

N° Ordre..../FSI/UMBB/2018

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES**



Faculté des sciences de l'ingénieur

**Mémoire de Master**

Présenté par :

**GUELIL AHMED FETHALLAH**

**LAMARA MED MOUNIR**

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

**Filière : Génie des procédés**

**Option : Génie des polymères**

---

**Formulation d'une suspension à base de bentonite calcique/MMH**  
**destinée aux fluides de forage à base d'eau**

---

**Devant le jury composé de :**

**Président**

**M<sup>f</sup>TazroutMansour M.C.AUMBB Examinateur**

**M<sup>f</sup>KheribetRabia M.C.A UMBB Examinateur**

**M<sup>f</sup>KouiniBenaliaM.C.AUMBB Examinateur**

**M<sup>f</sup>BenmounahAbdelbakiProfesseur UMBBPromoteur**

**M<sup>f</sup>Akkouch Ali I.N.GUMBB Co-Promoteur**

Année Universitaire 2017/2018

## **Remerciements**

*Tout notre gratitude, grâce et remerciement vont à « **ALLAH** » le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.*

*Ce travail a été réalisé au laboratoire d'analyse **BASP** (Baroid Algeria de Service aux puits) Haliburton-ENSP compagnie **Hassi Messaoud**.*

*Nos grand et chaleureux remerciements vont à notre promoteur **M. Abdelbaki Benmounah**, pour son aide, ses conseils, et ses encouragements le long de la rédaction.*

*Nous remercions ainsi notre copromoteur **M. ALLI AKKOCHÉ** pour son aide ses conseils, et ses encouragements.*

*Nous exprimons nos sincères remerciements à **M<sup>r</sup> SALMI YAZID** Area Manager du **BASP** de nous avoir proposé et accordé notre stage de fin d'études.*

*Nous tenons à remercier **BAHOTsamia** Manager du laboratoire **BASP**, ainsi que l'ingénieur du laboratoire **BASP**, **M<sup>r</sup> MEKKTI Zine Eddine** pour leurs encouragements et leurs conseils.*

*Nous avons un grand plaisir à remercier les enseignants et les personnels du **département de génie des procédés industriel**.*

*Nous remercions enfin les membres de nos deux **familles** respectives et nos **ami(e)s** pour leur présence à nos côtés.*

## Dédicace

Je dédie ce modeste de travail à :

Mon père et ma mere

Mon frère Bencheikh Mohamed et sa famille et ces enfants anis  
houssemsabriidouuuuuuu

monfrere amine et sa famille mohamedsghir et abderahmane et sa famille hiba

khoya w machisahbi hamza guellilrabiychafihinchallah

ma sœurs et sa famille kamal et abdou mimi nazih

mes sœurs et et leurs marié

Le premier contributeur à mon succès Yamanihouria

spécial dédicace a lab manager madame samiabahot et mekti zinne son oublie el hadj  
abdelhakimmadjdoub

el hadj rahmounimohamedrochdi

ahanihbibi et a tout la famillezenzana

biensur tout lequipeeur lcsi sou abdouyazidhasnaoui et ramdani et chenoufi

mes camaradesmansourtarekdakaazizoussama nounou  
hassanwahidabdoukhiereddineahmedchrier et sa femme

Tout le respect et l'appréciation pour vousmrbenasermounir

Tous ceux qui ont contribué à ce travail mesabrina et djawhar et fatiha

spécial dédicace a yasminezitouni

El binôme khoya w machisahbi panini

L'homme qui a contribué à tout ce succès était l'homme qui m'a aidé

Co promoteur et l'encadreur mrakkoucheali

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*\* À ma mère **Nadia** en témoignage de mon affection et mon admiration pour son courage et sa dignité et à qui je ne saurai jamais exprimer toute ma reconnaissance...*

*\* À mon père **omar** qui m'a tout donné et qui a su de ses précieux conseils m'inspirer le sens de la dignité du courage et du travail, qu'il trouve ici l'accomplissement de tous ses vœux...*

*\* À tous les enseignants qui ont participé de loin ou de près à ma formation.*

*\* À mes 2 frères , et ma sœur, à qui je souhaite beaucoup de réussite.*

*\* À mes ami(e)s: **DJAMAL** , **lamine**, **souhil**, **adel**, **Mohamed chabchoub** , **emoh** , **khaled**, **sofian**, **rayt** , **yousra** , **yousef** et mon **binom fathi** et camarades en témoignage de mes plus profondes amitiés et ma sincère sympathie.*

*\* À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Sommaire

# Sommaire

<i>Introduction générale</i> .....	i
------------------------------------	---

## *Partie Bibliographique.*

### *Chapitre I: Les fluides de forage.*

I. Introduction .....	1
II. Définition .....	1
III. Fonctions des fluides de forage .....	2
IV. Composition des différents types .....	2
V. Formulation des boues de forage .....	5
VI. Contrôle et caractérisation des propriétés .....	5
A. Paramètres physiques et chimiques .....	6
B. Paramètres rhéologiques .....	8
VII. La rhéologie des fluides de forage .....	9
1. Notion de mouvement laminaire de cisaillement .....	9
2. Contrainte de cisaillement .....	9
3. Déformation e vitesse de cisaillement .....	10
4. Equation d'état .....	11
5. La viscosité.....	11
6. Typologie de l'écoulement.....	12
7. Les fluides viscoélastiques.....	16
8. Rhéométrie.....	16

### *Chapitre II : Les Polymères.*

I. Introduction.....	19
II. Définition .....	19
III. Classification des polymères .....	20
IV. Adsorption des polymères.....	21
V. Evolution des familles de polymères utilisés dans le forage.....	22
➤ Les principaux polymères utilisés dans les formulations étudiées.....	24

### *Chapitre III : Les Argiles.*

I. Introduction .....	31
II. Les matériaux Argileux.....	31
III. Classification des Argiles.....	33
IV. Les Smectites.....	35
V. Microstructure de la Bentonite.....	37
VI. Les suspensions Argileuses.....	42
1. Définition .....	42
2. Le mouvement brownien et la gravité.....	43
3. Interface minéral-solution.....	44
4. Les forces dans une suspension .....	45
5. Adjuvants : Cas des polymères.....	49

## ***Partie Expérimentale***

### ***Chapitre IV***

Méthodologie et objectif du travail pratique.....	50
I. Etude Rhéologique et Stabilité des Suspensions destinées à la fabrication des Boues de forage.....	51
1. Caractérisation de la bentonite.....	51
2. Etude de l'effet des polymères sur les propriétés physico-chimique et rhéologique...	52
A. Caractéristiques rhéologiques des solutions de polymères.....	52
➤ Solution de Xanthane (XCD).....	52
➤ Solution de PAC R.....	54
➤ Solution de CMC LV.....	56
➤ Solution de PHPA.....	58
B. Effet du sel sur les propriétés rhéologiques.....	60
➤ Solution de 2g/l XCD + KCL.....	60
➤ Solution de 10g/l PAC + KCL.....	62
➤ Solution de 5g/l CMC LV + KCL.....	63
3. Suspension de Bentonite.....	65
A. L'effet des polymères sur les suspensions bentonitiques .....	65
➤ L'effet de XCD sur les suspensions bentonitiques.....	65
➤ L'effet de PAC R sur les suspensions bentonitiques.....	68
➤ L'effet de CMC LV sur les suspensions bentonitiques.....	70
➤ L'effet de PHPA sur les suspensions bentonitiques.....	72
B. L'effet de KCL sur les suspensions bentonitiques.....	74
II. Etude des caractéristiques physicochimiques et rhéologiques des fluides de forage : Application à la boue au polymères/KCL.....	76

***Conclusion générale et recommandations.***

***Références Bibliographiques.***

# Liste des abréviations

## Liste des abréviations

$\sigma$  : Contrainte de cisaillement (Pa).

$F$  : Force (N)

$A$  : Surface ( $m^2$ )

$\mu_N$  : Viscosité newtonienne (Pas)

$y$  : Vitesse de cisaillement ( $s^{-1}$ )

$\tau_0$  : Contrainte seuil (Pa)

$\eta_\infty$  : Viscosité infinie (Pa.s).

$K$  : Consistance de la structure

$n$  : Paramètre adimensionnel compris entre 0 et 1 et pouvant être considéré comme une indice de structure

$\eta_0$  : La viscosité au cisaillement zéro

$\eta_\infty$  : La viscosité à l'infini de cisaillement

$m$  : Constante de taux (cross)

$C$  : Constant du temps de cross (ou parfois de la consistance).

$d$  : densité.

$RE$  : rapport d'eau.

$T_{solide}$  : Température de solide.

$V_{liquide}$  : Volume de liquide

$V_{huile}$  : Volume d'huile.

$V_{eau}$  : Volume d'eau.

**HPHT** : Haute Pression Haute Température.

**API** : American Petroleum institut.

**PM** : Phénophtaléine de la boue : détection de la boue par le phénophtaléine.

**PF** : Phénophtaléine de filtrat

$\mu$  : micro mètre.

**WBM** : Water Base Mud (boue de forage à base d'eau)

**CMC** : Carboxyle Methyl Cellulose

**PAC** : Poly Acrylamide Partiellement

Hydrolysé **PHPA** : Poly Acrylamide

Partiellement Hydrolysé **F<sub>M</sub>** : Force Maximum

**Yield Value** : la valeur de la force de cisaillement

**Bc** : bentonite calcique

**NaCl** : Chlorure de Sodium

**CaSO<sub>4</sub>** : Sulfate de Calcium

**CaCl<sub>2</sub>** : Chlorure de Calcium

**KCl** : Chlorure de Potassium

**CaOH<sub>2</sub>** : LaChaux

**Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>** : Carbonate de Sodium

**NaHCO<sub>3</sub>** : Bicarbonate de Sodium

**CMC** : Additif dans les boues de

forage **NaCO<sub>4</sub>** : Carbonate de

Sodium

# Liste des figures

## *Chapitre I*

Figure I.1 : Cycle du fluide sur le site de forage (Schlumberger, 1997).....	01
Figure I.2 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines.....	09
Figure I.3 : Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles.....	10
Figure I.4 : Courbes d'écoulement de fluides présentant une contrainte critique..	13
Figure I.5 : Courbes d'écoulement des principales catégories de fluides sans contrainte Critique.....	14

## *Chapitre II*

Figure II.1 : Schéma d'adsorption d'une chaîne de polymère sur une surface.....	21
Figure II.2 : Structure primaire de la gomme Xanthane.....	24
Figure II.3 : Structure secondaire de la gomme xanthane à l'état solide (Simon, 2004).....	24
Figure II.4 : <i>Polyacrylamide partiellement hydrolysé (sel de sodium)</i> .....	27
Figure II.5: Structure des anions silicate.....	29
Figure II.6: La polymérisation du silicate monomère et la formation de la barrière physique et chimique à l'invasion de filtrat et de particules.....	30

## *Chapitre III*

Figure III.1: Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2:1.....	32
Figure III.2 : a) <i>Illustration de l'empilement des feuillets d'argile, montrant les surfaces basales, les bordures des particules, ainsi que les espaces interfeuillets.</i> b) <i>Représentation schématique de l'empilement des feuillets unitaires dans une smectite</i> .....	35
Figure III.3 : <i>Représentation schématique de la couche interfoliaire dans le cas de cations interfoliaires hydratés [Jozja (2003)]. [Pédro (1994)]</i> .....	36
Figure III.4 : Structure multi-échelle de la montmorillonite.....	38
Figure III.5 : Différents modes de succession des feuillets au sein d'une unité interstratifiée.....	41
Figure III.6 : <i>Les différents types d'espaces poreux</i> .....	42
Figure III.7: Trois échelles caractéristiques dans une suspension.....	43

Figure III.8 : (a) Structure de la double couche électrique diffuse a la surface d (une particule d'argile, et (b) distribution de la concentration en anions (n-) et les cations (n+) en fonction de la distance de la surface avec une concentration en bloc de no.....	44
Figure III.9 : Représentation de la double couche électrique.....	45
Figure III.10: Potentiels d'interaction de surface en fonction de la distance à la surface.....	47
Figure III.11 : Attraction des particules sous l'effet des forces de van der Waals.....	47
Figure III.12 : Répulsion des particules sous l'effet des forces électrostatiques.....	48
Figure III.13: Représentation schématique de l'évolution de l'énergie d'interaction entre deux particules en fonction de leur distance de séparation.....	49

## *Chapitre IV*

<i>Figure IV.1: Rhéogrammes de suspension 20 kg/m<sup>3</sup> BC + Chaux.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure IV.2:potentiel zeta de suspension 20Kg/m<sup>3</sup>BC + chaux.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure IV. 3 : suspension 20Kg/m<sup>3</sup>BC + 30% chaux.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure IV.4: Rhéogrammes de suspension 30 kg/m<sup>3</sup> BC + Chaux.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure IV.5:potentiel zeta de suspension 30Kg/m<sup>3</sup>BC + chaux.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure IV. 6 : suspension 30Kg/m<sup>3</sup>BC + 30% chaux.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure IV.7: Rhéogrammes de suspension 40 kg/m<sup>3</sup> BC + Chaux.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure IV.8:potentiel zeta de suspension 40Kg/m<sup>3</sup>BC + chaux.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure IV. 9 : suspension 40Kg/m<sup>3</sup>BC + 30% chaux.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure IV.10: Rhéogrammes de suspension 20 kg/m<sup>3</sup> BC + gypse.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure IV.11:potentiel zeta de suspension 20Kg/m<sup>3</sup>BC + gypse.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure IV. 12: suspension 20Kg/m<sup>3</sup>BC + 40% gypse.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure IV.13: Rhéogrammes de suspension 30 kg/m<sup>3</sup> BC + gypse.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure IV.14:potentiel zeta de suspension 30Kg/m<sup>3</sup>BC + gypse.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure IV. 15: suspension 30Kg/m<sup>3</sup>BC + 40% gypse.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure IV.16: Rhéogrammes de suspension 40 kg/m<sup>3</sup> BC + gypse.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure IV.17:potentiel zeta de suspension 40Kg/m<sup>3</sup>BC + gypse.....</i>	<i>61</i>

<i>Figure IV. 18: suspension 40Kg/m<sup>3</sup>BC + 40% gypse.....</i>	<b>62</b>
<i>Figure IV.19: Rhéogrammes de suspension 50 kg/m<sup>3</sup> BC + gypse.....</i>	<b>63</b>
<i>Figure IV.20:potentiel zeta de suspension 50Kg/m<sup>3</sup>BC + gypse.....</i>	<b>63</b>
<i>Figure IV. 21: suspension 50Kg/m<sup>3</sup>BC + 40% gypse.....</i>	<b>64</b>
<i>Figure IV.22: Rhéogrammes de suspension 20 Kg/m<sup>3</sup>BC + 30%Chaux + (MMH).....</i>	<b>65</b>
<i>Figure IV.23 :POTENTIEL ZETA de suspension 20 g/m<sup>3</sup>BC + 30%Chaux + (MMH) .....</i>	<b>65</b>
<i>Figure IV.24 :20 g/m<sup>3</sup>BC + 30%Chaux+15% MMH.....</i>	<b>66</b>
<i>Figure IV.25: Rhéogrammes de suspension 30 Kg/m<sup>3</sup>BC + 30%Chaux + (MMH).....</i>	<b>66</b>
<i>Figure IV.26 :POTENTIEL ZETA de suspension 30 g/m<sup>3</sup>BC + 30%Chaux + (MMH) .....</i>	<b>67</b>
<i>Figure IV.27 :30 g/m<sup>3</sup>BC + 30%Chaux+15% MMH.....</i>	<b>67</b>
<i>Figure IV.28: Rhéogrammes de suspension 40 Kg/m<sup>3</sup>BC + 30%Chaux + (MMH).....</i>	<b>68</b>
<i>Figure IV.29 :POTENTIEL ZETA de suspension 40 g/m<sup>3</sup>BC + 30%Chaux + (MMH) .....</i>	<b>68</b>
<i>Figure IV.30 : suspension 20 g/m<sup>3</sup>BC + 30%chaux+15% MMH.....</i>	<b>69</b>
<i>Figure IV.31: Rhéogrammes de suspension 20 Kg/m<sup>3</sup>BC + 40%GYPSE + (MMH).....</i>	<b>70</b>
<i>Figure IV.32 :POTENTIEL ZETA de suspension 20 g/m<sup>3</sup>BC + 40%gypse + (MMH) .....</i>	<b>70</b>
<i>Figure IV.33 : suspension 20 g/m<sup>3</sup>BC + 30%Chaux+15% MMH.....</i>	<b>71</b>
<i>Figure IV.34: Rhéogrammes de suspension 30 Kg/m<sup>3</sup>BC + 40%GYPSE + (MMH).....</i>	<b>71</b>
<i>Figure IV.35 :POTENTIEL ZETA de suspension 30 g/m<sup>3</sup>BC + 40%gypse + (MMH) .....</i>	<b>72</b>
<i>Figure IV.36 : suspension 30 g/m<sup>3</sup>BC + 30%Chaux+15% MMH.....</i>	<b>72</b>
<i>Figure IV.37: Rhéogrammes de suspension 40 Kg/m<sup>3</sup>BC + 40%GYPSE + (MMH).....</i>	<b>73</b>
<i>Figure IV.38 :POTENTIEL ZETA de suspension 40 g/m<sup>3</sup>BC + 40%gypse + (MMH) .....</i>	<b>73</b>
<i>Figure IV.39 : suspension 30 g/m<sup>3</sup>BC + 30%Chaux+15% MMH.....</i>	<b>74</b>
<i>Figure IV. 40 : Schéma de filtre-presse API.....</i>	<b>76</b>
<i>Figure IV. 41 : photo de filtre-presse API.....</i>	<b>78</b>

<i>Figure IV. 42 : photo de la mesure du cake 40 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH + 15 kg/m3 de starch modifier.....</i>	<b>80</b>
<i>Figure IV. 43 : filtration API pour 50 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH.....</i>	<b>81</b>
<i>Figure IV. 44: photo de la mesure du cake 40 kg BC + 40 %GYPSE +15% MMH + 22 kg/m3 de starch modifier.....</i>	<b>84</b>

# Liste des tableaux

# Chapitre I

<i>Tableau I.1: Principaux additifs utilisés dans les fluides de forage.....</i>	03
<b>Tableau I.2 : Quelques ordres de grandeur des valeurs de viscosité de différents matériaux à température ambiante.....</b>	11
<i>Tableau I.3 : Modèles rhéologiques décrivant l'écoulement de fluides à contrainte critique.....</i>	13
<i>Tableau I.4 : Lois rhéologiques de fluides ne présentant pas de contrainte critique.....</i>	14
<i>Figure I.6 : Boucles d'hystérésis de fluides thixotropes.....</i>	17

# Chapitre II

<b>Tableau II.1: Représentation schématique des structures de polymères.....</b>	21
--	----

# Chapitre III

<b>Tableau III.1 : Classification des phyllosilicate 2:1.....</b>	34
---	----

# Chapitre IV

<i>Tableau IV.1: Composition chimique de la bentonite calcique.....</i>	51
<i>Tableau IV.2: Composition minéralogique de la bentonite.....</i>	51
<i>Tableau IV. 3 : de filtration API et HPHT pour 20 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH.....</i>	78
<i>Tableau IV. 4 : de filtration API et HPHT pour 30 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH.....</i>	79
<i>Tableau IV. 5 : de filtration API et HPHT pour 40 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH.....</i>	80
<i>Tableau IV. 6: filtration API et HPHT pour 50 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH.....</i>	81
<i>Tableau IV. 7 : de filtration API et HPHT pour 20 kg BC + 40 %GYPSE +15% MMH.....</i>	82
<i>Tableau IV. 9 : de filtration API et HPHT pour 40 kg BC + 40 %GYPSE+15% MMH.....</i>	83
<i>Tableau IV. 6: filtration API et HPHT pour 50 kg BC + 40 %GYPSE+15% MMH.....</i>	84

# **Introduction générale**

***Introduction générale :***

Les argiles présentent un intérêt croissant car leurs applications industrielles ne cessent de se diversifier. L'argile qui fait l'objet de ce travail est connue sous le nom de "bentonite", largement utilisée dans de nombreux secteurs industriels. Sous sa forme pâteuse ou à l'état de poudre, ce type d'argile est employé dans la réalisation de barrières étanches pour les déchets industriels, ménagers (géomembranes bentonitiques) et radioactifs (barrières ouvragées, poudre compactées). La bentonite est utilisée également dans l'industrie agroalimentaire et dans la composition des produits cosmétiques et pharmaceutiques... A l'état liquide, la bentonite joue généralement le rôle d'un composant "viscosifiant" dans les boues de forage des puits pétroliers.

