III.6 : Densimètre

#### ➤ Mode opératoire

- Remplir le godet de boue à mesurer ;
- Mettre le couvercle et évacuer l'excès de boue qui sort par le trou central à cet effet ;
- Nettoyer à l'eau et sécher en prenant soin de maintenir le trou du couvercle permanente ;
- Placer les couteaux du fléau dans le porte- couteau du socle ;
- Déplacer le curseur jusqu'à obtenir l'horizontal du fléau. Cette horizontalité doit être contrôlée à l'aide du niveau du bulle situé au-dessus des couteaux ;
- Lire la densité ou le poids volumique directement sur le bras du fléau, au droit de la position du curseur.

### Conclusion

Afin de tester la conformité de bentonite destinée à la préparation des boues de forage, il est nécessaire d'effectuer des analyses de caractérisation qui seront représentées dans le chapitre suivant.

## Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats obtenus lors de la caractérisation de la bentonite (matière première) et les différents produits résultants de la purification, traitement sodique et le traitement organophile. Nous allons aussi évaluer les paramètres rhéologiques des boues formulées à partir de la bentonite organophile. Les résultats obtenus seront présentés et interprétés.

### IV.1 Caractérisation de la matière première

#### IV.1.1 Bentonite naturelle

Une analyse par diffraction des rayons X a été utilisée pour identifier les phases minéralogiques qui constituent la bentonite naturelle **Bn.1**. Les résultats de l'analyse sont présentés dans le diffractogramme ci-dessous :

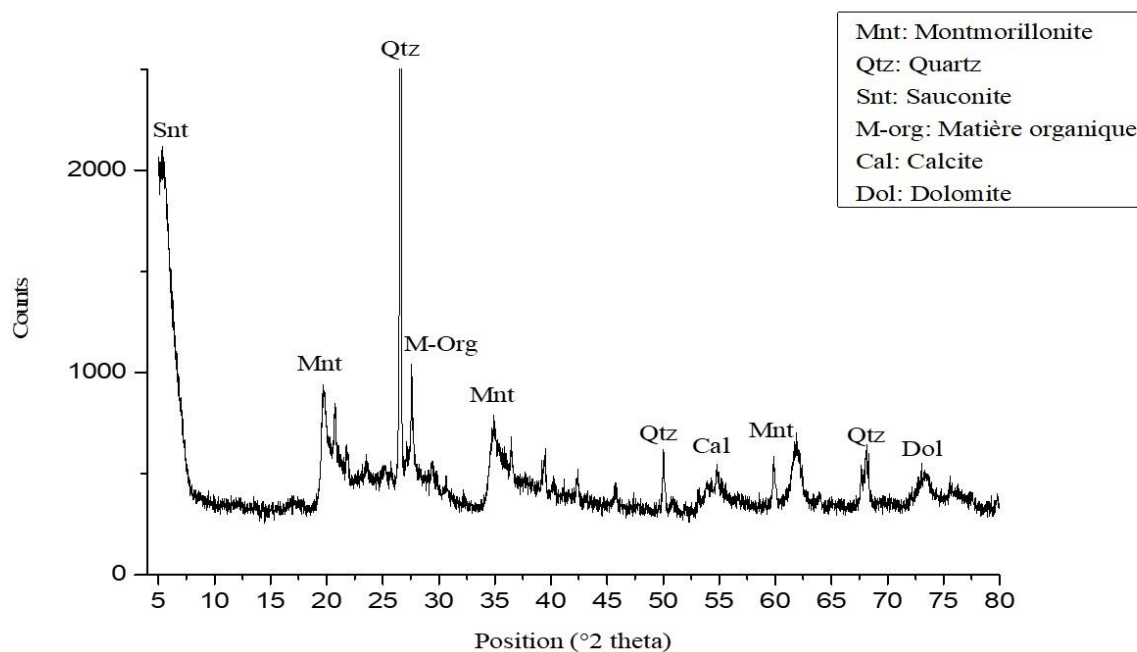


Figure IV.1 : Diffractogramme DRX de la bentonite naturelle **Bn.1**

L'étude de ce diffractogramme montre que les phases minérales présentes dans l'échantillon **Bn.1** (la matière première) sont :

- Des minéraux argileux tel que la Sauconite (phylosilicate de sodium, aluminium et zinc) qui est situé à ( $d = 16.21 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 5.44^\circ$ ) ; la Montmorillonite est caractérisée par trois pics qui sont situés à ( $d = 4.5 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 19.69^\circ$ ), ( $d = 2.57 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 34.74^\circ$ ) et ( $d = 1.5 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 61.73^\circ$ ) ;
- De la silice représentée par le Quartz qui est caractérisé par un pic intense ( $d = 3.34 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 26.60^\circ$ ) ;
- Des carbonates : représentée par La calcite à ( $d = 1.62 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 56.63^\circ$ ) et la Dolomite à ( $d = 1.76 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 74.75^\circ$ ), ces deux dernières existent en très faible quantité ;
- L'échantillon présent aussi de la matière organique à ( $d = 3.23 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 27.59^\circ$ ).

#### IV.1.2 Bentonite activée

Les résultats de l'analyse effectuée à la bentonite activée **Bn.2** sont présentés dans le diffractogramme ci-dessous :

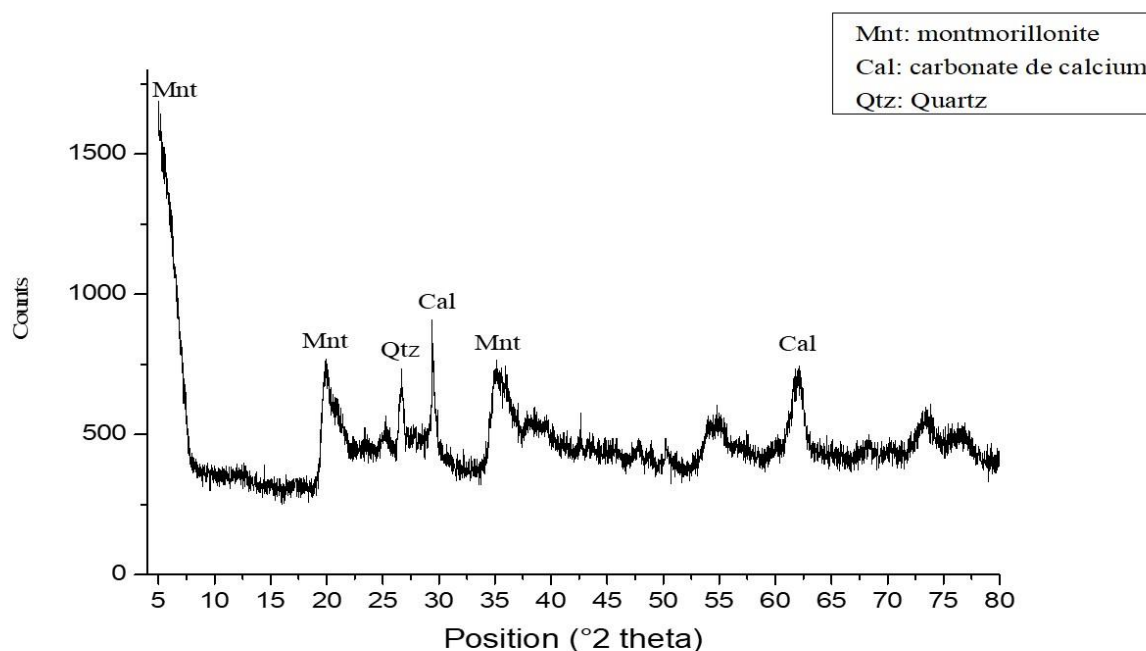


Figure IV.2 : Diffractogramme DRX de la bentonite activée **Bn.2**

L'étude du diffractogramme de La bentonite activée par  $\text{NaCO}_3$  (au niveau de l'unité ENOF, Maghnia) (**Bn.2**) révèle la présence de la Montmorillonite caractérisée par trois pics. Ces

derniers sont situés à ( $d = 15.31 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 5.76^\circ$ ) ; ( $d = 4.48 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 19.78^\circ$ ) et à ( $d = 2.56 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 34.92^\circ$ ).