Dans une boue de forage à base d'eau, la bentonite n'est pas le seul élément viscosifiant. Des polymères sont souvent ajoutés au fluide de forage pour lui conférer les propriétés adéquates lui permettant de remplir de nombreuses fonctions et donc, de permettre un bon déroulement des opérations de forage. La boue de forage doit tout d'abord créer une pression hydrostatique permettant d'assurer la stabilité des parois forées et d'empêcher la venue de fluides provenant des nappes souterraines traversées. Elle doit également former un "cake" pour limiter la filtration vers la paroi poreuse, permettre de remonter à la surface les déblais de la roche broyée par le trépan et assurer leur maintien en suspension lors de l'arrêt des opérations de forage par sa capacité de former une structure tridimensionnelle au repos.

En effet, l'addition de polymères aux fluides de forage provoque une modification importante des propriétés rhéologiques. En général, les lois de comportement de ces matériaux s'avèrent complexes en raison, notamment, de leur caractère thixotrope, rhéofluidifiant à seuil et de leur rigidité qui leur confère un comportement viscoélastique. La bonne connaissance des propriétés rhéologiques du fluide, ainsi que la compréhension des interactions de nature physicochimique au sein de ces systèmes colloïdaux chargés sont des éléments précieux pour adapter la composition du fluide aux conditions de forage. La littérature actuelle est très riche de contributions traitant, d'une part, les propriétés rhéologiques et colloïdales des suspensions d'argile (sans et avec additif) et, d'autre part, la nature des interactions entre leurs composantes. Néanmoins, la relation entre les propriétés rhéologiques et la micro-structure de ces suspensions n'a pas été bien établie, notamment pour les mélanges "argile-additif anionique" utilisés souvent dans la formulation des fluides de forage.

L'objectif principal de ce travail est de valoriser la Bentonite Algérienne (Gisement de Mostaganem) et d'aboutir une caractérisation des propriétés rhéologiques de complexes Bentonite-additif, ainsi formuler une boue de forage à base d'eau (WBM) en utilisant notre Bentonite comme l'un de ses constituants.

Nous présentons ce travail en deux grandes parties :

**Partie I :** *Partie bibliographique*, organisée autour de trois chapitres

- I) Les fluides de forage.
- II) Les polymères.
- III) Les Argiles.

**Partie II :** *Partie expérimentale*, articulée autour d'un seul chapitre comprend deux axes principaux :

**I-** Étude rhéologique et stabilité des suspensions destinées à la fabrication des boues de forage, dans cette partie :

**En premier lieu**, Etude de l'effet de la chaux sur les caractéristiques rhéologiques et physico-chimiques des suspensions bentonite calcique.

**En second lieu**, Etude de l'effet de gypse sur les caractéristiques rhéologiques et physico-chimiques des suspensions Bentonite Calcique.

**En troisième lieu**, Suspension bentonite calcique + Chaux : étude de l'effet de mixte métal hydroxydes (MMH) sur les propriétés rhéologiques et physico-chimiques.

**En Quatrième lieu**, Suspension bentonite calcique + Gypse : étude de l'effet de mixte métal hydroxydes (MMH) sur les propriétés rhéologiques et physico-chimiques,

**II-** Effet de réducteur de filtrat API/HBHT sur les propriétés rhéologiques de la suspension bentonite calcique/MMH.

Puis on termine par une conclusion générale et des recommandations.

***Chapitre I: Les fluides de forage.***

**I. Introduction :**

Le forage pétrolier fait partie de l'ensemble des opérations nécessaires pour localiser et extraire de la roche réservoir les hydrocarbures présents dans le sous-sol.

Plusieurs forages sont nécessaires pour aboutir à l'exploitation d'un gisement : forages d'exploitation pour confirmer la présence d'hydrocarbures, forages d'évaluation qui permettent d'estimer la viabilité économique du développement, et enfin les puits de développement qui aboutissent à la mise en production.

Le succès d'une opération de forage est assuré par plusieurs facteurs dont le choix du fluides de forage lesquels sont classés dans la famille des fluides complexes du fait de leur nature même (ces fluides peuvent être des émulsions/suspensions de divers constituants) dont les fonctions sont multiples (refroidir et lubrifier l'outil au cours du forage, maintenir les parois du puits, maintenir les déblais en suspension, assurer la remontée des déblais, ...). La connaissance et le contrôle des propriétés rhéologiques des fluides de forage ont donc une incidence majeure sur le bon déroulement d'une opération de forage. Ces fluides appelés classiquement « boues » présentent un comportement non newtonien ; ils sont habituellement rhéo-fluidifiants, thixotropes et fortement thermo-dépendants, et ceci à différents niveaux suivant le type de boue et les conditions d'utilisation.

**II. Définition :**

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 était déjà présenté en 1933 lors du premier Congrès Mondial du Pétrole, où il a fait l'objet de cinq communications (Darley et Gray, 1988). Le premier traité sur les fluides de forage a été publié en 1936 par Evans et Reid. 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 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 des 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. Il est ensuite réutilisé (Landriot, 1968).

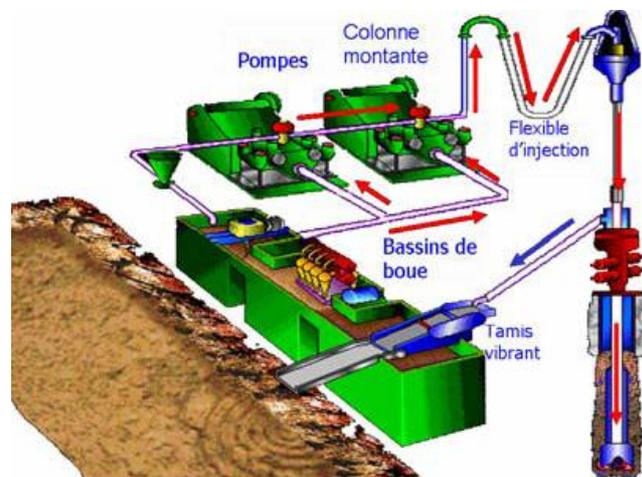


Figure I.1 : Cycle du fluide sur le site de forage (Schlumberger, 1997)

### **III. Fonctions des fluides de forage :**

La plupart des manuels sur les fluides de forage énumèrent entre 10 et 20 fonctions assurées par ces fluides dans le puits (**Chillingarian et Vorabutr, 1983; Darley et Gray, 1988**). En général, les principaux rôles du fluide de forage sont:

- Assurer la remontée des déblais du fond du puits jusqu' à la surface par la circulation d'un fluide visqueux dans l'espace annulaire. Ces déblais donnent des informations géologiques sur les formations traversées lors du forage.
- Maintenir les déblais en suspension lors d'un arrêt 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.
- Refroidir et lubrifier l'outil pour éviter l'usure rapide des pièces métalliques en mouvement.
- Maintenir les parois du puits en raison de la pression hydrostatique exercée par le fluide en écoulement et permettre de contrôler la venue des fluides des formations rocheuses traversées.

Du fait de cette différence de pression, le fluide va "filtrer" dans les formations perméables et déposer un film sur la paroi appelé "**cake de filtration**". Ce gâteau permet de réduire la perméabilité des parois et d'isoler le fluide de forage de la formation mais ne doit pas être épais afin d'éviter une diminution du diamètre nominal du trou et un risque de coincement de l'outil. Le fluide de forage joue donc un rôle déterminant dans la résolution du problème de stabilité des parois du puits de par sa densité mais également de par sa capacité à former une barrière limitant les transferts de fluides entre l'espace annulaire et la formation.

- Enfin la boue ne doit être ni corrosive ni abrasive pour l'équipement, ni toxique ou dangereuse pour le personnel et elle ne doit pas présenter de risque d'incendie.

A la fin des années 1950, l'utilisation sur chantier d'une grande variété de produits soumis à des spécifications rigoureuses réglementant les propriétés des fluides, a permis de développer la chimie des fluides de forage. Cependant, il a été impossible de lier automatiquement les problèmes du forage aux fluides, vu la complexité des problèmes liés aux argiles.

Depuis les années 1990, les contraintes environnementales et les restrictions gouvernementales limitant l'utilisation des produits toxiques et non biodégradables, un intérêt particulier a été apporté à de nouveaux types de fluides.

### **IV. Composition des différents types :**

Historiquement, les fluides de forage ont évolué d'un simple mélange d'eau et d'argile appelé "boue " vers des systèmes de plus en plus complexes composés d'eau ou huile avec une multitude d'additifs répondant aux caractéristiques requises et aux problèmes rencontrés. Les fluides de forage sont des fluides complexes classés en fonction de la nature de leurs constituants de base. Traditionnellement, les fluides de forage ont été classés en trois catégories selon le fluide de base utilisé dans leur préparation : l'air, l'eau ou l'huile (**Ryan et Chillingar, 1996**).

Les propriétés exigées des boues de forage sont multiples et peuvent parfois même être contradictoires.

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

(Economides et al., 1988, Tableau I.1).

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

01	Contrôleur d'alcalinité	11	Lubrifiant
02	Bactéricides	12	Décoinçant
03	Anti calcium	13	Inhibiteur de gonflement des argiles
04	Inhibiteur de corrosion	14	Produits facilitant la séparation
05	Anti mousse	15	Stabilisateur haute température
06	Agent moussant	16	Défloculant
07	Emulsifiant	17	Viscosifiant
08	Réducteur de filtrat	18	Alourdissant
09	Floculant	19	Fluides de base aqueux (saumure)
10	colmatant	20	Fluides de base oléagineux

#### **A. Les fluides à base d'eau:**

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 (30 à 60 g/L) dont les caractéristiques rhéologiques et de filtration sont souvent ajustées par des polymères. Le nature électrolyte et leur concentration dans les formulations de boues à l'eau sont choisis en prenant en compte les caractéristiques de la formation (activité de l'eau des formations argileuses, dissolution des formations salines).

Parmi les additifs on peut trouver :

- ✓ Des **viscosifiants**: argiles naturelles (souvent des bentonites), polymères synthétiques ou biopolymères.
- ✓ Des **réducteurs de filtrat** servant à consolider le cake de filtration pour limiter l'invasion par le fluide: amidons, carboxyméthylcelluloses ou CMC, celluloses polyanioniques (PAC), ou résines.
- ✓ Des **inhibiteurs de gonflement** et de dispersion des argiles: KCl, glycérol, silicates ou divers polymères comme le polyacrylamide partiellement hydrolysé (PHPA), les polyalkylène glycols (PAG).
- ✓ Des agents **alourdissants** comme la barytine ("barite" ou sulfate de baryum BaSO<sub>4</sub>) et la calcite (carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>) qui sont les plus utilisés pour assurer à la boue une densité convenable. On note aussi l'utilisation de l'hématite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ou de la galène (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), des fibreux (fibres de bois, canne à sucre), et des lamellaires (coquilles d'huîtres, céréales) (Herzhaft, 2001; Peysson, 2004).

**B. Les fluides à base d'huile :**

L'origine de l'utilisation de l'huile dans les fluides de forage remonte aux premiers forages effectués à **Oklahoma City (1934-1937)** au cours desquels on a constaté une amélioration des performances de forage après ajout de l'huile brute (**Lummus et al., 1953**). 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 de l'eau. Par définition les fluides de forage à base d'huile contenant plus de 5% d'eau sont appelés boues de forage en émulsion inverse ; avec moins de 5% d'eau, on a les boues à l'huile (**IDF, 1988**). Ces fluides sont souvent désignés par "Oil-Base Mud" 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 d'huiles minérales ou "synthétiques", ne contenant plus de composés aromatiques. Des agents émulsifiants et mouillants sont alors utilisés pour favoriser la stabilité de l'émulsion.

Les propriétés rhéologiques (thixotropie) de cette émulsion sont ajustées par l'addition d'agents viscosifiants, généralement des argiles organophiliques. Les formulations peuvent contenir également des agents réducteurs de filtrat (composés asphalténiques et polymères) 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.

**C. Forage à l'air :**

L'air est le fluide de forage qui possède la plus basse densité et le prix de revient le moins élevé, mais le forage à l'air qui a commencé en 1940, devient difficile lors de venues importantes d'eau. Il apporte une solution à des problèmes compliqués parfois impossibles à résoudre avec les méthodes de forage à la boue conventionnelle. Il est recommandé dans le cas des pertes totales répétées de la boue lors de la circulation ainsi que dans le forage des couches productrices sous faible pression. En Algérie, les premiers forages à l'air ont été réalisés entre 1954 et 1960 dans la région de Tebessa sur les puits Djebel Foua, Djebel Onk (**Abid, 1995**) suite aux pertes importantes rencontrées dans la région (**S.N.Repal, 1961**).

D'autres forages ont été réalisés en 1970 à Djebel Lazreg. D'une façon générale, le forage à l'air a réduit le coût du forage de 50 à 60% par rapport au forage à la boue dans le bassin (**Hannachi, 1972**).

**D. Forage à la mousse :**

Les mousses sont des dispersions d'un volume de gaz (relativement) important dans un volume de liquide relativement faible. Elles sont utilisées comme fluides de forage lorsque les terrains traversés sont fracturés, ou lorsque le forage à l'air est impossible parce que la pression nécessaire ne peut être fournie sur le chantier.

L'avantage du forage à la mousse se résume par sa faible pression hydrostatique au fond et par son excellent pouvoir de remontée des déblais à moins que la mousse ne refroidisse pas convenablement les terrains traversés ainsi que le train de sonde et ne contrôle pas la tenue des parois du puits (pas de cake).

Des problèmes de sécurité au sujet de l'utilisation de la mousse en réservoir sont à signaler, notamment des explosions dans le cas où le volume d'hydrocarbures gazeux est compris entre 3 et 10% par rapport à l'air. C'est le cas en 1992, du puits RB-13 en Algérie, où lors d'une opération de reprise de puits (de "work-over") avec une boue à la mousse pour éviter les pertes de circulation, une explosion s'est produite suite à une contamination de la boue par une venue d'huile ou de gaz (Abid, 1995).

#### **E. Forage à la boue aérée :**

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

#### **V. Formulation des boues de forage :**

Les boues de forage sont donc des formulations extrêmement complexes comprenant des additifs de fonctions multiples. Pour éviter des problèmes de reproductibilité sur chantier, la profession a normalisé la préparation et la caractérisation des fluides de forage par les normes éditées par l'API (American Petroleum Institute), pour la formulation sur site et au laboratoire pour la caractérisation des propriétés. La formulation proprement dite de la boue est optimisée (généralement par le fournisseur des produits), le temps et l'ordre d'agitation de chaque produit étant défini. Au laboratoire, sont utilisés des agitateurs normalisés (exemple, Hamilton Beach mixer pour les boues à base d'eau) alors que sur site, le mélange se fait dans des bacs à boues soumis à agitation.

Chaque formulation spécifique est caractérisée et optimisée en laboratoire avant d'être utilisée, toutefois, la boue subit, au cours de sa circulation dans le puits, de nombreuses contraintes et peut être affectée par des événements liés au forage (venues d'eau, venues de gaz...) ; il est donc important de contrôler les propriétés en cours de forage et en particulier les propriétés rhéologiques, à savoir, la viscosité et la yield point.

#### **VI. Contrôle et caractérisation des propriétés :**

Tout comme la formulation des boues, le contrôle et la caractérisation des boues de forage sont réalisés selon des normes précises éditées par l'API. Là aussi, il faut employer un appareillage spécifique et des protocoles particuliers. Certaines mesures sont réalisées systématiquement sur tous les forages (viscosité, densité, filtration) et d'autres, selon le coût et les possibilités du forage (taux de gaz, alcalinité). Sur site, un responsable boue (appelé le « boueux ») est chargé du contrôle de la qualité de la boue. A partir des mesures réalisées et de ses connaissances, il corrige, si nécessaire, la composition de la boue en « temps réel » en ajoutant certains produits ou en reformulant la boue. Les outils disponibles pour contrôler sur site la rhéologie de la boue sont de deux types : tout d'abord, un outil encore très largement utilisé est le viscosimètre Marsh ; le deuxième type d'appareil utilisé sur chantier est un rhéomètre rotatif FANN 35 réalisant une mesure de contrainte pour 2 ou 6 valeurs du cisaillement selon les appareils. A partir de ces mesures, les normes API imposent de calculer

trois paramètres correspondant à un modèle de Bingham : VP (viscosité plastique), YP (contrainte seuil) et VA (viscosité apparente).

Deux autres mesures sont réalisées afin de caractériser la « thixotropie » de la boue : Gel0 et Gel10 qui sont des mesures de contrainte à très faible vitesse normalisée après, respectivement, 10 secondes et 10 minutes de repos. Ces mesures sont nécessaires et doivent être réalisées si on envisage une application au chantier pour une formulation de boue.

Les conditions existantes sur site doivent être prises en compte lors du contrôle des propriétés et posent des difficultés supplémentaires. Deux exemples peuvent être donnés : tout d'abord, l'information tirée de la mesure est une information « retardée ». En effet, la boue circule dans le puits et une modification éventuelle de la rhéologie du fluide dans le puits ne sera détectée qu'au moment de la mesure en surface, il faut donc prendre en compte ce temps de remontée de la boue. D'autre part, la circulation dans le puits impose des valeurs élevées de pression et de température. Il est donc nécessaire de mesurer ou de prévoir la rhéologie des fluides aux hautes températures et pressions ainsi que la tenue des additifs soumis à ces conditions.

#### **A- Paramètres physiques et chimiques :**

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

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

##### **➤ La densité :**

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

La boue exerce une pression sur les parois du puits donnée par l'expression suivante :

$$P = \frac{h * d}{10}$$

Où :

P : Pression de la formation ; en Kg/cm<sup>2</sup>

h : Profondeur de la couche traversée ; en m

d : Densité de la boue.