L'activation par des carbonates de sodium favorise l'apparition des nouveaux pics de carbonate de calcium, située à ( $d = 3.03 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 29.41^\circ$ ) et ( $d = 1.48 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 62.04^\circ$ ).

## IV.2 Caractérisation de la bentonite purifiée

### IV.2.1 Caractérisation par DRX

La caractérisation de la bentonite purifiée a pour but l'étude des changements dans la constitution de la matière de départ, à savoir la disparition des phases indésirables, l'apparition des nouvelles phases ou bien l'augmentation de la concentration des matériaux argileux.

Le résultat de l'analyse effectué sur la bentonite activée **Bn.2** est présenté dans le diffractogramme ci-après :

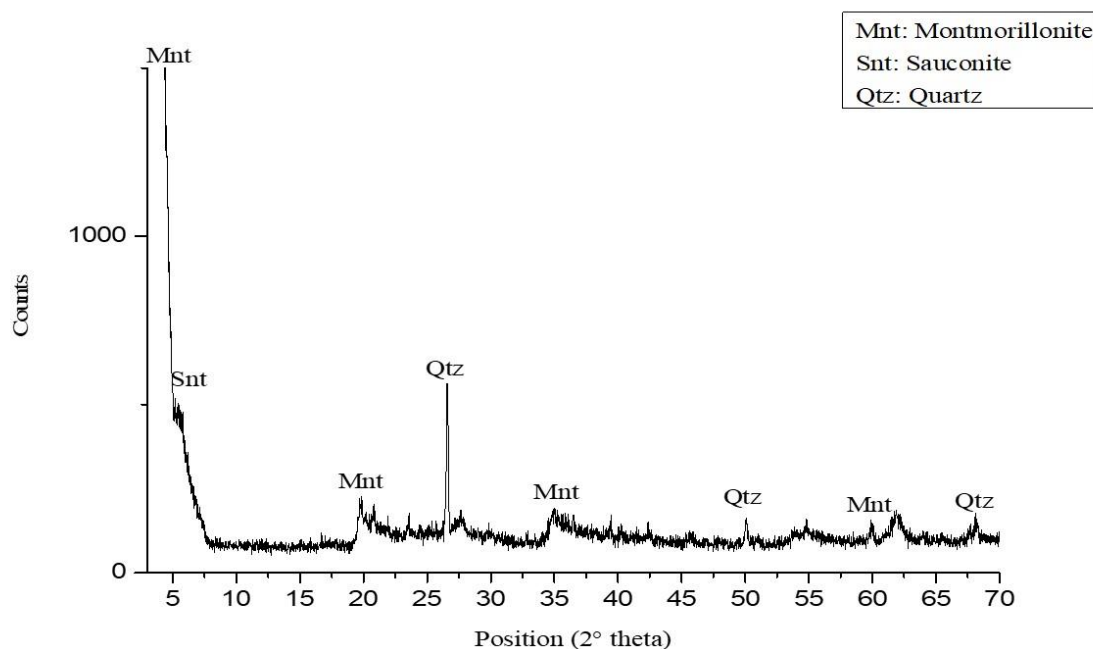


Figure IV.3 : Diffractogramme DRX de la bentonite purifiée **Bn.1.p**

Les résultats de DRX montrent que l'intensité des pics de quartz a diminué d'une manière significative, avec une disparition des pics de la matière organique, de la dolomite et de la calcite.

Nous remarquons aussi un déplacement de la réflexion (001) de Montmorillonite vers les faibles angles ( $2\theta = 3.76^\circ$ ,  $d = 23.42 \text{ \AA}$ ) caractérisée par un pic intense.

L'activation avec l'acide a affecté principalement les réflexions 001, lui a causé un déplacement vers des faibles angles.

#### IV.2.2 Caractérisation par FTIR

La figure IV.4 montre le FTIR des bentonites naturelle et purifiée :

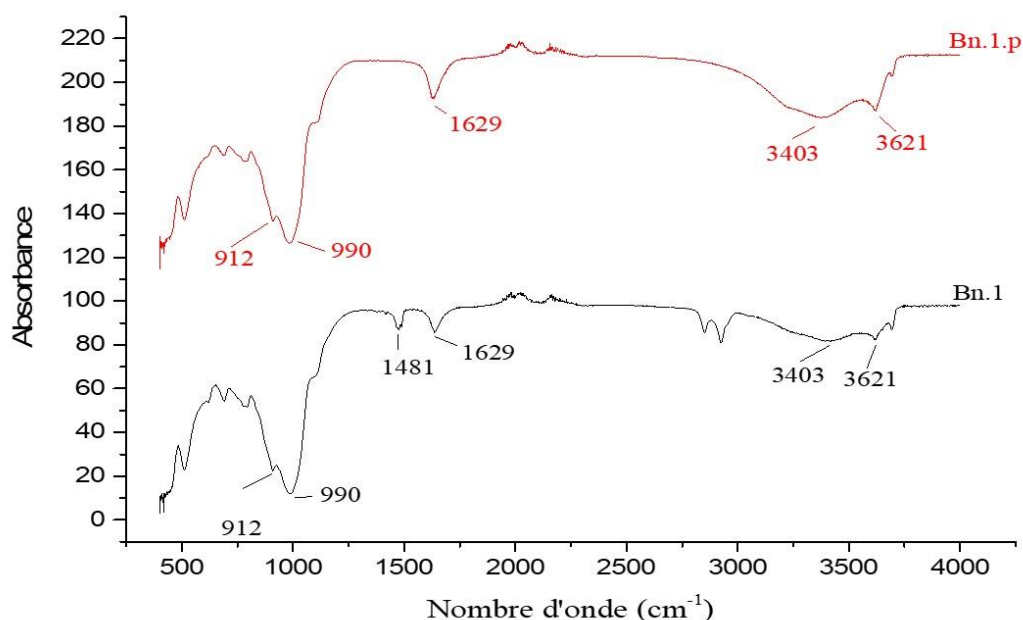


Figure IV.4 : Spectres infra rouge de bentonites naturelle et purifié

- Bandes d'absorption caractéristiques de la phase argileuse :

Ces bandes correspondent aux liaisons Si-O, Si-O-M, M-O-M (M= Al, Fe et Mg) existantes entre les anions et les cations situés dans les sites octaédriques ou tétraédriques, ainsi qu'un grand nombre de groupements OH (BELAIDI.N ; 2011).

Le spectre de la bentonite naturelle présente deux bandes d'absorption caractérisant les liaisons O-H situées respectivement entre 1400-1700  $\text{cm}^{-1}$ , est attribuée aux vibrations de valence de la liaison O-H de l'eau de constitution et aux vibrations de déformation des liaisons des molécules d'eau adsorbées entre les feuillets (BELAIDI.N ; 2011).

La bande située dans l'intervalle 3200-3800  $\text{cm}^{-1}$ , avec des pics intenses à 3403 et 3621  $\text{cm}^{-1}$ , est très caractéristique des montmorillonites, le pic environ 3621  $\text{cm}^{-1}$  est révéle ainsi la présence du magnésium dans la structure des bentonites analysées.



La figure présente une bande en  $912\text{ cm}^{-1}$  des deux argiles correspondant le groupement AL-OH-Al des couches d'aluminosilicate de la montmorillonite (GHAVAMI.M et al, 2018).

### Commentaire

Le processus de purification adopté a rendu possible la disparition des minéraux accessoires comme la dolomite et la calcite, avec la diminution de la présence de quartz qui est nuisible à la qualité d'argile.

Dans les travaux à terme, cette argile sera traitée organiquement puis utilisée comme viscosifiant pour la formulation de boue de forage à base d'huile.

## IV.3 Caractérisation de la bentonite sodique

### IV.3.1 Caractérisation par DRX

La figure IV-5 représente le spectre de diffraction des rayons X de la bentonite sodique **bn-Na** :

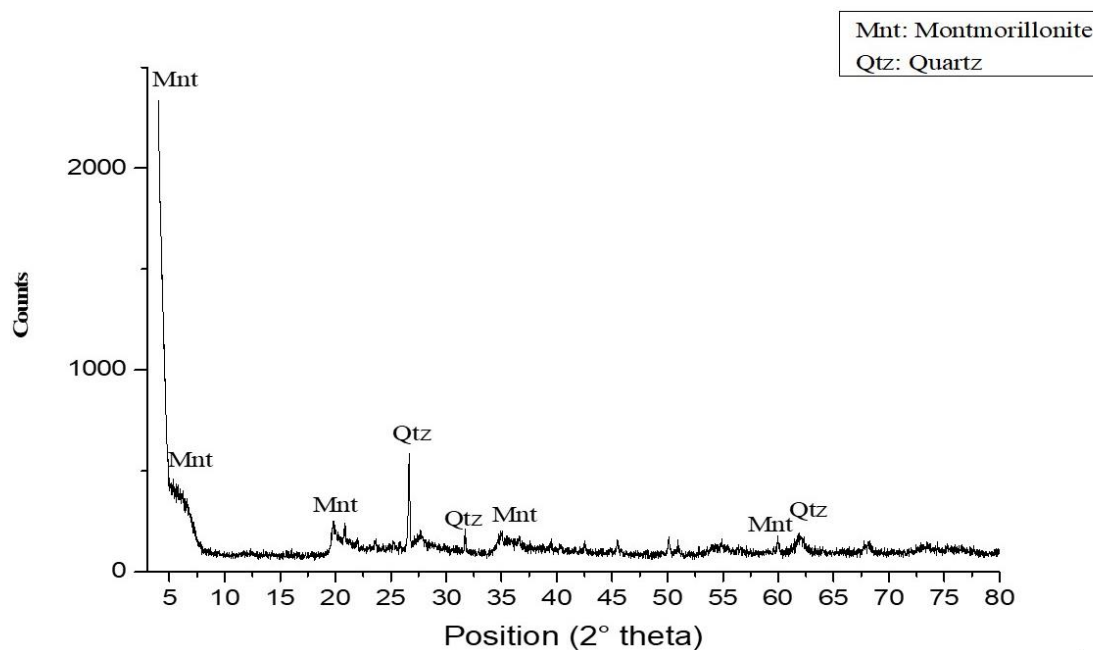


Figure IV.5 : Diffractogramme DRX de la bentonite sodique **Bn-Na**

Le diffractogramme de la montmorillonite sodique présenté sur la Figure **IV-5** montre que la **Bn-Na** présente un pic à  $2\theta=4.03^\circ$  correspondant à une distance interfoliaire  $d_{001}=14.13\text{ \AA}$ , et

quatre autres pics, leurs caractéristiques sont respectivement, ( $d = 9.86 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 6.05^\circ$ ), ( $d = 4.49 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 19.75^\circ$ ), ( $d = 2.56 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 34.94^\circ$ ) et ( $d = 1.49 \text{ \AA}$ ,  $2\theta = 61.81^\circ$ ).

### Commentaire

Nous remarquons que la distance réticulaire a subi une baisse (elle passe de  $23.42 \text{ \AA}$  dans la bentonite naturelle **Bn.1** à  $14.13 \text{ \AA}$  dans la bentonite sodique **Bn-Na**). Cette baisse est due au départ des cations  $\text{Ca}^{2+}$  ;  $\text{Mg}^{2+}$  ;  $\text{K}^+$ , remplacés par  $\text{Na}^+$  de rayon atomique plus petit (BELAIDIN ; 2011).

D'après les résultats obtenus lors de la caractérisation nous concluons la validité du procédé d'homionisation.

## IV.4 Caractérisation de la bentonite organophile

### IV.4.1 Caractérisation par DRX

Des analyses par diffraction des rayons X ont été utilisées dans la caractérisation des échantillons organophiles préparés pour déterminer l'espacement entre couches (espace interfoliaire), qui est le degré de pilage des produits modifiés et également pour comparer à la bentonite de départ.

On note que le processus de traitement organophile a été réaliser pour les échantillons dont la matière première est la bentonite naturelle **Bn.1**, également, les échantillons dont la matière première est la bentonite activé **Bn.2**.

Les figures ci-après montrent l'analyse par diffraction des rayons X des différents échantillons récupérés après le traitement organophile de la bentonite sodique **Bn-Na** que nous avons préparé à partir de la bentonite naturel **Bn.1** à des différentes concentrations (50%, 100%, 200%) par rapport à la capacité d'échange cationique (CEC), on a : **Bn.1.0.5CEC** ; **Bn.1.1CEC** ; **Bn.1.2CEC**.