➤ **Le filtrat :**

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

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

➤ **Le pH :**

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

Pratiquement, le pH des boues de forage couramment utilisées varie entre 6 et 13,5. Les boues dont le pH est inférieur à 10,5 sont dites à bas pH, celles dont le pH est supérieur à 10,5 sont dites à pH élevé.

Le pH est mesuré :

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

➤ **L'alcalinité :**

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

Une mesure complémentaire s'avère nécessaire, c'est celle des alcalinités. Lorsque le pH apporte la concentration en ions  $H^+$  (ou  $OH^-$ ) libres, la mesure des alcalinités donne les concentrations en bases solubles ou insolubles. Dans les boues de forages, ces bases sont principalement des carbonates, bicarbonates et hydroxydes et à un degré moindre, les silicates, les phosphates, les aluminates et les bases organiques.

Trois alcalinités sont mesurées en pratique : Pb, pf, Mf ; où b signifie boue, f filtrat, p phénolphtaléine, M méthylorange ; le virage à la phénolphtaléine se produit à pH égale à 8,2 et celui du méthylorange est de 4,2.

✓ **L'alcalinité Pb :**

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

✓ **L'alcalinité Pf et Mf :**

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

**B- Paramètres rhéologiques :**

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

➤ **La viscosité plastique (VP) :**

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

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

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

➤ **La contrainte seuil ou « Yield value » (YP) :**

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

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

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

➤ **Gels :**

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

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

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

✓ **Le gel 0.** Il représente la résistance du gel aussitôt après agitation de la boue. Il est mesuré à l'aide du viscosimètre du type FANN35 à une vitesse de 3 tr/min. il est exprimé en lb/100ft<sup>2</sup>

✓ **Le gel 10.** Il représente la résistance du gel après un repos de la boue de 10 minutes, la mesure est faite de la même manière que pour le gel 0. Il est exprimé en lb/100ft<sup>2</sup>.

## VII. LA RHEOLOGIE DES FLUIDES DE FORAGE :

Etymologiquement, la rhéologie est une discipline qui traite de l'écoulement et des déformations des matériaux sous l'action de contraintes. La rhéologie a été développée pour décrire les propriétés de matériaux au comportement mal défini et intermédiaire entre celui du solide élastique parfait et celui du fluide newtonien. Le chapitre qui suit vise à définir les principaux paramètres rhéologiques ainsi que les différents types d'écoulement des fluides.

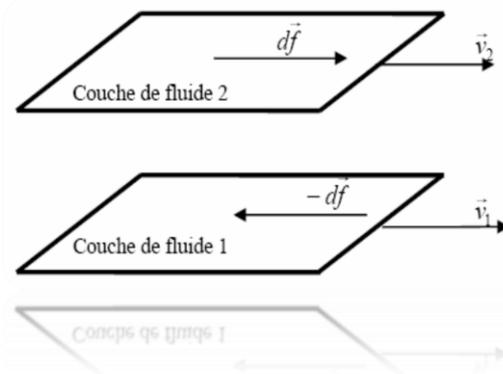
### 1. Notion de mouvement laminaire de cisaillement :

Un matériau soumis à un ensemble de forces est susceptible de se déformer, les mouvements des différents points du matériau dépendant bien entendu de la répartition et de l'intensité des forces appliquées. Un mouvement laminaire de cisaillement est engendré pour certaines distributions de ces forces. Au cours d'un tel mouvement, on considère que le matériau présente une structure en lamelles, en couches adjacentes. La déformation du matériau s'effectue par glissement relatif des différentes couches, sans qu'il y ait transfert de matière d'une couche à l'autre. Les mouvements laminaires de cisaillement sont engendrés à l'aide de rhéomètres. C'est à partir de tels mouvements que peuvent être déterminés les paramètres rhéologiques des fluides.

### 2. Contrainte de cisaillement :

La contrainte de cisaillement (notée  $\tau$ ) est la grandeur dynamique fondamentale en rhéologie. Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, deux couches successives au contact l'une de l'autre se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. Il apparaît à l'interface de ces deux couches des forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche : elles sont appelées force de cisaillement (**figure I.2**).

**Figure I.2 : Forces agissant sur deux éléments de couches voisines.**



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

$$\tau = \frac{dF}{dS}$$

$\tau$ : représente une force par unité de surface ; elle s'exprime en newton par  $m^2$  ou bien plus commodément en Pascal (Pa) et  $dS$  est la surface élémentaire de l'entité considérée.

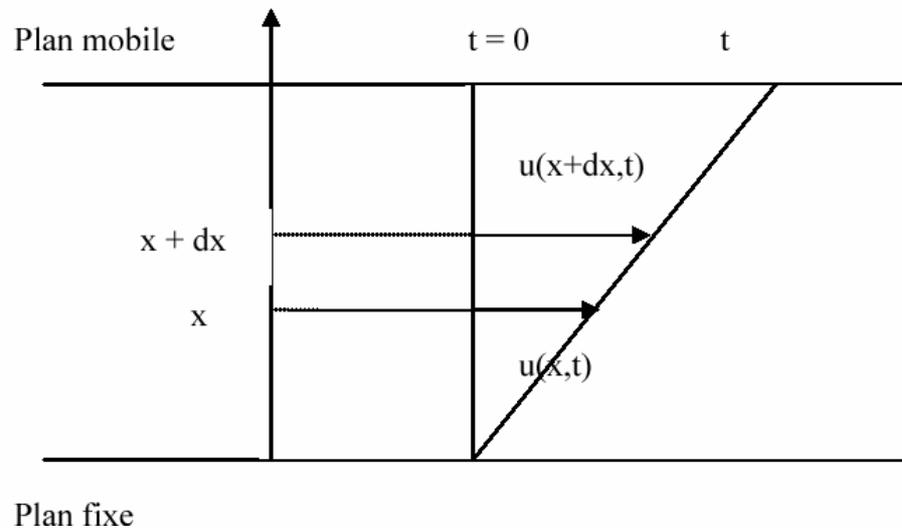
Il est à noter que dans le calcul de la résultante des forces, les forces de pression s'exerçant perpendiculairement à la surface ne sont pas prises en compte, du fait de leur faible valeur en comparaison des forces de cisaillement.

**3. Déformation et vitesse de cisaillement :**

Ces deux grandeurs constituent les grandeurs cinématiques fondamentales en rhéologie.

La définition de la déformation de cisaillement est présentée dans le cas particulier le plus simple d'un mouvement de cisaillement présentant une symétrie plane. Le matériau est cisailé entre deux plans parallèles, l'un mobile, l'autre immobile (**figure I.3**).

**Figure I.3 :**  
**Mouvement laminaire de cisaillement entre deux plans parallèles.**



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

La déformation de cisaillement est définie par l'équation :

$$\gamma = \frac{du(x,t)}{dx}$$

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

L'expression de la vitesse de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ) est donnée par l'équation suivante, il s'agit de la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement :

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

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

**4. Equation d'état :**

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

La détermination de ces paramètres permet, entre autre, d'obtenir la viscosité du fluide étudié (dans le cas des fluides newtoniens), grandeur suffisant bien souvent à caractériser de manière précise le comportement rhéologique du matériau étudié. La viscosité s'exprime en Pa.s, elle est notée  $\mu$ . Le tableau I.2 donne des valeurs de viscosité de substances usuelles à température ambiante.

**Tableau I.2 : Quelques ordres de grandeur des valeurs de viscosité de différents matériaux à température ambiante.**

Matériau	Viscosité (Pa.s)
Air	$10^{-5}$
Eau	$10^{-3}$
Huile d'olive	$10^{-1}$
Glycérine	1
Miel	10
Polymères fondus	$10^3$
Bitume	$10^8$

**5. La viscosité:**

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

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

➤ **La viscosité dynamique ou apparente  $\mu_a$  :**

C'est le rapport de la contrainte par la vitesse de cisaillement correspondante :

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [\text{N.s/m}^2] \text{ ou } [\text{Pa.s}]$$

➤ **La viscosité cinématique :**

$$\nu = \frac{\mu_a}{\rho}$$

$\rho$ : masse volumique du fluide [ $\text{kg/m}^3$ ].

➤ **La viscosité relative, spécifique, intrinsèque :**

Elle est utilisée souvent dans l'étude des solutions ou des suspensions pour déterminer les influences respectives du soluté et du solvant sur le comportement rhéologique.

**6. Typologie de l'écoulement :**

L'écoulement des fluides newtoniens est le cas le plus simple que l'on puisse rencontrer.

Dans ce cas, la vitesse de cisaillement et contrainte de cisaillement sont reliées par une loi linéaire, la pente de la droite alors obtenue en traçant le rhéo-gramme est la viscosité du fluide.

Tous les fluides homogènes pour lesquels la dissipation d'énergie est due aux collisions d'espèces moléculaires relativement petites ont un comportement newtonien (gaz, liquides usuels et solutions de molécules de faible poids moléculaire).

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

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

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

**a. Les fluides indépendants du temps :**

Ce sont des fluides pour lesquels la contrainte de cisaillement  $\tau$  est fonction seulement de la vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}$ . Leur comportement rhéologique est indépendant de la durée d'application de la contrainte. Ce type de fluide est subdivisé en fluide newtonien, non newtonien et fluide viscoélastique.

➤ **Les fluides newtoniens :**

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

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

$\tau$  : Contrainte de cisaillement [Pa].

$\dot{\gamma}$  : Vitesse de cisaillement [s<sup>-1</sup>].

$\mu$  : Viscosité dynamique du fluide [Pa.s].

La viscosité dynamique est indépendante de la contrainte appliquée et du temps. Elle ne dépend que de la température, de la pression et de la nature du fluide.

➤ **Les fluides non newtoniens :**

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

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

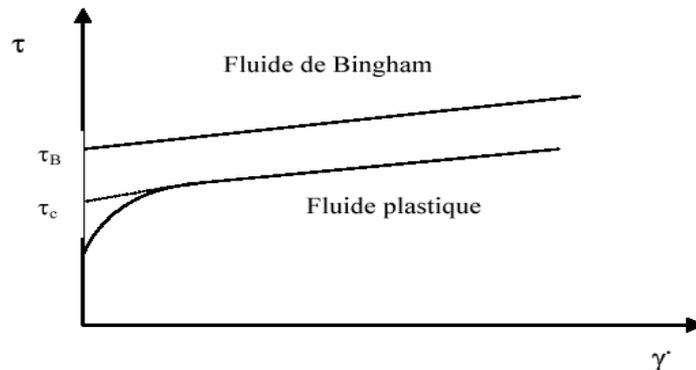
Avec  $\mu_a$  : la viscosité apparente dépendant de la vitesse de déformation [Pa.s].

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

✓ **Fluides à contrainte critique :**

Cette catégorie de fluides est aussi communément désignée par l'appellation fluide plastique, la figure I.4 donne une vue des courbes d'écoulement les caractérisant. Il s'agit de fluides ne s'écoulant pas avant qu'il leur soit appliqué une contrainte de cisaillement minimale appelée seuil d'écoulement  $\tau_c$ . (Figure I.4).

*Figure I.4 : Courbes d'écoulement de fluides présentant une contrainte critique.*



Le tableau I.3 récapitule les principales lois d'écoulement rhéologiques utilisées pour décrire le comportement de tels fluides.

**Tableau I.3 : Modèles rhéologiques décrivant l'écoulement de fluides à contrainte critique (d'après Midoux, 1988).**

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

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

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

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

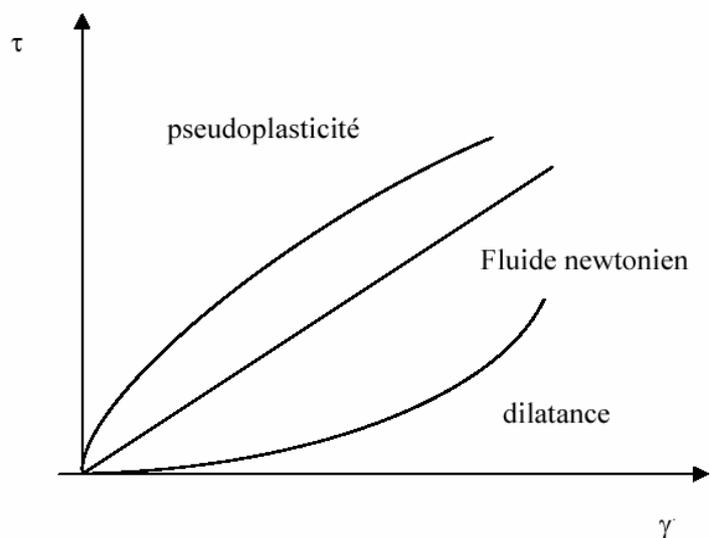
Les suspensions, émulsions, polymères en solution sont constitués au repos de particules de formes irrégulières, gouttelettes ou chaînes emmêlées qui constituent une viscosité élevée car ayant une forte résistance à l'écoulement. Soumis à une contrainte, l'écoulement s'accélère, les particules s'orientent,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

✓ **Fluides sans contrainte critique :**

La figure I.5 présente les courbes d'écoulement des deux principales catégories de fluides sans contrainte critique, à savoir les fluides pseudo-plastiques (ou rhéo-fluidifiants) et les fluides dilatants (ou rhéo-épaississants).

Pour les fluides pseudo-plastiques, le rapport  $\tau/\dot{\gamma} = \mu_a$  (viscosité apparente) est à peu près constant pour les plus faibles valeurs de vitesse de cisaillement imposées et vaut  $\mu_0$ . Ce rapport décroît ensuite progressivement lorsque la vitesse de cisaillement augmente (d'où le nom de rhéo-fluidifiant), jusqu'à atteindre une valeur de viscosité limite ( $\mu_\infty$ ).

**Figure I.5 : Courbes d'écoulement des principales catégories de fluides sans contrainte critique.**



Les principales lois rhéologiques décrivant le comportement de tels fluides sont présentées dans le tableau I.4.

**Tableau I.4 : Lois rhéologiques de fluides ne présentant pas de contrainte critique (d'après Midoux, 1988).**

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

Parmi ces modèles d'écoulement, la loi d'Ostwald de Waele est la plus communément utilisée. Dans ce modèle,  $k$  est appelée la consistance du fluide et  $n$  l'écart de l'exposant (ou indice d'écoulement) à l'unité ( $0 < n = 1$ ) traduit la non perfection visqueuse du fluide considéré. Parmi les fluides présentant un comportement pseudoplastique, on compte les suspensions de particules asymétriques, les ciments, les colles, certaines peintures ...

Les fluides dilatants obéissent également à une loi puissance d'Ostwald mais avec  $n > 1$ , la viscosité apparente croît avec la vitesse de cisaillement qui augmente. Cette catégorie de fluides est beaucoup plus rare que les fluides pseudoplastiques, elle se rencontre essentiellement pour des suspensions à forte teneur en matière solide (concentrations volumiques supérieures à 50 %). Ce type de comportement peut avoir pour origine une transition ordre-désordre entre les particules constitutives du fluide, pour les plus faibles vitesses de cisaillement, les particules sont plus ou moins alignées alors que pour les plus fortes valeurs de vitesse de cisaillement, elles sont dispersées aléatoirement, ce qui induit une viscosité qui augmente lorsque le désordre s'installe au sein du fluide.

**b. Les fluides dépendants du temps :**

Le comportement des fluides dépendant du temps est caractérisé par l'évolution de leur structure interne. Cette modification peut être très rapide; dans ce cas, le temps n'intervient pas de manière apparente dans les équations d'écoulement et la viscosité apparente est fixée uniquement pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement. Par contre, si la modification de la structure interne du fluide est lente, les caractéristiques de l'écoulement du fluide seront influencées par les traitements antérieurs et la viscosité apparente dépendra dans ce cas d'un autre paramètre : « le temps ».

On distingue deux catégories dans ce type de fluide :

➤ **Fluides thixotropes :**

La consistance de tels fluides dépend aussi bien de la vitesse de cisaillement que de la durée du cisaillement. Dans ces conditions, la viscosité apparente n'est plus fixée pour une valeur donnée de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement mais dépend également du paramètre temps. Ainsi, l'écoulement d'un matériau peut être facilité par une agitation préalable de l'échantillon à étudier. La méthodologie utilisée pour déterminer le caractère thixotrope de fluides consiste le plus souvent en l'application d'un cycle de cisaillement montée-palier-descente (cisaillement croissant-cisaillement constant-cisaillement décroissant).

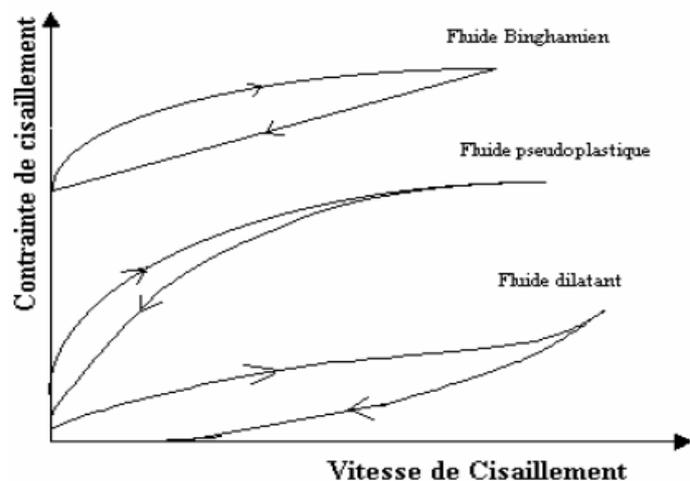


Figure I.6 : Boucles d'hystérésis de fluides thixotropes.

➤ **Fluides rhéopexes :**

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

**7. Les fluides viscoélastiques :**

Le mot viscoélastique veut dire l'existence simultanée des propriétés élastiques et visqueuses dans un matériau. Tous les liquides présentent des propriétés visqueuses, certains possédants une structure complexe peuvent également présenter des propriétés élastiques. Ce comportement se manifeste notamment lorsqu'on applique ou lorsqu'on supprime brutalement un cisaillement par l'apparition d'un régime transitoire pendant lequel la structure de l'échantillon évolue avant de se stabiliser. La détermination des propriétés viscoélastiques de certains matériaux passe par la mise en place d'une analyse oscillatoire. Ce type de test consiste à imposer à l'échantillon un cisaillement oscillatoire de pulsation donnée  $\omega$ . Lors de ces tests, la contrainte  $\tau(t)$  et la vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}(t)$  évoluent sinusoidalement au cours du temps.

**8. Rhéométrie :**

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

- Les rhéomètres à régime permanent, fonctionnant essentiellement comme viscosimètres pour déterminer les viscosités et les rhéomètres  $\tau$ - $\dot{\gamma}$  de substances liquides.
- Les rhéomètres à régime transitoire qui permettent l'étude des propriétés viscoélastiques des matériaux.
- Enfin, les rhéomètres dynamiques fonctionnant en régime sinusoïdal et fournissant une description très complète des propriétés rhéologiques des substances.

**a. Les rhéomètres à régime permanent :**

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

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

- les rhéomètres de type Couette dans lesquels la substance étudiée est cisailée entre deux surfaces solides, l'une au repos, l'autre mobile.
- Les rhéomètres de type Poiseuille dans lesquels le mouvement de cisaillement est engendré par l'application aux extrémités d'un tube cylindrique contenant l'échantillon d'une différence de pression ou encore par l'action de la pesanteur.

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

**i. Rhéomètres de type couette :**

✓ **Rhéomètres plans à translation :**

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

**ii. Rhéomètres rotatifs cylindriques :**

C'est la classe de rhéomètre la plus fréquemment utilisée. Dans ce type la substance étudiée est emprisonnée entre deux cylindres de révolution, coaxiaux, de rayons  $R_1$  et  $R_2$ , et de hauteur  $h$ . le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant à l'un des cylindres un mouvement de rotation uniforme de vitesse angulaire  $\omega_0$ , l'autre cylindre demeurant immobile. La substance se décompose en couches cylindriques coaxiales, animées de vitesses angulaires différentes, variant continûment de 0 (pour la couche en contact avec le cylindre fixe) à  $\omega_0$  (pour la couche en contact avec le cylindre mobile).

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

**iii. Rhéomètres rotatifs à cône/plateau :**

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

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

Le mouvement laminaire de cisaillement est obtenu en communiquant au cône une vitesse de rotation constante  $\omega_0$ , le plateau demeurant fixe. La substance se décompose alors en couches, qui sont constituées par des cônes de révolution de même sommet et de même axe que le cône solide, animées de vitesses angulaires de rotation différentes, variant continûment de 0 (pour la couche en contact avec le plateau) à  $\omega_0$  (pour la couche en contact avec le cône solide). Par suite du mouvement relatif des couches les unes par rapport aux autres, il apparaît en tout point de l'échantillon une vitesse de cisaillement et une contrainte de cisaillement.

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

Notons encore, parmi les avantages de ce type de rhéomètre, le fait que la manipulation ne requiert qu'un très faible volume d'échantillon ; et qu'il permet d'atteindre des vitesses de cisaillement élevées.

Comme inconvénient, on peut indiquer que la symétrie conique de l'écoulement laminaire est très sensible, en particulier à la position du sommet du cône sur le plateau ; et que cet appareil ne convient pas à l'étude des matériaux dont la structure est complexe et fragile, et qui risquent d'être détruits dans le petit volume compris entre le cône et le plateau. La gamme des viscosités susceptibles d'être mesurées est en général voisine de celles des rhéomètres cylindriques.

**b. Les rhéomètres à régime transitoire :**

Les rhéomètres à régime transitoire sont utilisés essentiellement pour déterminer le comportement viscoélastique des matériaux linéaires, aussi bien solide que liquide. Dans tels rhéomètres, on soumet l'échantillon à une sollicitation instantanée, qui est maintenue constante, et l'on étudie son comportement dans les instants qui suivent. Pendant un certain intervalle de temps qui précède l'établissement d'un régime permanent, le matériau manifeste un comportement dépendant du temps : l'étude de ce régime transitoire permet la détermination de ses propriétés viscoélastiques.

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

**c. Les rhéomètres dynamiques (ou oscillants) :**

Dans les rhéomètres dynamiques, les échantillons étudiés sont soumis à des mouvements laminaires de cisaillement d'amplitudes variant sinusoïdalement dans le temps ; On peut distinguer deux types d'appareils selon que le mouvement est entretenu ou non :

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

## *Chapitre II : Les Polymères*

### **I. Introduction :**

Les polymères ont été employés dans les fluides de forage pendant les années 30, quand l'amidon de maïs a été ajouté comme additif pour réduire les pertes de fluide dans les formations poreuses. Depuis cette date, les polymères sont devenus très spéciaux et leur utilisation a augmenté en conséquence. Les polymères font partie pratiquement de chaque système à base d'eau utilisé de nos jours. En effet, quelques systèmes sont totalement à base de polymères dépendant et ils sont largement appelés systèmes de polymères. Une large gamme de polymères est disponible aujourd'hui. Quelques polymères – comme l'amidon, parce que l'exemple provient des sources naturelles. Les polymères les plus spéciaux sont les polymères naturels modifiés, alors que d'autres polymères plus sophistiqués sont dérivés toujours des synthétiques du potentiel illimité de la technologie de polymère, il est possible d'analyser une situation à un niveau moléculaire et concevoir un polymère avec des propriétés spécifiques pour dresser la situation. Pour cette raison, les polymères ont un avenir intéressant dans le domaine des fluides de forage.

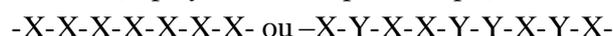
Les polymères hydrosolubles revêtent une grande importance pour de nombreuses applications industrielles. L'industrie pétrolière est en particulier une grande consommatrice de polymères pour les diverses opérations de récupération d'huiles : forage, fracturation, modification de perméabilité, cimentation, colmatage, contrôle de mobilité des phases aqueuses.

Les biopolymères représentent l'une des variétés de polymères tant utilisés dans l'industrie pétrolière, qui sont des molécules produites par des cellules biologiques, y compris des bactéries, et les cellules de plantes et d'animaux. Les biopolymères produits par les bactéries et par d'autres micro-organismes ont un large domaine d'application dans la résolution des problèmes industriels. Par exemple, des biopolymères sont employés comme émulsifiants de nourriture, épaississants, produits pharmaceutiques. Plusieurs applications environnementales se fondent sur des biopolymères. [18]

### **II. Définition :**

Un polymère est un système formé par un ensemble de macromolécules, c'est-à-dire d'entités moléculaires de grande dimension, issues de l'assemblage covalent d'un grand nombre d'unités répétitives plus communément appelées unités (ou motifs) monomères. Ils peuvent se présenter :

- En chaînes linéaires avec une répétition linéaire  $n$  fois du motif  $X$  (homopolymère) ou de deux ou plusieurs motifs (copolymères  $XY$  par exemple).



- En chaîne non linéaire : branchés en étoiles ou en réseau.

Lorsque ces polymères présentent des groupements de charges anioniques ou cationiques, on les appelle des polyélectrolytes.

### **III. Classification des polymères :**

**A. Selon leur origine :** on peut les classer en trois catégories :

- **Les polymères naturels :** Sont issus des règnes végétal ou animal ; les exemples les plus connus, la famille des polysaccharides (cellulose, amidon...) celle des protéines (laine, soie...), le caoutchouc naturel, etc.
- **Les polymères artificiels :** Sont obtenus par modification chimique de polymères naturels, de façon à transformer certaines de leurs propriétés, les esters cellulosiques ont toujours connus une certaine importance économique.
- **Les polymères synthétiques :** Totalement issus du génie de l'homme, sont obtenus par polymérisation de molécules monomères.

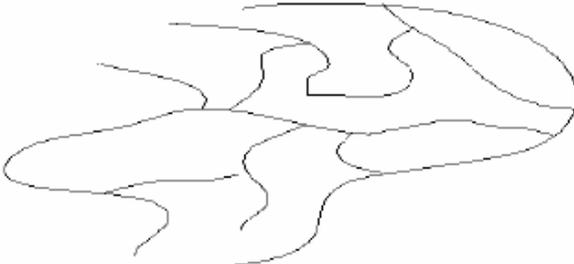
**B. □Selon leur domaine d'application :** il est difficile de proposer une classification exhaustive tout la variété des propriétés a multiplié les applications des polymères, comme matériaux en particulier, polystyrène, les polyamides, les polymères thermostables, adhésifs, etc.

**C. Selon leur structure (dimensionnalité) :** les polymères peuvent encore être classés en trois catégories :

- Celle des polymères linéaires (ou monodimensionnels), pour lesquels chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre élevé mais fini d'unités monomères. De tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents.
- Celle des polymères bidimensionnels, dont certains peuvent être produits par la nature (carbone graphite, kératine...) ; ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels d'épaisseur comparable à celle des molécules simples.
- Celle des polymères tridimensionnels, qui résultent de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ou encore de la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnel), par voie physique ou chimique de polymères linéaires leur dimension moléculaire peut être considérée comme infinie puisque toutes les unités monomères constitutives d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule. Les liaisons se développent dans les trois dimensions. [19]

Les différentes structures des polymères sous lesquelles elles peuvent être rencontrées sont dans le tableau suivant :

**Tableau II.1: Représentation schématique des structures de polymères. [19]**

Type de structure	Schéma de la structure	Exemples
<b>Linéaire ou monodimensionnel</b>		CMC, PHPA, HEC
<b>Branché ou bidimensionnel</b>		Amidon, gomme de xanthane
<b>Réticulé ou tridimensionnel</b>		Gomme de xanthane réticulé

Il y a une possibilité infinie dans les conformations structurales des polymères, certaines d'elles et qui affectent les performances des polymères sont :

- ✓ Le type du monomère ou des monomères;
- La masse moléculaire;
- ✓  Le type et l'abondance de la modification chimique sur le polymère;
- ✓ Nombre de groupes ramifiés ou réticulés dans la chaîne du polymère.

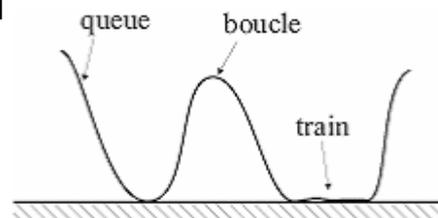
Les polymères en fluides de forage peuvent être classés en trois manières, ils peuvent être classés selon leur chimie, en tant qu'anionique ou non-anionique, ils peuvent être classés par leur fonction telle que des additifs viscosifiant ou réducteur de filtrat, ou ils peuvent être classés tout simplement par leur origine naturel, naturel modifiés ou synthétique.

**IV. Adsorption des polymères :**

L'adsorption des polymères à l'interface solide/liquide est associée à des problèmes variés telle la stabilisation colloïdale, la floculation, l'adhésion, la lubrification, etc. la structure des couches de polymères adsorbés de même que les quantités de polymères dans ces couches jouent un rôle capital pour ces processus. L'adsorption des polyélectrolytes sur les surfaces minérales est généralement différente de celle des polymères non chargés, la différence principale étant liée à l'intervention de forces électrostatiques à longue portée dans le cas des polymères chargés.

L'étude statistique d'une chaîne isolée adsorbée a été l'objet de nombreux travaux dans les années 60. Hoeve et Silberberg distinguent les **boucles**, les **trains** et les **queues** (**figure II.1**). Les boucles sont constituées par les portions de chaînes situées entre deux monomères en contact avec la surface, les trains désignent les sections de chaînes complètement adsorbées sur la surface, tandis que les queues sont les portions terminales de la chaîne, situées entre un bout libre et le plus proche monomère en contact avec la surface. [20]

**Figure II.1 : Schéma d'adsorption d'une chaîne de polymère sur une surface. [20]**



Plusieurs interactions thermodynamiques doivent être prises en compte pour décrire le processus d'adsorption du polymère à la surface d'une particule minérale. Ainsi, les interactions segment - surface, segment-solvant, et segment-segment apportent une contribution à la thermodynamique du processus. D'autres changements sont aussi à considérer si l'on désire obtenir une image complète du système, il s'agit notamment :

- ✓ Du changement de conformation du polymère après son adsorption à l'interface ;
- ✓ Du changement de conformation d'une molécule adsorbée induit par l'adsorption de nouvelles molécules à l'interface ;
- ✓ Des phénomènes d'échanges associés à l'adsorption préférentielle de molécules de poids moléculaires élevés ;
- ✓ Du changement du taux d'ionisation de la surface minérale et du polymère liée à une augmentation de la densité entière de charge au voisinage de la surface.

Il convient également de souligner que dans la plupart des situations, l'adsorption d'un polymère sur une surface minérale est limitée par le temps d'accès d'une molécule de polymère vers la surface ; cet accès est contrôlé, suivant le système considéré, soit par la diffusion du polymère soit par la convection.

## **V. Evolution des familles de polymères utilisés dans le forage :**

Depuis les années 1990, les polymères ont apporté une alternative à l'utilisation des OBM, largement critiqués à cause des problèmes déjà cités (pollution et toxicité). Actuellement, les foreurs tentent d'exiger des polymères utilisés dans les WBM des caractéristiques inspirées des propriétés des OBM.

L'introduction des polymères dans les fluides de forage à l'eau (WBM) date de la première utilisation en 1930, d'amidon de maïs ajouté à de la boue bentonitique pour contrôler les caractéristiques de filtration. Cet ajout est suivi par l'introduction de carboxyméthylcelluloses (CMC), de tanins (Ex : québracho) et de lignosulfonates, tous régulièrement utilisés depuis 1945.

Toutes ces substances utilisées, produites naturellement ou extraites par des procédés simples, avaient pour objectif de protéger la bentonite de la floculation par le sel. L'addition des colloïdes organiques naturels dans les fluides de forage a apporté de grandes améliorations propriétés et caractéristiques des fluides classiques à base d'eau en termes de filtration et d'inhibition.

Les polymères utilisés, souvent conçus pour une situation particulière de forage, sont devenus de plus en plus sophistiqués. Dans certains cas, ils peuvent même remplacer totalement les argiles, particulièrement pour le forage des zones argileuses sensibles à l'eau ou des zones productrices d'eau et d'hydrocarbures.

Les familles de polymères utilisés dans les fluides de forage doivent répondre à plusieurs critères:

- La résistance à la température et la biodégradabilité, ainsi que la résistance à la contamination par les ions,
- La compatibilité avec l'ensemble des additifs du fluide,
- La protection des formations forées: stabilisation des argiles, et le minimum d'endommagement des formations productrices,
- La lubrification et la protection contre la corrosion.

Face à toutes ces exigences, de meilleures formulations ont été recherchées pour répondre aux besoins de chaque forage spécifique. Ainsi les polymères cationiques sont utilisés pour le forage des argiles gonflantes 'Gumbo'. Les WBM à base de sels d'ammoniums quaternaires se révèlent être de meilleurs inhibiteurs que les WBM conventionnels.

Les polymères anioniques tels que les lignosulfonates de fer ont été largement utilisés en tant que défloculants. Le lignite chromé en association avec les lignosulfonates, permet la réduction du filtrat. Les dérivés ligneux (polyphénols) sont utilisés pour les forages profonds ( $T > 220^{\circ}\text{C}$ ). Les dérivés polyacryliques, généralement fortement anioniques, forment un colloïde protecteur et donnent aussi une bonne stabilité thermique.

Les paramètres qui gouvernent l'efficacité des polymères sont de deux types

- Les paramètres imposés par l'environnement tels que pH, salinité (nature et concentration en sels), température, oxygène.
- Les paramètres ajustables liés à la structure même du polymère (nature et longueur des chaînes principales et latérales, nature des groupes fonctionnels chargés et/ou neutres, et densité de charge).

L'étude de mélanges argiles-polymères-électrolytes montre que les dimensions des polymères dépendent à la fois de la salinité et de la masse molaire et ont une influence majeure sur leur efficacité à inhiber la dispersion des déblais

L'augmentation de la masse molaire des additifs (polymères) peut entraîner une floculation des particules argileuses provoquant un mauvais contrôle de la filtration, alors qu'une augmentation des charges du polymère améliore la dispersion de la bentonite et par conséquent ses qualités de réducteur de filtrat. [21]

## VI. Les principaux polymères utilisés dans les fluides de forage :

### 1. La gomme de xanthane (xanthane) :

Dans les fluides de forage, le xanthane est largement utilisé en tant que viscosifiant vu sa qualité rhéologique, sa résistance vis-à-vis de la salinité, sa bonne stabilité thermique et sa biodégradabilité. Le xanthane est un polysaccharide produit par une bactérie appelée "Xanthomonas campestris" intervenant dans le métabolisme de certains végétaux. L'obtention du xanthane suit un processus complexe. Les différentes étapes de mise en œuvre conditionnent les propriétés finales du polymère: composition finale de la poudre, masse molaire, composition chimique du motif, rhéologie, etc... .

Sa formule brute moyenne est  $(C_{67}H_{102}O_{56})_n$  avec  $n = 830$  à  $2800$ . La structure primaire de la gomme xanthane consiste en une chaîne principale de cellulose. Deux groupements carboxyliques confèrent à la gomme xanthane un caractère anionique (**Figure II.2**). Les contre ions les plus couramment rencontrés sont  $Na^+$ ,  $K^+$  et  $Ca^{2+}$ .

Trois fonctions apparaissent sur les cycles de la chaîne latérale du motif (un groupement acétate sur le cycle le plus proche du squelette principal, un acide glucuronique sur le cycle intermédiaire et un acide pyruvique sur le cycle terminal). En milieu aqueux, les atomes ( $Na^+$  ou  $K^+$ ) se dissocient de la molécule de xanthane qui acquiert alors une charge négative due aux ions carboxylique ( $COO^-$ ). À l'état solide, la chaîne principale se présente sous forme d'une hélice droite dont le pas mesure 4,7 nm et totalise 5 unités répétitives (**Figure II.3**).

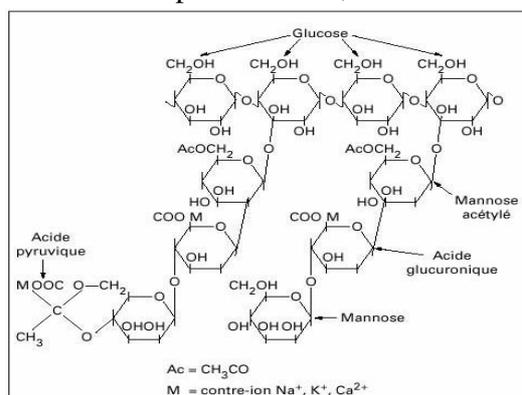


Figure II.2 : Structure primaire de la gomme Xanthane[22]

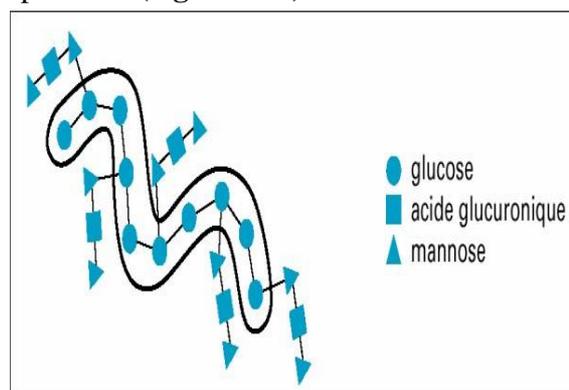


Figure II.3 : Structure secondaire de la gomme xanthane à l'état solide (Simon, 2004)

Les chaînes ramifiées (60 % de la masse totale) sont repliées le long de la chaîne cellulosique, constituant ainsi un 2<sup>ème</sup> brin discontinu. La structure secondaire de la gomme xanthane fait encore l'objet de controverses. La conformation de la chaîne en solution aqueuse

dépend de la force ionique. La dépendance avec la concentration en xanthane a été montrée dans plusieurs travaux.

En solution aqueuse, la viscosité du polymère est due aux interactions eau/polymère et polymère/polymère. Selon la température, la salinité et l'histoire de l'échantillon, trois conformations sont possibles. La gomme nouvellement biosynthétisée est à l'état natif qui correspond à une structure en double hélice

Au-delà d'une certaine température  $T_m$  ("melting temperature"), dépendant fortement de la force ionique de la solution et située habituellement entre 40 et 100°C, il se produit une transition conformationnelle. Au-dessous de  $T_m$ , la molécule est dans un état ordonné. Lorsque la température dépasse  $T_m$ , l'ordre conformationnel disparaît et la structure est ainsi "dénaturée".