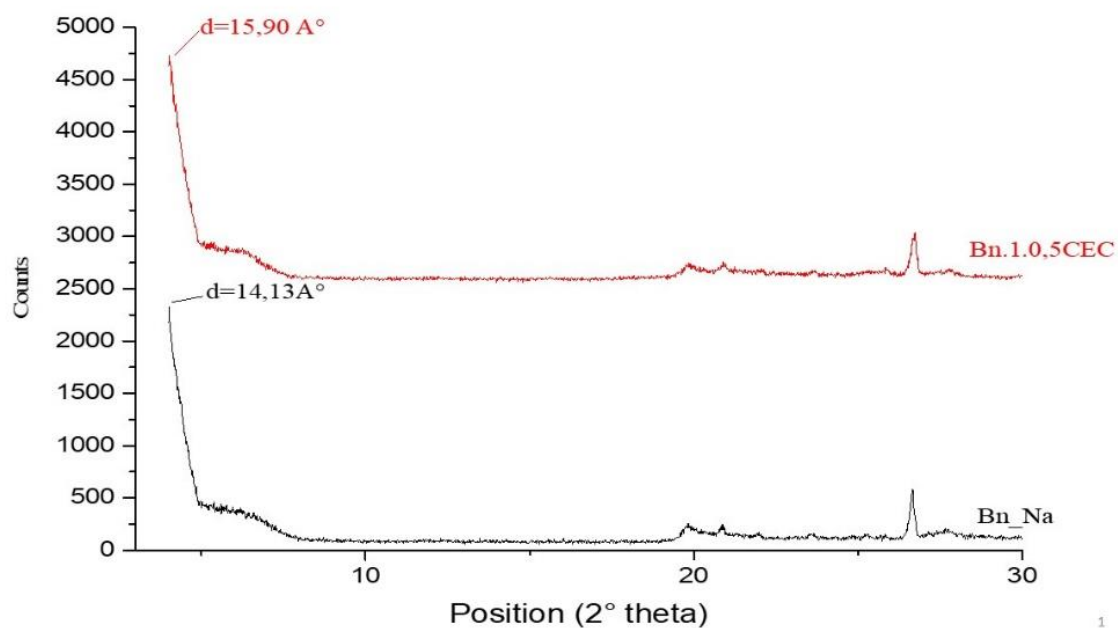


Figure IV.6 : Diffractogramme DRX de la bentonite organophile **Bn.1.0,5CEC**

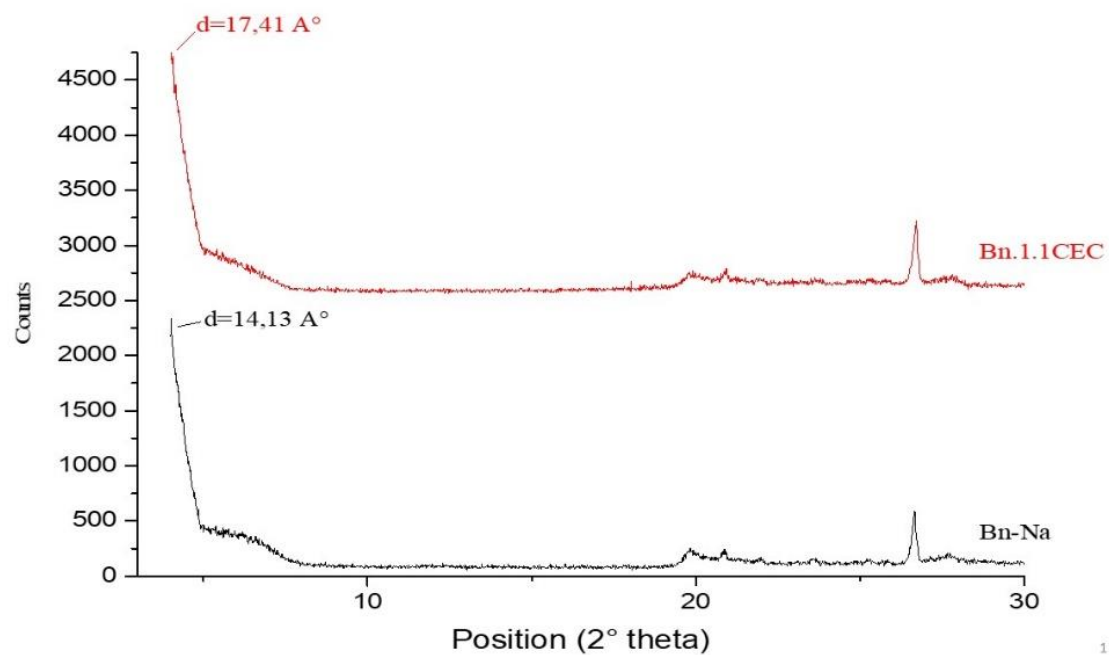


Figure IV.7 : Diffractogramme DRX de la bentonite organophile **Bn.1.1CEC**

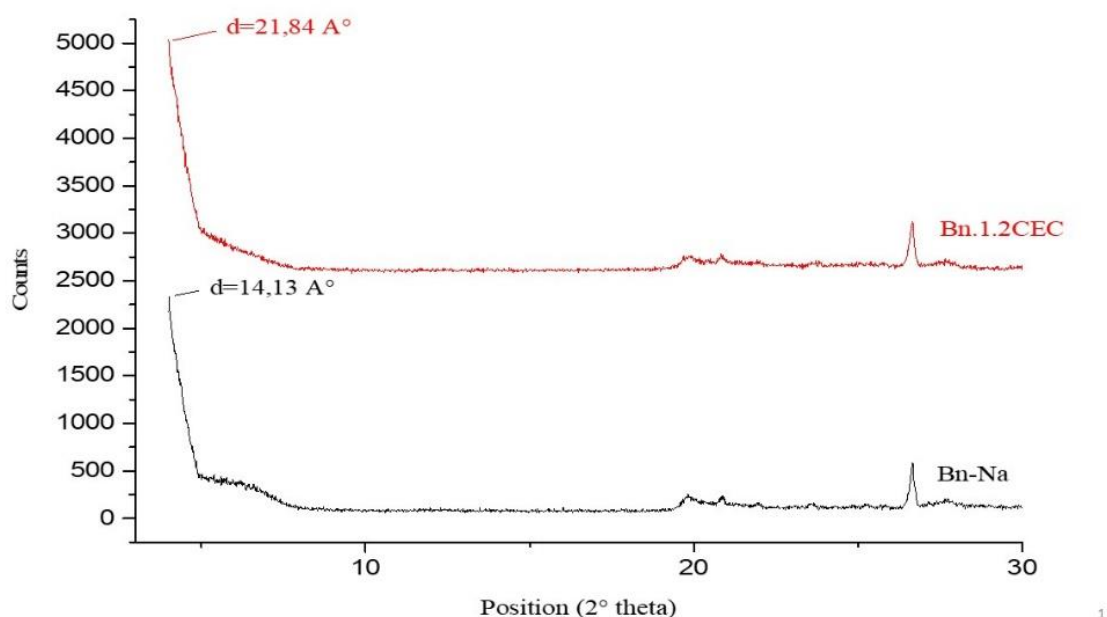


Figure IV.8 : Diffractogramme DRX de la bentonite organophile **Bn.1.2CEC**

- Nous remarquons que la structure de l'argile est préservée après la modification organophile puisque les diffractogrammes sont similaires avec celui de la bentonite sodique **Bn-Na** sauf pour le processus d'intercalation observé ;
- L'augmentation de la distance réticulaire de 14.13 Å pour l'argile sodique **Bn-Na** à 15.90 Å ; 17.41 Å ; 21.84 Å pour l'argile organophile **Bn.1.0.5CEC** ; **Bn.1.1CEC** ; **Bn.1.2CEC** respectivement, confirme l'intercalation des ions alkyl ammonium dans l'espace occupé initialement par les ions de sodium.

Les figures ci-après montrent l'analyse par diffraction des rayons X des différents échantillons récupérés après le traitement organophile de la bentonite activée **Bn.2** à des différentes concentrations (50%, 100%, 200%) par rapport à la capacité d'échange cationique (CEC), on a : **Bn.2.0.5CEC** ; **Bn.2.1CEC** ; **Bn.2.2CEC**.