Dans des conditions peu salines et/ou à des températures élevées, la conformation adoptée par la macromolécule est celle d'une pelote désordonnée, flexible. A l'inverse, si la salinité est forte et/ou si l'on se place à température ambiante, la macromolécule adopte une conformation ordonnée, semi-rigide ou rigide. Plus les molécules sont longues, plus il est difficile de séparer les molécules les unes des autres et plus elles s'enchevêtrent. L'enchevêtrement des chaînes est cependant rendu possible par le gain en flexibilité lors de la montée en température.

Parallèlement, des zones de jonctions intermoléculaires apparaissent et créent un réseau tridimensionnel qui renforce le caractère de type "gel faible" (gel physique) de la solution. La salinité favorise la création de ces ponts intermoléculaires lors de la montée en température et, à forte concentration en sel, la forme ordonnée peut même être conservée, le sel diminuant l'activité des molécules d'eau et donc leur potentiel de coordination par liaisons H aux groupements latéraux. [23]

## **2. Le Mixte métal hydroxydes (MMH) :**

Composé contenant des anions hydroxyde en combinaison avec deux ou plusieurs cations métalliques.

Les particules de MMH sont extrêmement petites et portent de nombreuses charges positives. Ils peuvent s'associer à la bentonite pour former un complexe fort avec des propriétés de cisaillement très élevées, des forces de gel élevées et fragiles, un point de rupture élevé et une faible viscosité plastique. La MMH est décrite comme un hydroxyde de couche mélangée (MMLH). Dans les couches cristallines, les ions  $Al + 3$ ,  $Mg + 2$  et  $OH^-$  résident, mais en raison de considérations de symétrie, il n'y a pas assez de place pour les ions  $OH^-$  suffisants pour compenser électriquement les charges des deux cations. Par conséquent, une charge positive nette existe sur les surfaces cristallines. Les anions échangeables sont sur la surface positive (de la même manière que les cations reposent sur des surfaces argileuses négatives). Les boues MMH sont utilisées comme fluides de forage non agressifs, fluides de forage métallique (pour la fabrication de déblais de métal) et pour le contrôle de forage de schiste. En tant que cationique, la boue de MMH est sensible aux défloculants anioniques et aux petits polymères anioniques, tels que les polyphosphates, le lignosulfonate ou le lignite.

Les viscosifiants à base d'hydroxyde métallique mixte (MMH) utilisés dans les fluides de forage sont basés sur des sels d'hydroxyde de magnésium et d'aluminium spécifiques avec une structure de feuille cationique.

Ils sont préparés par un procédé chimique hautement sophistiqué donnant des particules de taille 0,1  $\mu\text{m}$ . Grâce à l'ajout de MMH, les boues de bentonite typiques sont transformées en un fluide extrêmement amincissant. Au repos, ces fluides présentent une viscosité très élevée mais sont amincis à une consistance proche de l'eau lorsque la contrainte de cisaillement est appliquée. En théorie, la rhéologie unique d'amincissement au cisaillement des fluides de bentonite MMH s'explique par la formation d'un réseau tridimensionnel et fragile de MMH et de bentonite.

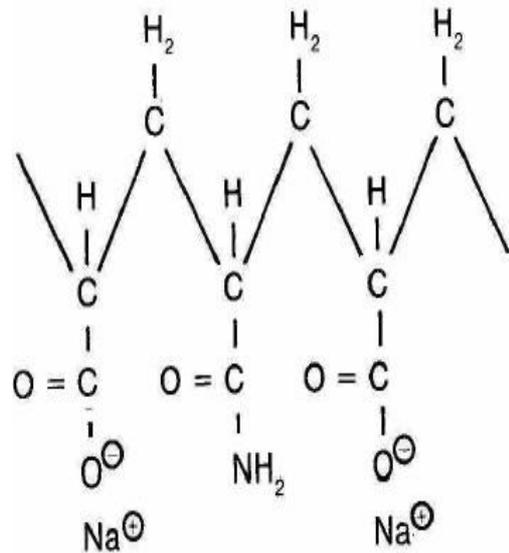
Les particules de MMH chargées positivement se fixent à la surface des plaquettes de bentonite chargées négativement. Certaines particules de MMH peuvent s'attacher avec leurs surfaces supérieure et inférieure à deux plaquettes de bentonite différentes. La bentonite réticulée par MMH qui en résulte impose une viscosité élevée sur le fluide. Pour étudier ce concept d'un réseau d'hétéroparticules, la microscopie électronique à transmission (TEM) a été utilisée. Les micrographies TEM montrent que de petites cristallites de MMH sont fixées sur les surfaces basales de plaquettes de bentonite volumineuses. De plus, les particules de bentonite réticulée résultantes sont visibles sous le TEM. Par conséquent, l'étude TEM suggère que MMH peut être considéré comme un agent de pontage pour les particules de bentonite. Puisque ce pontage de particules est basé sur une force électrostatique faible, la viscosité se décompose lors du pompage du fluide. Le liquide retournera instantanément à une condition gélifiée une fois que la contrainte de cisaillement est éliminée.

En raison de son comportement d'amincissement par cisaillement, les liquides de bentonite MMH sont bien adaptés à des types spécifiques d'applications de forage. Les boues à base de MMH ont été utilisées avec succès sur des puits horizontaux dans des applications pétrolières et dans des tunnels souterrains pour des applications de forage sans tranchée. Pour produire la même rhéologie d'éclaircie par cisaillement, les résultats sur le terrain prouvent que les liquides de bentonite MMH ont un coût inférieur à celui des boues de biopolymères. [24]

### 3. Le polyacrylamide partiellement hydrolysé (PHPA) :

Le PHPA est parmi les polymères synthétiques, le polymère le plus utilisé dans le domaine pétrolier et surtout le PHPA hydrolysé à 30% qui est utilisé dans les fluides de forage pour l'inhibition des argiles. C'est un polymère linéaire anionique de masse molaire élevée, dont certaines fonctions amide ont été hydrolysées. ont donné une description détaillée de la structure de ces polymères (**Figure II.6**).

L'attraction entre les sites chargés négativement du PHPA et les sites positifs des argiles conduisent à une "encapsulation" retardant le gonflement et la dispersion. Le PHPA peut être utilisé dans les fluides de forage à l'eau douce ou à l'eau salée, contenant de faibles quantités de solides.



**Figure II.4 : Polyacrylamide partiellement hydrolysé (sel de sodium)**

Ainsi, la rhéologie est améliorée avec des concentrations minimales de bentonite. Ainsi, les mélanges bentonite-PHPA montrent une augmentation de la durabilité, de l'inhibition du gonflement et de la dureté avec l'augmentation de la concentration en polymère jusqu'à une valeur optimale.

Les propriétés de ces polymères en solution ont été beaucoup étudiées, mais peu de travaux ont traité des interfaces solide-liquide.

Quelques auteurs ont relié la réduction de la masse molaire à la vitesse de dégradation. Une complexation des cations multivalents avec les groupes carboxylate du PHPA a été aussi observée.

La sédimentation résultant de la floculation des particules dépend de la dimension moléculaire du polymère, toute réduction de cette dimension étant défavorable à la floculation.

les groupes carboxylate du PHPA a été aussi observée

La sédimentation résultant de la floculation des particules dépend de la dimension moléculaire du polymère, toute réduction de cette dimension étant défavorable à la floculation.

#### **4. Les glycols :**

Dans le domaine du forage, PG (polyglycol) ou PEG (polyéthylène glycol) désigne souvent un ensemble de composés à base de glycol ou de glycérol. La première référence relative à l'utilisation du glycol (ou glycérol) dans le domaine des fluides de forage est donnée par Canon en 1940 pour le contrôle du gonflement des argiles. Actuellement, les (Poly-) glycérols et les (poly-) glycols généralement notés simplement glycérols et glycols sont largement utilisés pour le forage des argiles.

Ce type de composé exhibe des caractéristiques de trouble en fonction de la température. Pour une température proche du point de trouble, ont observé une bonne efficacité des polyglycols. Avec l'addition de PEG, ont remarqué une augmentation de l'espace interfoliaire, expliqué par une réaction d'échange entre PEG et les cations échangeables présents. Ce phénomène est étroitement lié au gonflement des argiles en présence des molécules d'eau.

En utilisant le mélange PAG-Carbonates de potassium ont montré une réduction de l'hydratation et le gonflement des argiles. En comparaison avec les autres systèmes WBM, ils ont obtenu sur chantier des résultats satisfaisants du point de vue avancement, tolérance aux solides, et une meilleure récupération du fluide après forage.

#### **5. Les silicates de sodium :**

Depuis la première introduction des silicates, pour résoudre le problème des argiles microfracturées, par BW Mud, Mobil, BP Exploration et Shell Research (dans les années 30), il était connu que les fluides de forage à base de silicate fournissaient une stabilité des argiles similaire à celle des OBM.

Le développement de la chimie de formulation a fait des fluides de forage renfermant des silicates une alternative, efficace et à prix réduit, aux OBM. Les silicates ont été introduits dans les fluides de forage, selon les étapes suivantes :

- ✓ Initialement, les fortes concentrations des solutions de silicates (20 à 50%) engendraient des problèmes de viscosité excessive et de gélification.
- ✓ En 1945, les silicates sont remplacés par les systèmes chaux-quebracho (cellulose) plus adéquats, avec un contrôle de rhéologie plus aisé.
- ✓ Fin 1960, les silicates sont réintroduits avec des solutions plus diluées (5 à 10%), des sels (KCl, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NaCl) et/ou des solutions non ioniques (glycérol, éthylène glycol) contribuant énormément à résoudre les problèmes de stabilité.

Les solutions de silicates utilisées dans les WBM sont souvent des solutions de silicates de sodium ajoutées au système conventionnel NaCl/KCl/polymère, donnant par adsorption un taux d'inhibition très élevé des argiles, approximativement similaire à celui des OBM.

Une solution de silicate de sodium se compose d'espèces monomères ( $\text{SiO}_3^{2-}$ ) et de polymères (Figure II.5).

Les concentrations en monomère et en polymères dépendent de la teneur en silice et du rapport  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  dans la solution. En outre, le polymère est en équilibre avec son monomère  $\text{Si}(\text{OH})_4$ .

Les polymères sont de taille approximativement uniforme. Les atomes de silicium internes sont liés par des ponts d'oxygène tandis que ceux de l'extérieur peuvent être liés au moins à un OH. Par conséquent, un équilibre existe entre la silice ionique et colloïdale :

$n \cdot \text{SiO}_2 + 3n \text{H}_2\text{O} = (\text{H}_2\text{SiO})_n \cdot (n\text{H}_2\text{O} + 2n \text{OH}^-)$  quand une solution de silicate. Toujours fortement alcaline, est neutralisée par un acide à un pH d'environ 10,7, les ions silicates se décomposent en acide silicique  $[\text{Si}(\text{OH})_4]$  qui se polymérise en silice (Iler, 1979).

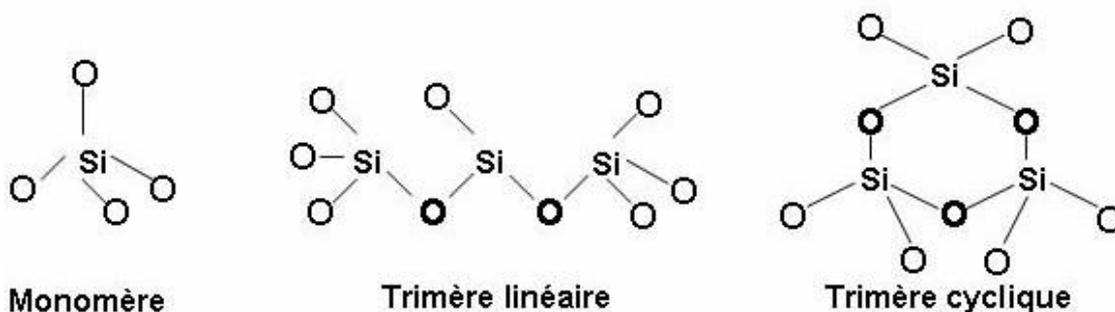


Figure II.5: Structure des anions silicate [25]

Un des principaux paramètres qui détermine les propriétés des solutions de silicate est le rapport massique  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ . Les silicates liquides, avec des rapports plus élevés, contiennent des proportions plus grandes des espèces condensées et complexes, de masse molaire plus élevée.

Le passage d'une espèce de silicate à une autre peut avoir un impact mesurable sur la rhéologie du fluide de forage, l'inhibition de l'argile et la stabilité globale de la boue. Le choix du rapport est donc important.

L'inhibiteur primaire dans ce système est le silicate de sodium, qui s'hydrolyse pour donner les

hydroxydes de silicium  $\text{Si}(\text{OH})_4$  et de sodium, générant des valeurs de pH élevées (~11-12).

L'inhibiteur secondaire dans ce système est le potassium qui par échange cationique avec les argiles empêche leur dispersion et leur gonflement. L'addition de soude (augmentation du pH) réduit la polymérisation des silicates. Un excès augmente la viscosité (gélification).

Outre la formation directe de liaisons chimiques avec les silicates polymères jouant un rôle dans le forage des déblais et les surfaces de la formation, les systèmes aux silicates doivent leurs

Propriétés inhibitrice des argiles à deux phénomènes (figure II .8)

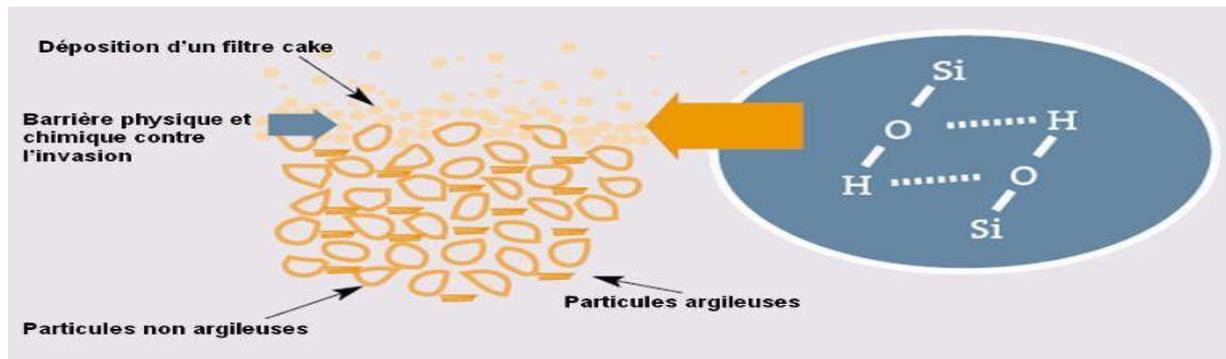


Figure II.6: La polymérisation du silicate monomère et la formation de la barrière physique et chimique à l'invasion de filtrat et de particules. [25]

- **La gélification** qui consiste en une condensation (auto-polymérisation) de structures solubles de silicate pour former une structure amorphe de gel de silicate. La gélification se produit sous l'effet d'une baisse du pH, la polymérisation commençant rapidement à pH inférieur à 10,5.

La polymérisation du silicate a pour conséquence la formation de structures polymères inorganiques complexes qui réagissent avec les surfaces argileuses. La gélification in situ des silicates a été employée pour la réduction du flux des fluides aqueux dans les gisements. [26]

- **La précipitation** du silicate qui a lieu par liaison des ions de silicate avec des cations polyvalents ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Al}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ , etc..).

Lorsque la boue (silicate) entre en contact avec l'eau interstitiel le légèrement acide (pH 6-8) et les ions polyvalents, une réaction de gélification localisée, couplée à une faible précipitation, se produit, bloquant l'afflux de la boue et s'opposant à la pression dans la formation. Ces réactions mènent également au scellement de microfissures, ce qui confère au silicate un avantage décisif par rapport à n'importe quel OBM, réduisant de manière significative les pertes et coûts potentiels de la boue.

Ces mécanismes uniques de gélification et/ou de précipitation font également que le silicate est un agent réducteur de filtrat, tant le transfert de fluide et de pression vers la formation est réduit, maintenant intacte l'intégrité du puits. En plus de cette chimie unique, les fluides de forage à base de silicate fournissent un produit de filtration perméable mince, dur réduisant de manière significative les problèmes de forage, tout en améliorant le cimentage. Les mécanismes d'inhibition des silicates empêchent les déblais d'être facilement dispersés dans le fluide de forage. [27]

## *Chapitre III : Les Argiles.*

**I. Introduction :**

L'argile utilisée dans notre travail est connue sous le nom de "*bentonite*". Elle désigne généralement une poudre minérale constituée essentiellement de l'argile de montmorillonite (famille des smectites). Dans leur état naturel, la plupart des gisements de bentonite sont hétérogènes ; ils sont constitués de smectites mélangées ou interstratifiées avec l'illite et/ou la kaolinite et d'autres impuretés [Laribi *et al.* (2005)]. La bentonite est largement utilisée dans de nombreux secteurs industriels (pharmacie, cosmétique, chimie, génie civil, agroalimentaire ...).

Elle est utilisée sous forme pâteuse ou à l'état de poudre pour la réalisation de barrières étanches pour les déchets industriels et ménagers (géomembranes bentonitiques) et les déchets radioactifs (barrières ouvragées ; poudre compactées). A l'état liquide, la boue de bentonite se définit comme une *suspension eau-argile*. L'origine de l'usage de la boue est sans aucun doute les forages pétroliers [Besq (2000)]. Elle permet, du fait de ses propriétés rhéologiques, de faire face aux nombreuses exigences du forage, telles que la stabilité de l'ouvrage (par imprégnation du terrain et par fabrication d'un cake pour limiter la filtration vers la paroi) et l'évacuation des déblais [Jozja (2003) ; Besq (2000)].

Dans ce chapitre, nous présentons, en premier lieu, la structure et les propriétés des matériaux argileux en général, afin de mieux distinguer les spécificités des smectites ainsi que la montmorillonite. Cette famille d'argile est la composante majeure de la bentonite commerciale utilisée dans le présent travail. Cependant, il convient de souligner qu'une bentonite peut être composée de smectites mélangées ou interstratifiées avec l'illite et/ou la kaolinite. On note que ces dernières sont moins abondamment traitées dans la littérature que les smectites et les montmorillonites [Luckham et Rossi (1999) ; Laribi *et al.* (2005)]. Nous présentons par la suite, une revue bibliographique sur la microstructure de la bentonite, son hydratation et ses propriétés de gonflement et de dispersion.

**II. Les matériaux argileux :**

Les phyllosilicates sont des silicates dans lesquels les tétraèdres de  $\text{SiO}_4$  forment des feuillets infinis bidimensionnels. Ces feuillets tétraédriques sont condensés avec des octaèdres d'oxydes métalliques dans un rapport 2:1 ou 1:1. Les phyllosilicates sont également appelés plus simplement silicates lamellaires [Le Pluart (2002)]. Les différents groupes de minéraux argileux se différencient par l'arrangement de leurs couches tétraédriques et octaédriques représentés sur la figure III.1.