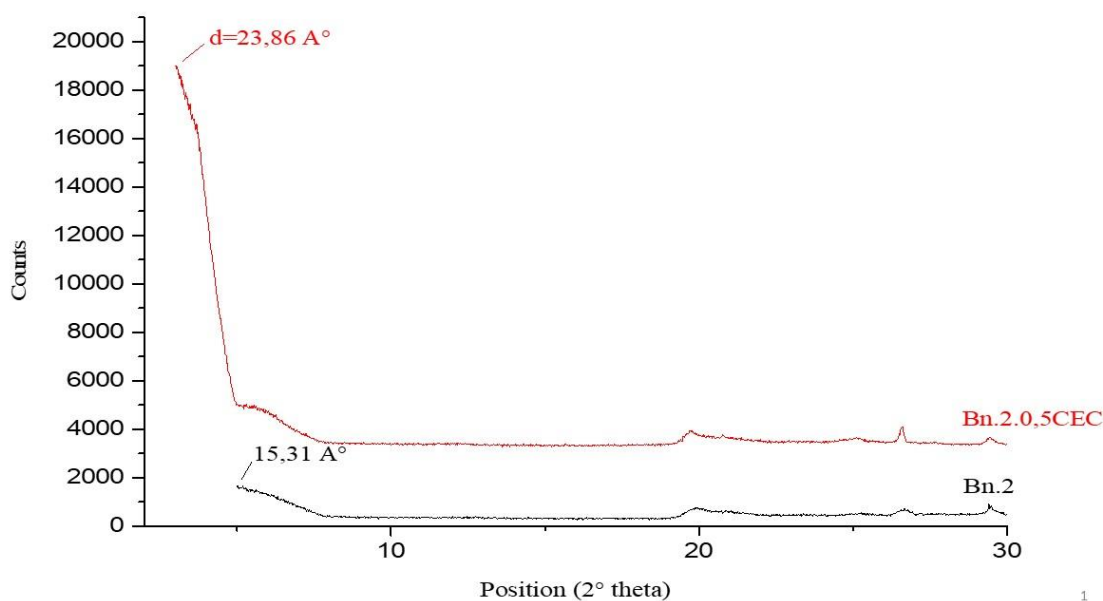


Figure IV.9 : Diffractogramme DRX de la bentonite organophile **Bn.2.0,5CEC**

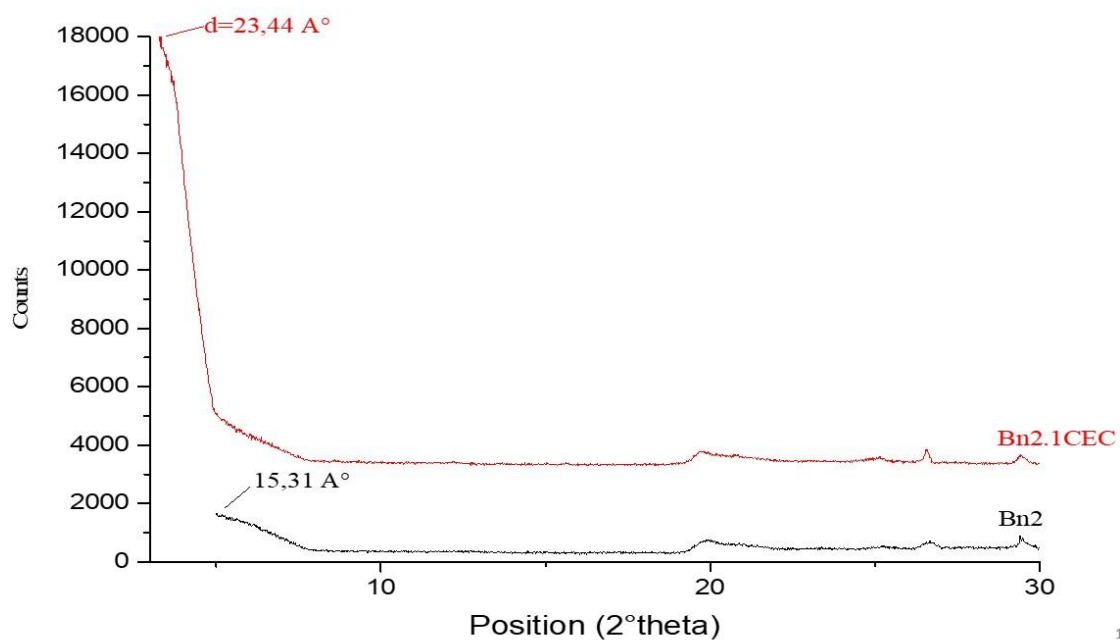


Figure IV.10 : Diffractogramme DRX de la bentonite organophile **Bn.2.1CEC**

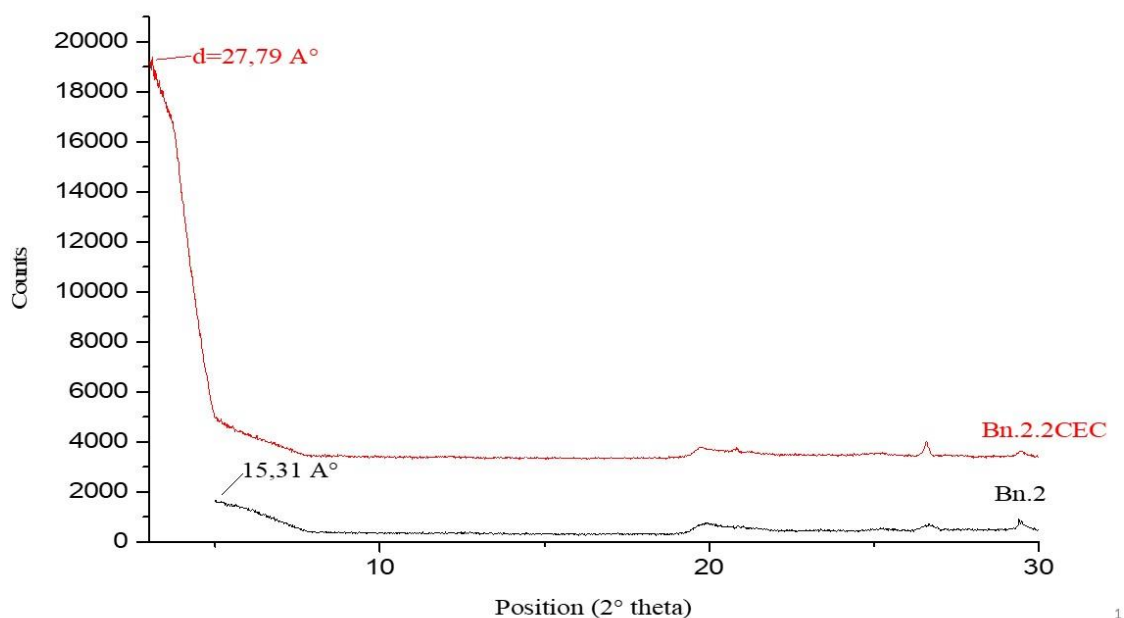


Figure IV.11 : Diffractogramme DRX de la bentonite organophile **Bn.2.2CEC**

- L'augmentation de la distance réticulaire de 15.31 Å° pour l'argile activé **Bn.2** à 23.86 Å° ; 23.44 Å° ; 27.79 Å° pour l'argile organophile **Bn.2.0.5CEC** ; **Bn.2.1CEC** ; **Bn.2.2CEC** respectivement, confirme l'intercalation des ions alkyl ammonium dans l'espace occupé initialement par les ions sodium.

### Commentaire

La bentonite modifiée par un cation ammonium quaternaire donne naissance à une argile organophile. Comme il est indiqué dans le tableau **IV.1**, les cations du DTAB sont intercalés dans l'espace interfoliaire de la bentonite, et la distance réticulaire augmente progressivement avec la concentration du DTAB ajoutée.

Tableau IV.1 : Distances réticulaire de la bentonite sodique et organophile à différentes concentrations de DTAB

Echantillon	Bn-Na	Bn.1.0,5CEC	Bn.1.1CEC	Bn.1.2CEC
$d_{001}$ (Å°)	14.13	15.90	17.41	21.84
Echantillon	Bn.2	Bn.2.0,5CEC	Bn.2.1CEC	Bn.2.2CEC
$d_{001}$ (Å°)	15.31	23.86	23.44	27.79

Les études de **ZHIJIN.G ; 2016** ont indiquées que la longueur de la chaîne alkyle, le nombre de chaînes alkyles, les types et la concentration de surfactants cationiques affectaient les arrangements de la chaîne alkyle et les propriétés de l'argile organique.

La molécule du DTAB est formée de 12 chaînes de carbone attachées à une tête d'ammonium quaternaire. En fonction de la quantité de DTAB ajoutée, la chaîne carbonée peut être disposée dans les espaces intercalaires de montmorillonite, formant soit des monocouches (13.7 Å°), soit des bicouches(17.7Å°), ou des couches pseudotricouches(21.7Å°), ou encore un complexe paraffine (>22Å°), cet arrangement peut être détecté par l'espacement basal de l'argile (ZIDELKHEIR1. B ; 2008)

### IV.5 Evaluation des caractérisations rhéologiques des boues formulées

L'objectif de cette étape est d'évaluer des paramètres rhéologique (VP, VA, YP) des boues formulées à partir des différents échantillons de bentonite organophile que nous avons préparé Auparavant, et les comparer avec une boue de référence, les résultats des tests rhéologiques obtenus sont présentés par le tableau suivant :

Tableau IV.2 : Lectures sur rhéomètre Fann 35 des différents échantillons

Ech	L600	L300	L200	L100	L6	L3	Gel10 s	Gel10 min
Réf	53	28	20	11	2	2	3	3
Bn1,0,5CEC	51	27	17	10	1	1	2	2
Bn1,1CEC	46	24	15	8	2	2	2	2
Bn1,2CEC	51	27	16	10	2	2	3	3
Bn2,0,5CEC	50	26	16	9	1	1	2	2
Bn2,1CEC	44	23	14	7	1	1	2	2
Bn2,2CEC	47	26	15	9	2	2	2	2

A partir des lectures sur le rhéomètre fann 35, nous avons calculé les paramètres rhéologiques tels que la viscosité apparente (Va), viscosité plastique (Vp) et la contrainte seuil (Yield point). Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau **IV.3** et illustrés par la figure **IV.13** :



Tableau IV.3 : Caractéristiques rhéologiques des différents échantillons

Ech	Va (cP)	Vp (cP)	Yeild point (lb/100ft <sup>2</sup> )
Réf	26,5	25	1,5
Bn1,0,5CEC	25,5	24	1,5
Bn1,1CEC	23	22	1
Bn1,2CEC	25,5	24	1,5
Bn2,0,5CEC	25	24	1
Bn2,1CEC	22	21	1
Bn2,2CEC	23,5	21	2,5

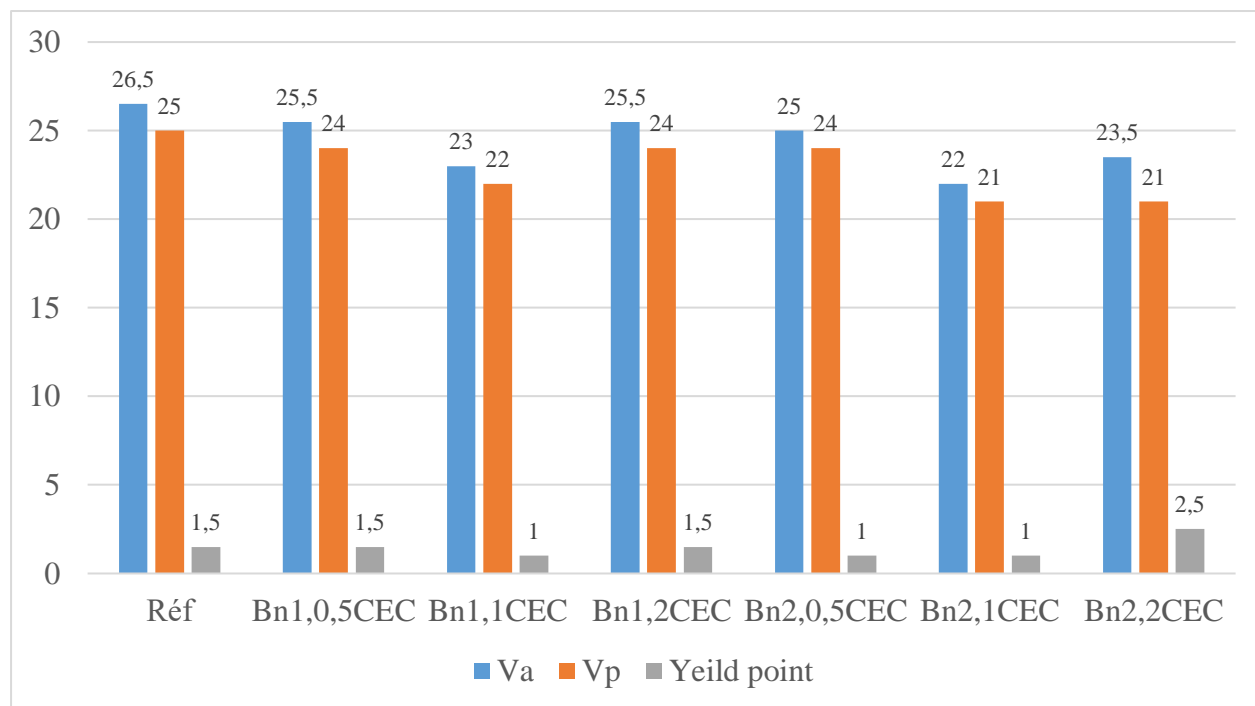


Figure IV.13 : Variation des paramètres rhéologiques des différents échantillons des boues formulées