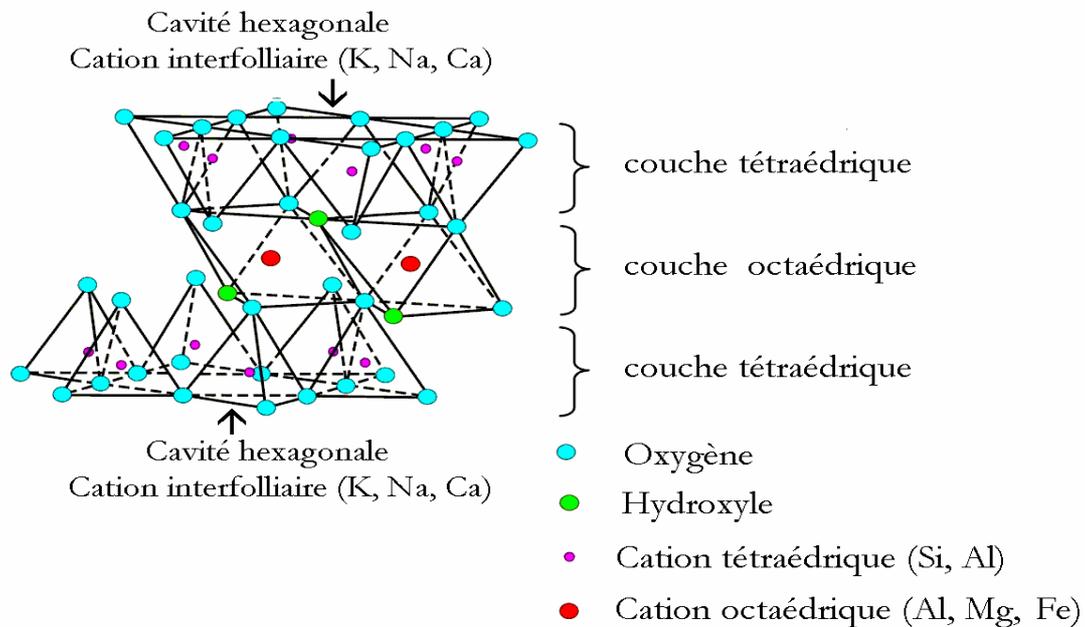


Figure III.1: Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2:1 [Luckham et Rossi (1999)].

L'organisation structurale des phyllosilicates est basée sur une charpente d'ions  $O^{2-}$  et  $OH^-$  [Caillère *et al.* (1982)]. Ces anions occupent les sommets d'assemblages octaédriques ( $O^{2-}$  et  $OH^-$ ) et tétraédriques  $O^{2-}$ . Dans les cavités de ces unités structurales élémentaires viennent se loger des cations de tailles variables ( $Si^{4+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) 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. Lorsque deux cavités sur trois de la couche octaédrique sont occupées par  $Al^{3+}$  (ou un autre ion métallique trivalent), la structure est dénommée *dioctaédrique*. Quand la totalité des cavités octaédriques est occupée par des ions métalliques bivalents, la structure s'appelle *trioctaédrique*.

Par ailleurs, il peut exister des substitutions isomorphiques dans les couches tétraédriques ( $Si^{4+} \longrightarrow Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ) et /ou octaédrique ( $Al^{3+} \longrightarrow Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ , ou  $Mg^{2+} \longrightarrow Li^+$ ). Ces substitutions entraînent un déficit de charge qui est compensé, à l'extérieur du feuillet, par des cations compensateurs.

**III. Classification des argiles :**

Il existe différentes classifications des argiles. La plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. On distingue ainsi quatre groupes [Jozja (2003)] :

- i) **Minéraux à 7 Å** : Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O ou de type 1:1. Son épaisseur est d'environ 7 Å.
- ii) **Minéraux à 10 Å** : Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O:T ou de type 2:1. Son épaisseur est d'environ 10 Å.
- iii) **Minéraux à 14 Å** : Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T:O:T et de couches octaédriques interfoliaires,
- iv) **Minéraux interstratifiés** : L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus.

Par ailleurs, on trouve dans la littérature des modèles différents pour la classification des phyllosilicates. La première classification, établie par le comité international de Classification et de Nomenclature des Minéraux argileux en 1966, est basée uniquement sur la charge du feuillet et sur le nombre d'atomes métalliques en couche octaédrique. La deuxième, établie par **Mering et Pedro (1969)**, prend en compte la localisation des substitutions, leur distribution et le type de cations compensateurs. Cette classification ne prend pas en compte les silicates synthétiques, parfois utilisés dans l'élaboration de nanocomposites, que sont la fluorohectorite, le fluoromica ou la laponite. Le Tableau III.1 présente une classification déduite des travaux de **Brindley (1966) et Mc Kenzie (1975)** qui donne la valeur de la charge permanente du feuillet qui a servi comme critère pour établir une classification des phyllosilicates 2:1 (famille qui nous intéresse dans la présente étude).

Parmi l'ensemble des argiles citées dans le tableau III.1, les trois familles les plus importantes sont les kaolinites, les illites et les smectites :

- i) **Kaolinite** : Dans le cas de la kaolinite, le feuillet est toujours neutre, dioctaédrique et alumineux, de composition  $(Si_2)(Al_2)O_5(OH)_4$  par demi-maille [Pedro (1994)]. Morphologiquement, la kaolinite se présente sous forme de particules hexagonales constituées par des empilements de feuillets [Jozja (2003)].
- ii) **Smectites** : La structure de la couche octaédrique des smectites, ainsi que la localisation des substitutions, ont conduit à une classification de ces minéraux. Ainsi, il existe deux grandes catégories de smectites. Les premières sont dites dioctaédriques du fait de l'occupation de seulement deux sites octaédriques sur trois. Parmi elles, certaines présentent majoritairement des substitutions dans la couche octaédrique (montmorillonite), alors que d'autres sont principalement substituées dans les couches tétraédriques (beidellite). Typiquement, l'ion en site octaédrique est alors l'aluminium, qui est remplacé par du magnésium ou du fer, alors que le silicium tétraédrique est remplacé par de l'aluminium. Il existe un troisième type de smectite dioctaédrique, possédant essentiellement du fer au degré d'oxydation III dans sa couche octaédrique, remplacé par de l'aluminium ou du magnésium (nontronite). Les autres smectites sont trioctaédriques,

car, dans ce cas, tous les sites octaédriques sont occupés. L'ion en site octaédrique est en général le magnésium.

Tableau III.1 : Classification des phyllosilicate 2:1 [Jozja (2003)].

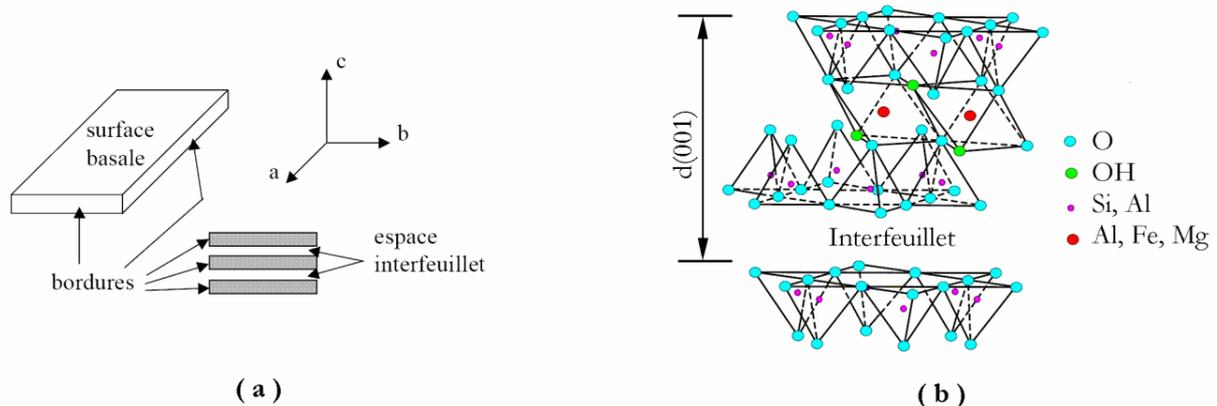
Feuillet	Charge par maille	Diocatédrriques	Triocatédrriques
1: 1	0	Kaolinite (Si <sub>4</sub> )(Al <sub>4</sub> ) <sub>0</sub> 10(OH) <sub>8</sub>	Antigorite (Si <sub>4</sub> )(Mg <sub>3</sub> ) <sub>0</sub> 10(OH) <sub>8</sub>
	#0		Berthierines (Si <sub>4-x</sub> Al <sub>x</sub> )(Mg <sup>2+</sup> <sub>6-x</sub> M <sup>3+</sup> <sub>x</sub> ) <sub>0</sub> 10(OH) <sub>8</sub>
	#0	Pyrophyllite (Si <sub>8</sub> )(Al <sub>4</sub> ) <sub>0</sub> 20(OH) <sub>4</sub>	Talc (Si <sub>8</sub> )(Mg <sub>6</sub> ) <sub>0</sub> 20(OH) <sub>4</sub>
2: 1		SMECTITES	
	0.4 à 1.2	Montmorillonite (Si <sub>8</sub> )(Al <sub>4-y</sub> Mg <sub>y</sub> ) <sub>0</sub> 20(OH) <sub>4</sub> M <sub>y</sub> <sup>+</sup>	Hectorite (Si <sub>8</sub> )(Mg <sub>6-y</sub> Li <sub>y</sub> ) <sub>0</sub> 20(OH) <sub>4</sub> M <sub>y</sub> <sup>+</sup>
		Beidellite (Si <sub>8-x</sub> Al <sub>x</sub> )Al <sub>4</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub> M <sub>x</sub> <sup>+</sup>	Saponite (Si <sub>8-x</sub> Al <sub>x</sub> )(Mg <sub>6</sub> ) <sub>0</sub> 20(OH) <sub>4</sub> M <sub>x</sub> <sup>+</sup>
	1.2 à 1.8	Illites (Si <sub>8-x</sub> Al <sub>x</sub> )(Al <sub>4-y</sub> M <sup>2+</sup> <sub>y</sub> ) <sub>0</sub> 20(OH) <sub>4</sub> K <sup>+</sup> <sub>x+y</sub>	Vermiculites (Si <sub>8-x</sub> Al <sub>x</sub> )(Mg <sub>6-y</sub> M <sup>3+</sup> <sub>y</sub> ) <sub>0</sub> 20(OH) <sub>4</sub> K <sup>+</sup> <sub>x-y</sub>
		MICAS	
	2	Muscovite (Si <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> )(Al <sub>4</sub> ) <sub>0</sub> 20(OH) <sub>2</sub> K <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Phlogopite (Si <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> )(Mg <sub>6</sub> ) <sub>0</sub> 20(OH) <sub>2</sub> K <sub>2</sub> <sup>+</sup>
4	Margarite (Si <sub>4</sub> Al <sub>4</sub> )(Al <sub>4</sub> ) <sub>0</sub> 20(OH) <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	Clintonite (Si <sub>4</sub> Al <sub>4</sub> )(Mg <sub>6</sub> ) <sub>0</sub> 20(OH) <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> <sup>2+</sup>	

Parmi elles, certaines sont caractérisées par des substitutions du magnésium par le lithium dans la couche octaédrique (hectorite), alors que pour d'autres, les substitutions ont principalement lieu dans la couche tétraédrique, où le silicium est remplacé par de l'aluminium (saponite). La localisation des substitutions est un facteur déterminant dans les propriétés d'adsorption des smectites, d'où l'importance de la classification décrite ici. Cependant, la montmorillonite et l'hectorite, dans lesquelles les substitutions ont principalement lieu dans la couche octaédrique, sont les plus répandues dans la nature, et donc les plus souvent étudiées [Viallis-Terrisse (2000)].

iii) *Illite* : Comme les smectites, cette famille est aussi un phyllosilicate 2:1. Les feuillets possèdent une charge globale négative, plus élevée que celle des smectites, qui est compensée par des ions potassium. La différence fondamentale avec les smectites réside dans le fait que les ions compensateurs (potassium) ne sont que très faiblement échangeables : l'illite a une capacité d'échange cationique faible. Il n'y a pas d'hydratation des espaces interfoliaires [Jozja (2003) ; M'bodj *et al.* (2004)].

#### IV. Les smectites :

Comme nous l'avons déjà indiqué plus haut, ce type de phyllosilicates est constitué des deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique (**figure III.1**). Les minéraux les plus importants de cette famille sont la montmorillonite, la beidellite, l'hectorite et la saponite [**Jozja (2003)**]. Cette famille d'argile est composée de particules plates d'une grande extension latérale avec des diamètres allant de quelques microns à plusieurs centaines de microns.



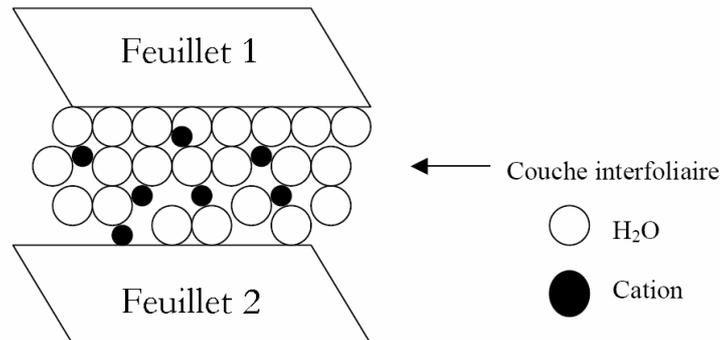
**Figure III.2 : a) Illustration de l'empilement des feuillets d'argile, montrant les surfaces basales, les bordures des particules, ainsi que les espaces interfeuillets [Viallis-Terrisse (2000)].**

**b) Représentation schématique [Luckham et Rossi (1999)] de l'empilement des feuillets unitaires dans une smectite.**

Ces particules sont elles-mêmes constituées d'un empilement de feuillets unitaires, formant spatialement une structure de type "jeu de cartes" (**figure III.2.a**). L'épaisseur totale du feuillet et de l'espace interfeuillet associé est d'environ 14 Å [**Viallis-Terrisse (2000)**]. Des molécules d'eau sont susceptibles de s'intercaler dans l'espace interfoliaire (**figure III.2.b**). Le degré d'hydratation dépend de la nature du cation hydraté et de l'humidité relative. Cette possibilité de "**gonflement**" des espaces interfoliaires conduit à désigner ces argiles par le terme d'"**argiles gonflantes**", comme nous le verrons plus loin.

Les études électrocinétiques menées sur les smectites indiquent que pour tout pH supérieur à 2 ou 3, celles-ci portent une charge négative à leur surface, neutralisée par des cations dits "compensateurs". La principale origine de cette charge de surface provient de substitutions isomorphiques au sein du réseau cristallin, résultant du remplacement des cations métalliques du réseau par des cations de même taille mais de charge inférieure. Cette charge négative est couramment notée charge structurale permanente et se situe aux alentours de  $7.10^{-3} \text{ e}/\text{Å}^2$ . Elle est à l'origine du gonflement de ces minéraux en présence d'eau. D'autres facteurs interviennent également dans la formation de la charge de surface : certaines imperfections au sein du réseau cristallin, la présence de liaisons rompues en bordure des particules, ou celle d'hydroxyles structuraux en surface [**Viallis-Terrisse (2000)**].

Pour les phyllosilicates, les espaces qui se trouvent entre les feuillets (**figure III.2**) peuvent être vides ou remplis. Ils sont vides dans le cas où les feuillets sont neutres et occupés par des cations dès que les feuillets de l'édifice présentent un déficit de charge à la suite de substitutions isomorphiques. Ces cations rétablissent l'électro-neutralité du système et en même temps assurent la liaison entre les feuillets adjacents, qui est ici de nature ionique.



**Figure III.3 : Représentation schématique de la couche interfoliaire dans le cas de cations interfoliaires hydratés [Jozja (2003)]. [Pédro (1994)].**

Ces cations peuvent être soit *secs* soit *hydratés*. Les cations les plus fréquents sont  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$ . Dans le cas des smectites où les cations compensateurs sont hydratés avec la présence d'un film d'eau entre les feuillets concourant à leur écartement, on parle de **minéraux expansibles**. La propriété essentielle de ces minéraux est de se disperser au contact de l'eau pour former des suspensions plus ou moins stables. Les cations interfoliaires sont en général échangeables par des cations organiques et minéraux se trouvant dans des solutions mises au contact du phyllosilicate (**Figure III.3**). On caractérise alors chaque phyllosilicate par sa **Capacité d'Echange Cationique (CEC)** définie comme étant le nombre de cations monovalents (équivalents chimiques) qu'il est possible de substituer aux cations compensateurs pour compenser la charge électrique de 100 g de minéral calciné. Il y a, dans les argiles, deux principales causes d'existence d'une capacité d'échange ionique, l'une interne et l'autre externe [Glaeser (1953)] :

- i) **La présence de substitutions isomorphiques (CEC interne)** : La plus fréquente est la substitution de  $\text{Al}^{3+}$  par  $\text{Mg}^{2+}$  dans la couche octaédrique. C'est le mécanisme principal d'échange pour une montmorillonite. Pour cette argile [Caillère *et al.* (1982)], la distance entre les sites négatifs situés au niveau de la couche octaédrique et le cation échangeable situé à la surface du feuillet est telle que les forces d'attraction sont faibles. Des substitutions de Si par Al dans la couche tétraédrique sont également possibles.
- ii) **Les phénomènes de bordure (CEC externe)** : Aux bordures d'un feuillet, les valences du silicium et de l'oxygène en couche tétraédrique d'une part, de l'aluminium et de l'oxygène en couche octaédrique, d'autre part, ne sont pas saturées. Pour compenser ces valences, des molécules d'eau s'hydrolysent et il y a apparition

de groupes silanol (Si-OH) ou aluminol (Al-OH) qui, en fonction du pH, peuvent capter ou libérer des protons. Ces derniers peuvent être échangés avec d'autres cations. Le nombre et la nature des charges de bordure de feuillet seront directement liés au pH [Jozja (2003)]. Langmuir (1997) a montré que les charges de bordure de feuillet prennent une importance plus significative lorsque la taille des particules diminue. Ces phénomènes expliquent environ 20 % de la capacité totale d'échange d'une smectite.

En résumé, la charge négative des particules argileuses est compensée par l'adsorption de cations, essentiellement le sodium et le calcium dans le cas des smectites. Ces contre-ions sont localisés sur les surfaces externes des particules ainsi qu'entre les feuillets unitaires. Ces cations peuvent être échangés par d'autres cations présents dans le système et on peut ainsi définir une capacité d'échange cationique pour un échantillon donné. Cette capacité d'échange cationique dépendant du pH de la solution, elle est en général mesurée à pH neutre, ce qui permet une comparaison fiable des différentes données expérimentales. Dans le cas des montmorillonites, la littérature rapporte des valeurs comprises entre 85 et 160 milliéquivalents pour 100 grammes d'argile [Viallis-Terrisse (2000)].

#### **V. Microstructure de la bentonite :**

Pour comprendre la microstructure de la bentonite, nous présentons dans ce paragraphe une revue bibliographique sur la microstructure de la montmorillonite en prenant en considération les différents types de minerais et d'empilements de particules constituant l'argile en question. Cette démarche est motivée par :

- i) La forte présence de la montmorillonite dans la littérature) [Didier (1972) ; Luckham et Rossi (1999) ; Durán *et al.* (2000) ; Tombácz et Szekeres (2004),
- ii) Le fait que les phyllosilicates présentent des similitudes de structure et de propriétés [Le Pluart (2002)].
- iii) La bentonite en général, particulièrement celle étudiée ici, est constituée en grande partie par ce type de minéral.

En plus de leur facteur de forme exceptionnel [L/e généralement compris entre 100 et 1000 (**figure III.4**)], les montmorillonites possèdent la propriété de gonflement la plus intéressante de tous les minéraux de la famille des phyllosilicates. Nous nous attachons dans cette partie à décrire leur structure à différentes échelles et leurs propriétés spécifiques. Ceci est rendu possible par l'utilisation de techniques expérimentales telles que la Diffusion aux Petits Angles des Rayons X (DPAX) [Pons (1980)], la Microscopie Electronique à transmission (MET) et la Microscopie Electronique à Balayage (MEB). Différents auteurs ont mis en évidence trois niveaux d'organisation dans les systèmes argileux, particulièrement les montmorillonites. Nous avons repris sur la figure III.4 la présentation des différents niveaux d'organisation selon l'échelle d'observation proposée par Le Pluart *et al.* (2004). Nous présentons donc dans cette partie les trois différents "objets" caractéristiques de cette structure multi-échelle des montmorillonites.

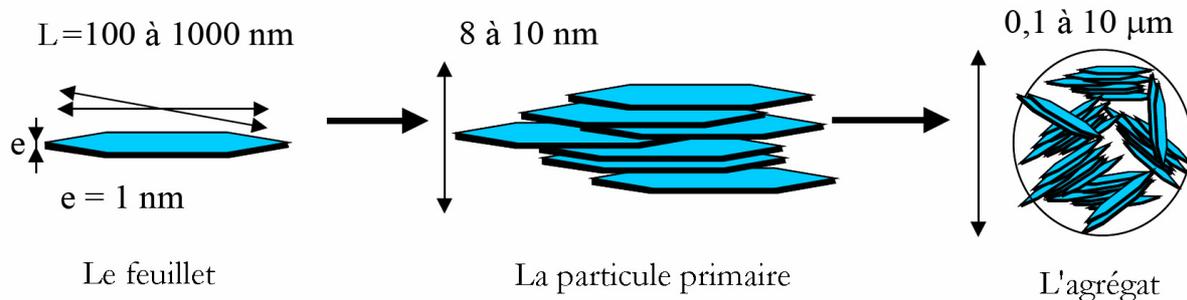


Figure III.4 : Structure multi-échelle de la montmorillonite [Le Pluart et al. (2004)].

#### A. Le feuillet :

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 représente la répétition horizontale de la demi-maille dans les directions x et y. Il est assimilable à un disque ou à une plaquette, possédant des dimensions latérales de l'ordre du micron, et faisant à peu près un nanomètre d'épaisseur. Ces plaquettes sont considérées comme souples et relativement déformables. L'anisotropie des feuillets est très importante. Dans la famille des smectites, la charge d'un feuillet varie de 0,2 à 0,6 électron par maille, selon la localisation des substitutions et le taux d'occupation des couches octaédriques. La montmorillonite possède environ 0,3 à 0,4 électron par maille [Le Pluart (2002)]. Comme nous l'avons dit plus haut, les cations compensateurs à la surface des feuillets de montmorillonite sont généralement des ions calcium ou sodium. On emploie généralement les termes de montmorillonite "calcique" et de montmorillonite "sodique" pour faire référence à la nature de ces cations.

#### B. La particule primaire :

Les particules constituent le premier niveau d'organisation. Elles sont caractérisées par un empilement de feuillets identiques parallèlement à leur plan de base. Les forces de cohésion entre feuillets sont plus faibles que celles existant au sein du feuillet. Si on considère les principales espèces minéralogiques, la structure de la particule observée dans un plan perpendiculaire au plan des feuillets peut se présenter suivant trois grands types d'empilements :

- i) **Empilement ordonné** où les feuillets sont empilés les uns sur les autres dans un ordre parfait. C'est le cas des phyllosilicates dont l'espace interfoliaire est vide ou anhydre (plutôt pour les kaolinites ou illites).
- ii) **Empilement semi-ordonné** (ou désordre translationnel). Dans ce cas, les feuillets successifs présentent des translations "semi-définies". Ils sont séparés par quelques molécules d'eau, l'épaisseur de la particule est variable et dépend du degré d'hydratation. Ils peuvent glisser latéralement les uns sur les autres.

- iii) *Empilement désordonné* (ou désordre turbostratique). Dans ce cas, des feuillets successifs présentent des translations et/ou des rotations quelconques dans tout l'édifice. Les feuillets sont séparés par un film d'eau permettant une libre rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan de la particule [**Pons (1980) ; Pédro (1994)**].

Il existe un nombre important de termes pour désigner les particules. Le plus petit élément cristallin (le plus petit volume cohérent) produisant des interférences dans un phénomène de diffraction X a été appelé par **Mering et Oberlin (1971)** "particule primaire". La particule plus grossière, obtenue après une dispersion dans certaines conditions, constituée par l'association de plusieurs particules primaires, a été désignée par les mêmes auteurs par le terme de "particule libre". La montmorillonite est généralement constituée par l'association de plusieurs particules primaires, dont l'extension latérale est particulièrement importante [**Pons et al. (1982) ; Ben Rhaiem et al. (1986) ; Tessier (1984)**]. Ces auteurs avaient été amenés à concevoir une juxtaposition, par les bords, des cristallites présentant une légère désorientation les unes par rapport aux autres. Toujours dans le cas de la montmorillonite, **Aylmore et Quirk (1971)** avaient introduit la formation, par chevauchement face-face à partir de particules libres ou primaires, d'édifices à extension latérale considérable : les "domaines".

Si nous nous limitons à la dimension des particules dans la direction perpendiculaire au plan des feuillets, l'épaisseur de ces particules a été évaluée, par l'analyse classique aux Rayons X des réflexions 001, à une dizaine de feuillets maintenus par les forces électrostatiques attractives entre les ions compensateurs et les feuillets. Elle fait généralement 8 à 10 nanomètres d'épaisseur (**figure III.4**). La taille des particules est à peu près constante, c'est-à-dire que lorsqu'une montmorillonite est gonflée, l'espace interfoliaire est augmenté et il y a moins de feuillets dans une particule [**Mathieu-Sicaud et Mering (1951) ; Le Pluart (2002) ; Jozja (2003)**].

D'autre part, la montmorillonite présente des substitutions isomorphes de type dioctaédrique [**Luckham et Rossi (1999)**]. Ce type de localisation des charges empêche les cavités hexagonales de deux feuillets adjacents de se superposer. L'arrangement global des feuillets, au sein d'une particule primaire de montmorillonite, est donc turbostratique. Ils présentent un désordre dans le plan latéral mais sont tous perpendiculaires à la direction z [**Didier (1972)**].

Cela a été bien confirmé dans le cas des montmorillonites calciques fortement hydratées en utilisant l'analyse de la diffusion aux petits angles et la microscopie électronique à transmission [**Pons et al. (1982) et (1987)**]. Ces auteurs ont défini la particule comme étant un empilement parallèle quel que soit le degré d'ordre dans la répétition de ces feuillets à l'intérieur de l'empilement. Comme nous le verrons plus loin, ces particules constituent les "parois" du réseau de pores développé au sein de l'échantillon et ont une épaisseur extrêmement variable en fonction de la teneur en eau de l'échantillon.

Dans la littérature, on trouve souvent des travaux sur des bentonites constituées par des minéraux non homogènes dites "interstratifiées" [**Caillère et al. (1982) ; Laribi et al. (2005)**]. Ces particules d'argile sont constituées par la superposition de feuillets qui sont :

- (i) Soit de nature différente (illite-smectite, vermiculite-smectite, etc..),
- (ii) Soit de même nature mais qui diffèrent par leurs remplissages interfoliaires comme le cas de la montmorillonite hydratée où l'espace interfoliaire peut contenir une, deux, trois ou quatre couches d'eau,
- (iii) Ou par la nature et le remplissage interfoliaire à la fois, comme le cas de l'illite-smectite avec des feuillets de smectite dans des états d'hydratation variables [**Ben Rhaïem et al. (1986) ; Jozja (2003)**].

Parmi ces minéraux, les interstratifiés illite/smectite sont les plus étudiés. On les trouve dans des bentonites couramment utilisées dans les boues de forage [**Jozja (2003) ; M'bodj et al. (2004) ; Laribi et al. (2005)**].

Dans le cas des minéraux interstratifiés, l'empilement se caractérise essentiellement par le mode de succession des feuillets de nature différente suivant la normale à leur plan. Ainsi si on considère un minéral interstratifié qui contient deux types de feuillets A et B, on peut envisager essentiellement trois types d'interstratifiés :

- **Ségrégés** : une particule donnée présente des séquences AAABBB (**figure III.5.a**). Le diagramme de diffraction X est la superposition des diagrammes produits par chacun des constituants,
- **Réguliers** : une particule donnée comporte des séquences ABABAB...AB (**figure III.5.b**). Une période de surstructure perpendiculairement au plan des feuillets égale à la somme des épaisseurs des deux feuillets apparaît ( $d_T = d_A + d_B$ ). Le diagramme de diffraction X comporte alors des réflexions basales de surstructure correspondant à  $d_T$ ,
- **Aléatoires** : tous les cas intermédiaires entre les deux décrits précédemment (**figure III.5.c**). Dans ce cas, les diagrammes de diffraction X présentent des réflexions (001) irrationnelles [**Mering (1949) Pedro (1994)**] et leur interprétation est très délicate.

### **C. L'agrégat :**

C'est un ensemble de particules primaires orientées dans toutes les directions. Les agrégats ont une taille qui varie de 0,1 à 10 microns comme il est montré sur la figure III.4 [**Le Pluart(2002)**].

Il s'agit d'un assemblage de particules dont l'arrangement est gouverné par le type de forces résultant des interactions entre particules (et du degré de compaction).

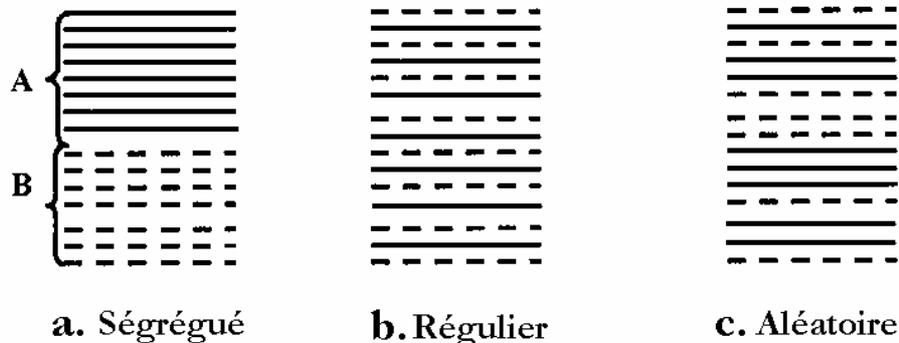


Figure III.5 : Différents modes de succession des feuillets au sein d'une unité interstratifiée

En effet, lorsque les forces répulsives sont dominantes, les particules s'orientent parallèlement et la structure est dite dispersée. Ces particules s'assemblent au sein *d'agrégats*, plus au moins denses selon la texture et le nombre des particules, ainsi que les distances entre celles-ci. Tessier (1975), en prenant pour référence les données de Mering et Oberlin (1971) et de Van Olphen (1963), portant sur les minéraux expansibles, a proposé une nomenclature pour nommer les différents modes d'association des particules (détaillés plus loin) : l'agrégat constitué de plusieurs particules primaires a été nommé *unité morphologique* ; le dernier niveau d'organisation est constitué par les *super-agrégats*, où se regroupent les agrégats.

Selon la quantité d'eau présente au sein du système et la nature de l'argile considérée, l'organisation sera plus ou moins variée. Il en résulte différents types de structuration comme, par exemple, dans le cas de la montmorillonite, qui possède des unités morphologiques très déformables. Ces déformations sont probablement plus aisées que dans les autres phyllosilicates, même si elles sont relativement limitées du fait que les particules possèdent une certaine rigidité [Luckham et Rossi (1999) ; Jozja (2003)].

On en conclut que l'organisation de la microstructure de la bentonite (du feuillet à l'assemblage d'agrégats) ne peut être interprétée que si l'organisation de l'espace poral est prise en considération. La dimension, la forme et la distribution des espaces poraux dépendent de la granulométrie de l'argile, de son caractère gonflant et aussi du fluide interstitiel et des contraintes auxquelles la bentonite est soumise. Touret *et al.* (1990) ont décrit l'existence de trois types d'espaces liés à l'organisation de la phase solide dans des argiles (Figure III.6) :

- *L'espace interfoliaire* sépare deux feuillets dans un empilement. Il est généralement occupé par les couches d'eau adsorbée (1 à 4) et des cations échangeables, et son épaisseur moyenne est comprise entre 1,5 et 2,5 nm.

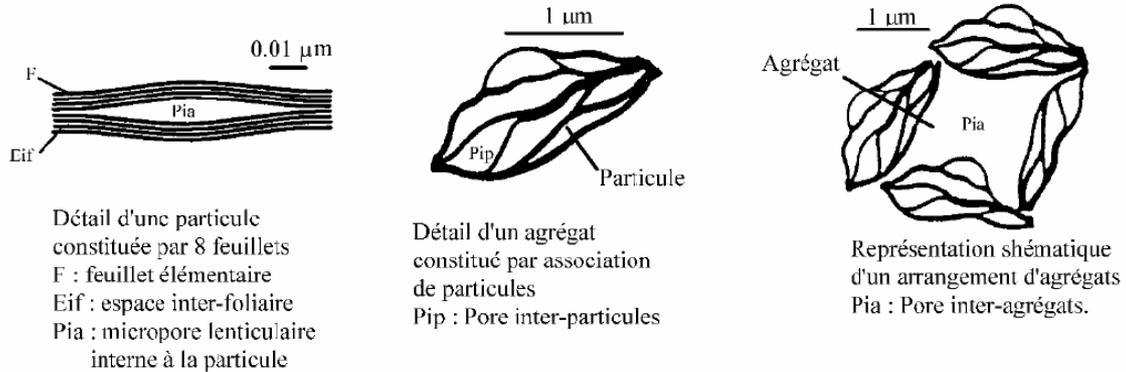


Figure III.6 : Les différents types d'espaces poreux [Touret et al. (1990)]

- **L'espace interparticulaire** séparant les particules argileuses qui forment les agrégats. Il est susceptible de diminuer jusqu'à atteindre la valeur de l'espace interfoliaire pour les argiles fortement compactées [Pusch (1982)]. Dans ce type d'espace, la double couche, qui sera traitée en détail plus loin, peut se développer. Les micropores lenticulaires sont intérieurs aux particules, à l'échelle de quelques nm.
- **L'espace interagrégat** a une section moyenne comprise entre 1,6 et 16 nm où l'eau circule librement (eau libre) limitant les effets électrostatiques de la double couche (figure III.6).

## VI. Les suspensions Argileuses :

Pour savoir bien maîtriser la stabilité puis les propriétés d'écoulement des suspensions concentrées, il est nécessaire d'avoir un contrôle sur les différentes interactions, qu'elles soient répulsives, attractives ou qu'elles entraînent ou pas la ségrégation des particules en suspension.

Nous définissons dans la suite les propriétés physico-chimiques des suspensions.

Les suspensions surtout celles d'argile comportons : la force ionique, les interactions de van der Waals et électrostatiques ne sont pas ajustables. Il est toutefois possible de contrôler leur stabilité avec l'ajout de polymères, mais il est alors plus difficile de comprendre les propriétés d'écoulement ou les liaisons entre structures et propriétés d'un système aussi complexe qu'une suspension d'argile/polymère.

### 1) Définition :

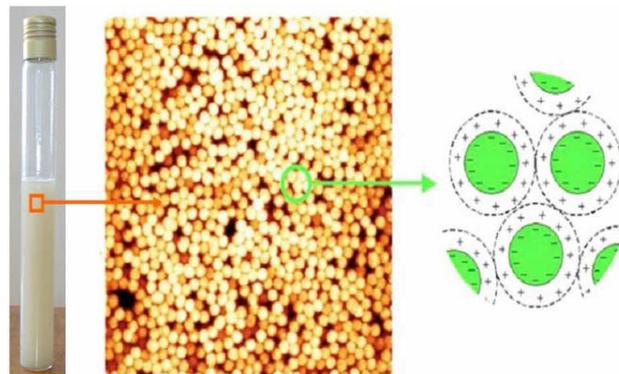
Une suspension ou dispersion est l'état d'un solide divisé, mêlé à la masse d'un liquide sans être dissous par lui. Les suspensions sont omniprésentes dans la vie courante : sang, peinture, céramique, ciment et bien sûr les boues de forage. Le contrôle de la structure des suspensions constitue donc un intérêt capital pour l'industrie. La stabilité et la rhéologie sont les deux grandeurs qu'il faut maîtriser dans une suspension. La stabilité dépend de la taille des particules mais aussi du contrôle des propriétés physico-chimiques de leurs surfaces.

Cette partie vise à mettre l'accent sur les paramètres physico-chimiques qui permettent de contrôler la stabilité de nos suspensions.

**La figure III.7** représente les trois échelles pertinentes dans l'étude des suspensions :

- ✓ Macroscopique, représentée par un échantillon homogène avec ou sans séparation de phase ;
- ✓ Microscopique, où l'on remarque le côté multiphasique (particules dans le liquide) ;
- ✓ Nanoscopique, qui est l'échelle des interactions de surface.

**Figure III.7:** Trois échelles caractéristiques dans une suspension.



Suivant qu'une particule soit Brownienne ou non, elle sera soumise ou non aux forces de gravitation, à l'agitation thermique et aura un comportement spécifique sous écoulement (force hydrodynamique).

## **2) Le mouvement brownien et la gravité :**

Des particules solides plongées dans un solvant sont soumises à des collisions de la part des molécules du fluide, à cause de l'agitation thermique. Si les particules sont suffisamment grandes, les chocs sont isotropes. La quantité de mouvement moyenne reçue est nulle. Seules les forces de gravité s'exercent sur les particules qui sédimentent. En revanche, pour de très petites particules, la quantité de mouvement induite n'a pas une moyenne nulle : les particules diffusent dans le liquide interstitiel. Cette diffusion s'oppose à la sédimentation et un état d'équilibre s'établit.

Ces mouvements browniens permettent aussi d'expliquer la capacité qu'ont certaines suspensions à recouvrer leurs propriétés initiales après une période de repos suffisamment longue.