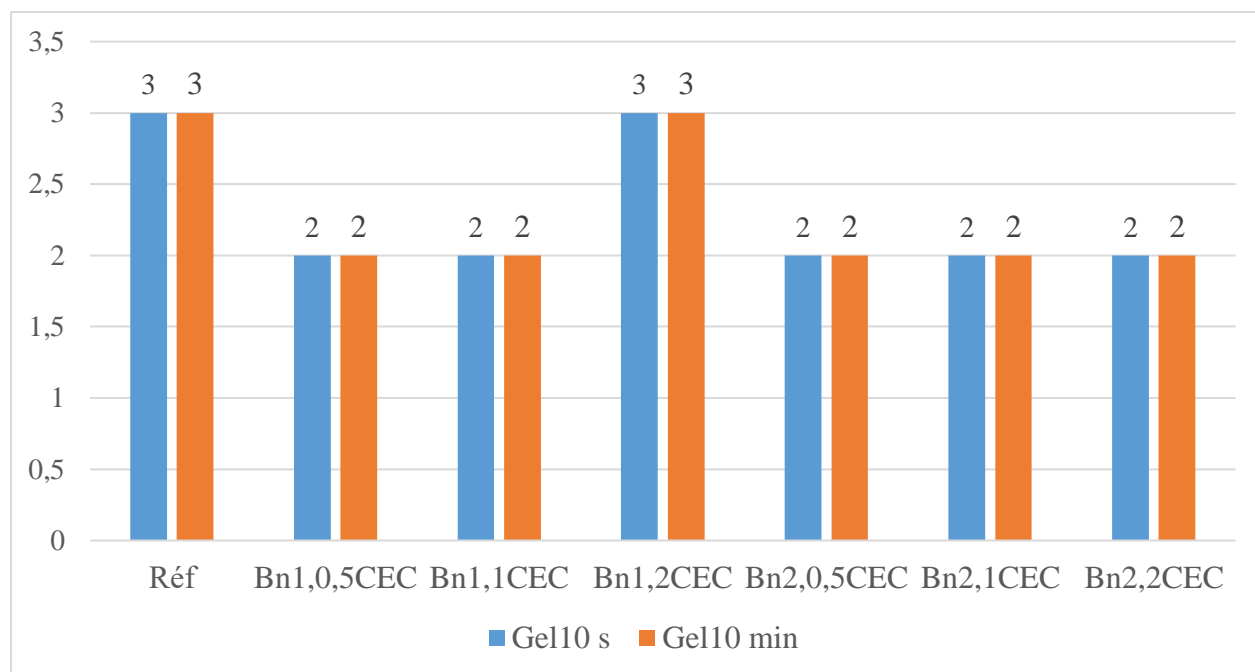


Figure IV.14 : Variation de Gel 10s et Gel 10 min des différents échantillons

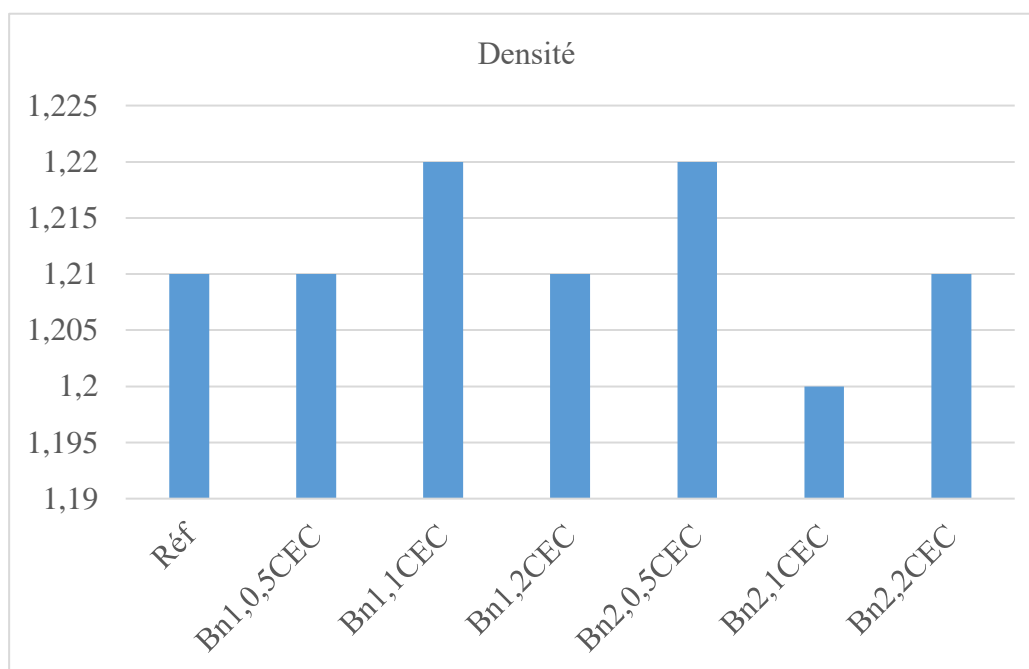


Figure IV.15 : Valeurs de densité mesurée des différent échantillons

### **Interprétation des résultats**

Une analyse préliminaire des résultats obtenus montre que les valeurs de différents paramètres rhéologiques des boues formulées à partir de nos échantillons préparés sont plus ou moins similaires avec la boue formulée à partir de l'argile organophile emportée.

On remarque que les échantillons **Bn.1.0.5CEC** ; **Bn.1.2CEC** préparées après la purification de la bentonite naturelle donnent de bons résultats en ce qui concerne la viscosité apparente et la viscosité plastique. On constate aussi que la formulation de **Bn.2.2CEC** a donné la Yield point plus élevée que celui de la boue de référence qui est égale à 2.5 lb/100ft<sup>2</sup>. Les formulations de **Bn.1.1CEC** et **Bn.2.1CEC** donnent des valeurs moins significatives par rapport à la formulation de référence.

Concernant le Gel 10s ou 10min, qui caractérise le paramètre de thixotropie, nous constatons que pour tous les échantillons, la valeur mesurée après 10s est la même que celle mesurée après 10min, ce qui indique que notre bentonite a bien comporté et interagi avec les autres composants de la boue. **RAGOUILLIAUX.A et al ; 2007** a montré que la première différenciation du comportement thixotrope est le poids moléculaire, le produit à haut poids moléculaire prend plus de temps à reprendre, le deuxième composant qui pourrait affecter le comportement thixotrope est les forces d'attraction entre les composants du matériau. La formulation **Bn.1.2CEC** donne un résultat similaire de celle de référence.

La densité mesurée de chaque échantillon, selon la figure **IV.15**, montre qu'il n'y a pas un écart remarquable ce qui laisse supposer que la densité ne dépend pas à l'argile organophile ajoutée.

### **Conclusion**

La caractérisation par différentes techniques de nos échantillons **Bn.1.0.5CEC** ; **Bn.1.1CEC** ; **Bn.1.2CEC** **Bn.2.0.5CEC** ; **Bn.2.1CEC** ; **Bn.2.2CEC**, a montré que les différents procédés (purification, traitement sodique et le traitement organophile) adoptés ont donné de bon résultat.

La formulation des boues **Bn.1.0.5CEC** et **Bn.1.2CEC** préparées à partir de la bentonite naturelle, et **Bn.2.0.5CEC** de la bentonite activée, sont satisfaisantes. Donc elles sont plus convenables si on veut valoriser la bentonite Algérienne à la place du produit emporté.

## **Conclusion Générale**

Notre étude a pour but la valorisation de la bentonite de Maghnia en tant qu'additif de boue de forage à base d'huile. Le rôle principal de cette argile est d'assurer le caractère viscosifiant et thixotropique qui est indispensable pour le bon déroulement des forages pétroliers.

Les produits utilisés dans cette étude sont fournis par ENOF unité de Maghnia ; le premier produit est la bentonite naturelle, le deuxième est une bentonite déjà activée par  $\text{NaCO}_3$  au niveau de l'unité de traitement. Les deux produits ont subi des traitements chimiques nécessaires (purification puis traitement par une solution  $\text{NaCl}$ ) qui se sont suivis par un traitement organophiles.

Chaque étape de ce traitement chimique a été suivie d'une analyse au diffractomètre aux rayons X dans le but de vérifier l'efficacité du procédé utilisé. L'analyse des diffractogrammes des différents échantillons préparés ont montré que :

- Le procédé de purification a rendu possible la disparition des minéraux accessoires comme la dolomite et la calcite, avec la diminution de la présence de quartz, par conséquent d'augmenter la concentration de la montmorillonite dans l'échantillon ;
- Le procédé de traitement sodique consiste à remplacer les divers cations échangeables par des cations de  $\text{Na}^+$  ;
- Après le procédé de traitement organophile, La distance réticulaire a augmenté ce qui signifie l'intercalation des cations organiques de DTAB à la place des cations  $\text{Na}^+$  ;
- La distance réticulaire augmente avec l'augmentation de la concentration de DTAB par rapport à la capacité d'échange cationique de la bentonite, cela est dû au type d'orientation des ions de DTAB dans l'espace interfoliaire de montmorillonite.

Ces échantillons de bentonite organophile sont utilisés dans la formulation de boues de forage à base d'huile. Les boues obtenues ont été placées dans un rhéomètre pour étudier les paramètres rhéologiques et les comparer avec celles de la boue formulée à partir de l'argile organophile emportée. L'interprétation des résultats obtenus a montré que :

- Notre argile organophile à bien comporter dans la boue, la lecture de gel 10s reste constante après 10min de repos signifié que le caractère thixotropique est vérifié ;
- Les formulations **Bn.1.0,5 CEC** et **Bn.1.2 CEC** préparées à partir de la bentonite naturelle sont plus convenable si on veut remplacer le produit emporté AVABENTOIL SA par une bentonite Algérienne ;
- La formulation **Bn.2.0,5 CEC** présent aussi des résultats appréciables, elle est la plus économique en termes de coût.

Après ces résultats nous avons conclu que la bentonite Algérienne de Maghnia est valorisable dans le domaine de préparation des additifs de boue de forage à base d'huile.

## **Références Bibliographiques**

- ANIRUDHAN.T.S , RAMACHANDARAN.M** ; *Surfactant-modified bentonite as adsorbent for the removal of humic acid from wastewaters* ; Article ; Journal of Applied clay science ; 2006 ;
- ASSAAD.E**, *Etude du processus de coagulation-floculation du système montmorillonite-chitosane dans l'élimination de métaux de transition* ; Thèse de doctorat ; Université du Québec à Montréal ; 2006 ;
- BELAIDI Nouredine** ; *Préparation de la bentonite de Maghnia intercalée au titane et/ou vanadium. Application à la réaction d'oxydation du cyclohexane* ; Mémoire de magister ; Université abou bekr belkaid-Tlemcen ; 2010 ;
- BENEDJAMA.A** ; *Etude des bentonites Algériennes* ; Thèse de Magister ; ENP ; Alger ; 1982 ;
- BOUBERKA.Z ; BENABBOU.A.K ; DERRICHE.Z ; RABILLER-BAUDRY.M ; SEKRANE.F** ; *Adsorption of totuene on bentonites modified by dodecyltrimethylammonium bromide* ; communication ; Journal of Chemical Engineering Communications ; 2011 ;
- BOUYAKOUB.A.Z** ; *Caractérisation de la bentonite intercalée au chrome (III) et au cuivre (II) , Application au traitement des eaux usée* ; Mémoire magister ; Université Abou Bekr Belkaid ; Tlemcen ; 2001 ;
- CAILLERE.S , HENIN.S , RAUTUREAU.M** ; *Minéralogie des argiles* ; Livre ; Edition Masson ;1982 ;
- DADA.M** ; *Optimisation d'un procédé de traitement des Boues de forage* ; Mémoire de magister Université M'hamed BOUGARA, Boumerdes ; 2011 ;
- DELAMBALLERIE.G** ; *Boue à base d'huile, collection colloques et séminaires* ; Livre ; Vol 9, IFP Edition ; 1968 ;
- FERHAT.M** ; *Co-adsorption des métaux lourds sur la bentonite modifiée en présence de floculants minéral et biologique* ; Mémoire de magister ; Université Mouloud Mammeri TIZI-OUZOU ; 2012 ;

- FOURAR Karim** ; *Amélioration des propriétés rhéologiques des fluides de forage à base de bio polymères : (application aux puits horizontaux)* ; Mémoire de magister ; Université M'hmed Bougara ; Boumerdes ; 2007 ;
- GARCIA.C , PARIGOT.P** ; *Boue de forage, Institut française du pétrole IFP* ; Livre ; Editions Technip ; 1968 ;
- GARMIA Derafa** ; *Synthèse et caractérisation de montmorillonite modifiée : Application à l'adsorption des colorants cationiques* ; Thèse de magister ; Université Ferhat Abbas - Setif-1- ; 2014 ;
- GHAVAMI Mohammad, HASANZADEEH bashir, ZHAO Qian, JAVADI Sadra, KEBRIA Daryoush Yousefi** ; *Experimental study on microstructure and rheological behavior of organobentonite/oil-based fluid* ; Article ; Journal of molecular liquids ; 2018 ;
- GHAYAZA.M** ; *Réactivité argiles-polluants métalliques : simulation des barrières argileuses des sites des stockages des déchets* ; Thèse de doctorat ; Ecole doctorale sciences et technologies d'Orléans ; 2012 ;
- HONGPING He, YUNFEI Xi, ZHE Ding, RAY L. FROST** ; *Infrared spectroscopy of organoclays synthesized with the surfactant octadecyltrimethylammonium bromide* ; Article ; Journal of Applied clay science ; 2004 ;
- KHODJA Mohamed** ; *Les fluides de forage : Etude des performances et considérations environnementales*, Thèse de doctorat ; Institut national polytechnique de Toulouse ; France ; 2008 ;
- LEITE.I.F, ARAUJO.P. E. R, RAPOSO.C.M.O, SILVA.S. M. L** ; *Influence of the purification of the bentonite for the synthesis of organophilic clay* ; Universidade Federal de Campina Grande, UFCG ; Journal of Polymer ; 2005 ;
- MARTIN.M** ; *Caractéristiques rhéologiques et composition des boues de forage* ; Conférence ; Comité technique de la société hydrotechnique de France ; Mars 1970 ;
- MEHDI Fatima** ; *Modification de la bentonite par un sel de diphosphonim – Applications à l'adsorption des colorants textiles (rouge, bleu et jaune Bemacide)* ; Mémoire de magister, Université abou bekr belkaid-Tlemcen ; 2014 ;

- MIDOUX.N** ; *Mécanique et rhéologie des fluides en génie chimie*, Journal of Lavoisier ; 3eme édition ;
- MILPARK.c** ; *Manuel technique de forage* ; Livre ; Tome I ; Edition 1990 ;
- MOULAHCENE Fatiha** ; *Elaboration et Caracterisation de nanocomposites cellulose/montmorillonite* ; Mémoire de magister, Université M'hamed bougara Boumerdes, 2008 ;
- MOUSSAOUI Zouhey** ; *Intercalation de dendrimères à travers la bentonite sodique* ; Mémoire de magister ; Université abou bekr belkaid-Tlemcen ; 2012 ;
- RAGOUILLIAUX Alexandre** ; *Etude rhéophysique de systèmes émulsions inverses / argile organophile. Applications aux boues de forage pétrolier ; Dynamique des Fluides* ; Université Pierre et Marie Curie - Paris VI ; 2007 ;
- RAGOUILLIAUX.A, OVARLEZ.G, SHAHIDZADEH-BONN.N, HERZHAFT.B, PALERMO.T, COUSSOT.P** ; *Transition from a simple yield-stress fluid to a thixotropic material* ; Article ; Journal of Physical Review E 76, 051408 ; 2007 ;
- SAFI Ibrahim**, *Contribution à l'étude de l'amélioration des propriétés physico-chimique et rhéologiques de la boue salée saturée alourdie lors du forage de la phase 8<sup>1/2</sup> (Gisement Hassi Masoued)* ; Mémoire de Magister ; Université de Boumerdes, 2002 ;
- YAPAR.S ; Yilmaz.N**, *Adsorption properties of tetradecyl- and hexadecyltrimethylammonium bentonites* ; Article ; Journal of Applied clay science ; 2004 ;
- ZHIJIN Gong, LIBING Liao, GUOCHENG Lv, XIAOYU Wang** ; *A simple method for physical purification of bentonite* ; Article ; Journal of Applied clay science ; 2016 ;
- ZIDELKHEIR.B, ABDELGOAD.M** ; *Effect of surfactant agent upon the structure of montmorillonite x-ray diffraction and thermal analysis* ; Article ; Journal of Thermal Analysis and Calorimetry ; 2008.



## Résumé

Notre travail porte sur la valorisation de la bentonite Algérienne dans la formulation des boues de forage à base d'huile. Généralement la bentonite est parmi les substances les plus utilisées dans le contrôle rhéologique lors de la circulation de la boue de forage pétrolier. Avant son utilisation, l'argile doit subir des procédés de traitement afin d'obtenir une argile organophile.

Les résultats obtenus par les analyses de caractérisation et les tests rhéologiques sont très satisfaisants ; ce qui incite à penser à l'utilisation de bentonite Algérienne dans les boues de forage.

Mots clefs : Bentonite, Montmorillonite, Traitement organophile, Boue de forage, Viscosité, Thixotropie.

## Abstract

Our work focuses on the valorization of Algerian bentonite in the formulation of oil-based drilling muds. Generally, bentonite is among the most used substances in the rheological control during the circulation of oil drilling mud; For this, the clay must undergo treatment processes in order to obtain an organophilic clay.

The results obtained by the characterization and rheological tests are very satisfactory; which makes us think of the use of Algerian bentonite in drilling muds.

Key words: Bentonite, Montmorillonite, Organophilic treatment, Drilling mud, Viscosities, Thixotropy.

## المخلص

يركز عملنا على تبيين البنتونايت الجزائري في صياغة طين الحفر القائم على الزيت. عموما ، البنتونايت هو من بين أكثر المواد المستخدمة في التحكم الريولوجي أثناء دوران طين الحفر النفطي. لهذا ، يجب على الطين الخضوع لعمليات المعالجة من أجل الحصول على طين عضوي.

النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق التوصيف والاختبارات الريولوجية مرضية للغاية. مما يحفزنا في استخدام البنتونيت الجزائري في إعداد طين الحفر.

الكلمات المفتاحية: البنتونيت ، المونتموريلونايت ، المعالجة العضوية ، طين الحفر ، اللزوجة ، التسغيل.