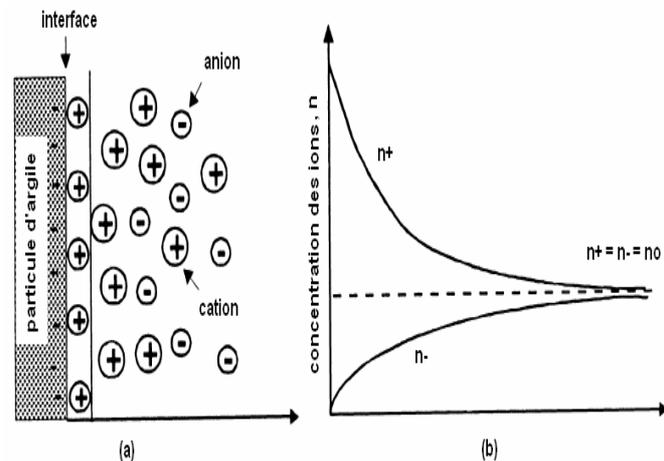
### 3) Interface minéral-solution :

#### ➤ Double couche électrique :

Les particules d'argile en suspension doivent leur stabilité à la répulsion mutuelle quand leurs doubles couches électriques diffuses se mettent en contact agissent l'un sur l'autre à l'approche. Dans les systèmes argile-eau, une double couche se forme à partir de la charge négative de surface et de la charge du cation compensateur **figure III.8**,

Dans le cas des particules d'argile, la charge négative est une conséquence des imperfections dans l'intérieur du cristal. Les colloïdes d'argile possèdent une charge constante, parce que sa charge extérieure résulte de la substitution isomorphe.

**Figure III.8 :** (a) Structure de la double couche électrique diffuse à la surface d (une particule d'argile, et (b) distribution de la concentration en anions ( $n^-$ ) et les cations ( $n^+$ ) en fonction de la distance de la surface avec une concentration en bloc de  $n_0$ .



Les ions autour de la particule d'argile sont électrostatiquement attirés par la surface de charge opposée. Ces ions ont une tendance de diffuser loin de la surface dans la solution où la concentration est inférieure. Par conséquent, la concentration des ions près de la surface des particules est grande, et elle diminue avec l'augmentation de la distance de la surface. La couche diffuse se compose non seulement d'un excès des ions du signe opposé; il y a une insuffisance des ions du même signe près de la surface, puisque les ions sont électro-statiquement repoussés par la surface. Ce caractère diffus de l'atmosphère des ions a été identifié par Gouy et Chapman qui ont présenté un traitement théorique de la distribution des ions. Leur théorie prévoit une diminution exponentielle approximative du potentiel électrique  $\psi$  de la solution avec une distance  $x$  du plan de la surface.

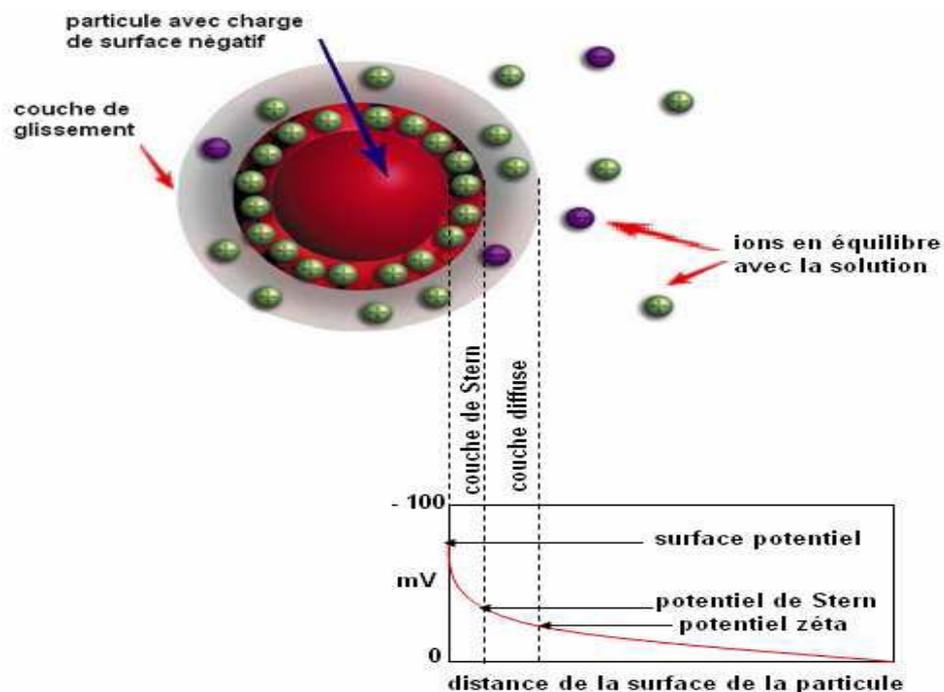


Figure III.9 : Représentation de la double couche électrique

➤ **Adsorption des ions sur la surface du minéral :**

L'adsorption est le phénomène qui consiste en l'accumulation d'une substance à l'interface entre deux phases (gaz-solide, gaz-liquide, liquide-solide, liquide-liquide, solide-solide).

Quand un solide est mis en contact avec une solution, chaque constituant de cette dernière : le solvant et le soluté, manifeste une tendance à l'adsorption à la surface du solide. Il y a donc une compétition en surface entre deux adsorptions qui sont concurrentielles, la qualité de chaque composé adsorbé dépend de sa nature chimique, de sa concentration et de la température. La couche physisorbée ne pourra être, le plus souvent, que mono-moléculaire, car, au-delà de la première couche, les interactions soluté-solvant l'emportent sur les interactions soluté surface.

**4) Les forces dans une suspension :**

➤ **Forces volumiques :**

Les forces dynamiques que nous considérons sont des forces dont l'amplitude dépend de la taille des particules. Nous en considérons trois : Brownienne, hydrodynamique et gravitationnelle. Les suspensions peuvent se séparer en deux familles de particules suivant qu'elles sont colloïdales ou non.

Une particule est considérée comme colloïdale lorsque sa taille est telle qu'aucune séparation de phase rapide ne se produit par sédimentation ou par crémage. La taille critique d'un colloïde dépend donc des caractéristiques physiques des constituants du système (viscosité du solvant, différence de densité entre la particule et le milieu continu...). Cette taille peut se

calculer simplement en comparant le temps caractéristique de sédimentation sur une distance de la taille du rayon de la particule et le temps pour que cette particule parcoure la même distance par agitation thermique.

Ainsi des particules colloïdales sont maintenues en suspension par le mouvement Brownien. Cette agitation permet des collisions entre les particules qui peuvent entraîner ou pas une agrégation suivant la nature des interactions de surface. Il est toutefois possible d'éviter ou de limiter la sédimentation d'une suspension de particules non colloïdales et non floculées en ajustant leur densité avec celle du milieu dispersant ou encore en augmentant la viscosité du milieu dispersant.

➤ **Forces de surface :**

La sédimentation peut être évitée si les particules interagissent entre elles pour former un réseau capable de résister à son propre poids. Ces interactions interparticulaires se contrôlent avec les forces de surface. Une suspension est stable devant la gravité sous deux conditions :

- ✓ Les particules doivent avoir un rayon  $a$  inférieur à un rayon critique  $r_c$ . Si  $r > r_c$  la structure devient instable sous l'effet de la gravité : elle s'effondre sous son propre poids.
- ✓ Leur concentration en solution doit être supérieure à une valeur critique. Il faut que leur concentration soit suffisante pour que les particules puissent former un réseau tridimensionnel rigide.

La formation d'une structure floculée permet d'éviter la sédimentation de particules non Browniennes. Cette structure est stable si les forces cohésives entre les particules sont comparables à la force de gravité qui s'exerce sur elles.

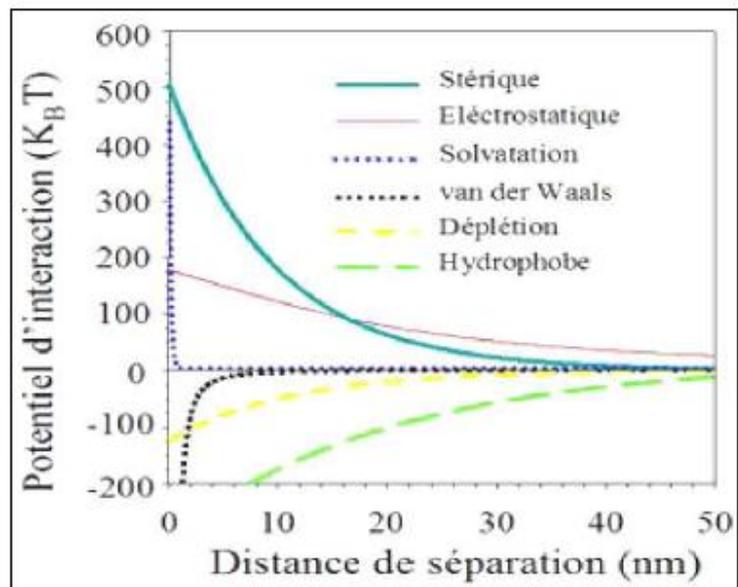
Il est important de maîtriser le profil du potentiel de surface de nos particules.

La stabilité colloïdale est gouvernée par le potentiel total  $V_t$  qui est la somme de toutes les contributions des potentiels issus des forces de surface. Nous dénombrons six forces de surface différentes qui sont de nature répulsive ou attractive:

- ✓ Répulsive : stérique, électrostatique, solvation
- ✓ Attractive : van der Waals, déplétion, hydrophobe et électrostatique (cas des ions multivalents).
- ✓ Le potentiel global s'écrit simplement comme la somme :

$$V_t = V_{str} + V_{elect} + V_{solv} + V_{vdW} + V_{dpl} + V_{hydr}$$

**Figure III.10: Potentiels d'interaction de surface en fonction de la distance à la surface**

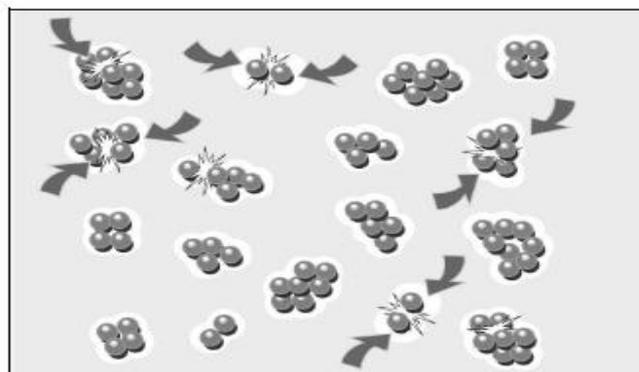


Les évolutions des potentiels d'interaction avec la distance à la surface d'une particule, de toutes ces forces sont représentées de manière schématique sur **la figure III.9**. Les forces d'origines stérique, électrostatique ou de solvatation sont de nature répulsive alors que celles de type van der Waals, de déplétion ou hydrophobe sont attractives.

**a) Forces de Van der Waals**

Au sein d'une molécule, le mouvement des électrons, chargés négativement, autour du noyau, chargé positivement, engendre des forces électromagnétiques attractives : les molécules se comportent comme des dipôles électriques où les charges opposées s'attirent. L'ensemble de ces forces est communément appelé forces de Van der Waals. Elles sont additives et varient avec la taille et la forme des surfaces de particules.

Les forces à longue distance issues des interactions de van der Waals sont toujours attractives entre des particules identiques. Le potentiel de van der Waals dépend de la distance avec une amplitude qui est fonction des propriétés diélectriques des particules en interaction et du milieu dispersant.

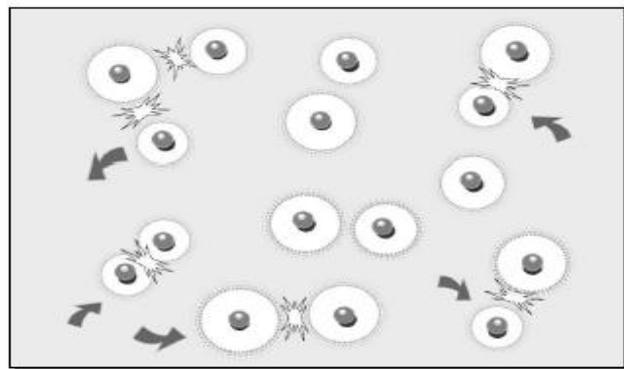


**Figure III.11 : Attraction des particules sous l'effet des forces de van der Waals**

Mais l'attraction ne va pas jusqu'au contact direct entre molécules ; lorsque les nuages électroniques s'interpénètrent, des forces répulsives apparaissent, (forces de Born), et viennent contrebalancer l'attraction. Il existe un puits de potentiel où l'énergie d'attraction est minimale.

**b) Forces électrostatiques :**

Dans les systèmes colloïdaux, les forces interparticulaires répulsives sont liées aux différentes charges surfaciques des particules en présence. Le milieu étant électriquement neutre, la répartition des charges n'est pas homogène, (les charges opposées s'attirent tandis que celles de même signe se repoussent). Cet effet est caractérisé par la force ionique :



**Figure III.12 : Répulsion des particules sous l'effet des forces électrostatiques**

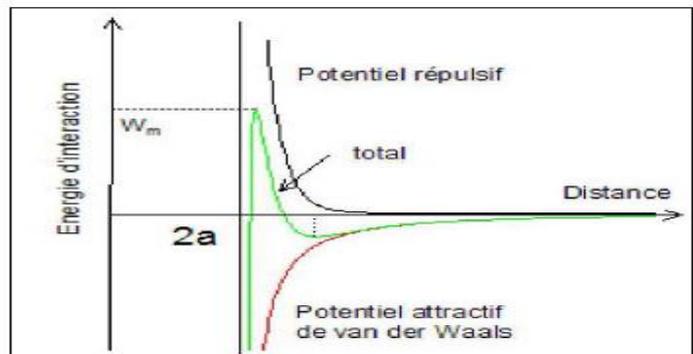
Les forces électrostatiques répulsives permettent de stabiliser les suspensions de particules. Dans notre cas, les particules d'argile et les macromolécules des polymères sont chargées négativement dans la gamme de pH utilisée (pH compris entre 9 et 10). Les charges de surface entraînent des répulsions à longues portées qui stabilisent la suspension.

**c) La théorie DLVO :**

La simple combinaison des forces attractives de van der Waals et répulsives de l'électrostatique permet de comprendre la tendance à l'agrégation ou à la stabilisation d'une suspension. La théorie la plus simple a été proposée dans les années 40 par les couples Deryaguin-Landau et Vervey-Overbeck. Le potentiel complet de DLVO prend en compte une contribution répulsive, une contribution de cœur dur et une contribution attractive de van der Waals.

La nature en loi de puissance du potentiel d'attraction de van der Waals le rend toujours plus important que le potentiel de la double couche répulsive à courte distance. L'attraction à courte distance sera donc toujours attractive. **La figure III.13** représente de manière schématique les profils d'interaction qui prennent place entre deux particules soumises à la combinaison de ces forces.

**Figure III.13: Représentation schématique de l'évolution de l'énergie d'interaction entre deux particules en fonction de leur distance de séparation.**



### 5) Adjuvants : cas des polymères :

Un autre moyen de contrôler l'état de dispersion d'une suspension consiste à ajouter des forces stériques, hydrophobes, de déplétions. Ces forces peuvent être introduites en adsorbant des molécules organiques sur la surface des particules. Pour que la répulsion soit efficace, il est important de respecter certaines règles qui prennent en compte le type de molécules adsorbées ainsi que leur concentration d'utilisation.

#### ➤ Effet de la nature du polymère :

Le choix du polymère dans une suspension tels que les fluides de forage est difficile et constitue un métier à part entière. L'architecture du polymère joue un rôle capital. Il est important de contrôler :

- ✓ L'adsorption ou pas du polymère sur la surface minéral ;
- ✓ Les parties hydrophiles et hydrophobes de la chaîne ;
- ✓ La densité et l'emplacement des charges (positif ou négatif voire les deux) ;
- ✓ La taille de la chaîne principale, des greffons ;
- ✓ La rigidité, comportement du polymère dans le solvant.

L'adsorption d'un polymère sur la surface des particules dépend de tous ces paramètres mais aussi de sa concentration.

#### ➤ Effet de la concentration :

Le comportement d'un polymère mis dans une suspension dépend de sa nature mais aussi de sa concentration. Les évolutions avec la concentration sont différentes suivant que le polymère s'adsorbe ou pas sur la surface des particules.

## *Partie Expérimentale*

### **Méthodologie et objectif du travail pratique :**

Cette étude a pour objectif de formuler une suspension destinée aux boues de forage à base d'eau (WBM) à l'aide d'une bentonite calcique Algérienne -région de Mostaganem.

Cette partie est divisée en deux axes principaux :

I- Étude rhéologique et stabilité des suspensions destinées à la fabrication des boues de forage, dans cette partie :

**En premier lieu**, Etude de l'effet de la chaux sur les caractéristiques rhéologiques et physico-chimiques des suspensions bentonite calcique.

**En second lieu**, Etude de l'effet de gypse sur les caractéristiques rhéologiques et physico-chimiques des suspensions Bentonite Calcique.

**En troisième lieu**, Suspension bentonite calcique + Chaux : étude de l'effet de mixte métal hydroxydes (MMH) sur les propriétés rhéologiques et physico-chimiques.

**En Quatrième lieu**, Suspension bentonite calcique + Gypse : étude de l'effet de mixte métal hydroxydes (MMH) sur les propriétés rhéologiques et physico-chimiques,

II- Effet de réducteur de filtrat API/HPHT sur les propriétés rhéologiques de la suspension bentonite calcique/MMH.

Puis on termine par une conclusion générale et des recommandations.

## I) Étude rhéologique et stabilité des suspensions destinées à la fabrication des boues de forage :

La présente étude vise à expliquer l'importance de la rhéologie des composés d'une part par l'analyse systématique des constituants du fluide de forage indépendamment du système complet, et d'autre part par l'étude de la contribution de l'ensemble des additifs sur les propriétés rhéologiques et le Potentiel Zeta.

Un intérêt particulier a été donné à la caractérisation des produits utilisés dans ce travail afin de présenter la matière avec laquelle nos systèmes dispersés ont été préparés.

Sans oublier la particularité dans ce travail est l'utilisation la bentonite algérienne à son état brute –calcique, sans avoir un préalable traitement avec Soda Ash provient de gisement de Mostaganem.

### 1) Caractérisation de la bentonite :

#### ➤ Composition chimique.

L'Analyse chimique de cette bentonite est donnée dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1: Composition chimique de la bentonite calcique.**

Oxyde	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	MnO	PAF /1100°C
%	46.1	18.0	1.62	Tr	0.65	0.87	1.21	0.16	28

#### ➤ Analyse par diffraction des rayons X.

**Tableau IV.2: Composition minéralogique de la bentonite.**

Échantillon	Minéraux argileux		Minéraux non argileux			
Teneur %	Illite	Mont	Calcite	Dolomite	Feldspath	Quartz
	5	95	4	-	Tr	13

Selon le **tableau VI.2** de l'échantillon de bentonite calcique issue du gisement de Mostaganem, la montmorillonite est le minéral argileux prépondérant. L'argile contient également des impuretés sous forme de quartz et traces feldspathiques.

2) L'effet de la chaux sur les propriétés physicochimiques et rhéologiques :

Cette partie est consacrée à l'étude physicochimique et rhéologique de la suspension bentonite calcique avec l'addition de la chaux. L'objectif de l'ajout de cette dernière est d'améliorer la qualité de gonflement de la bentonite calcique. Et de comprendre l'influence de la chaux sur les propriétés rhéologiques du système.

A. Caractéristiques de la suspension de Bentonite Calcique + Chaux :

➤ Suspension 20kg/m<sup>3</sup> BC + Chaux :

• Etude Rhéologique :

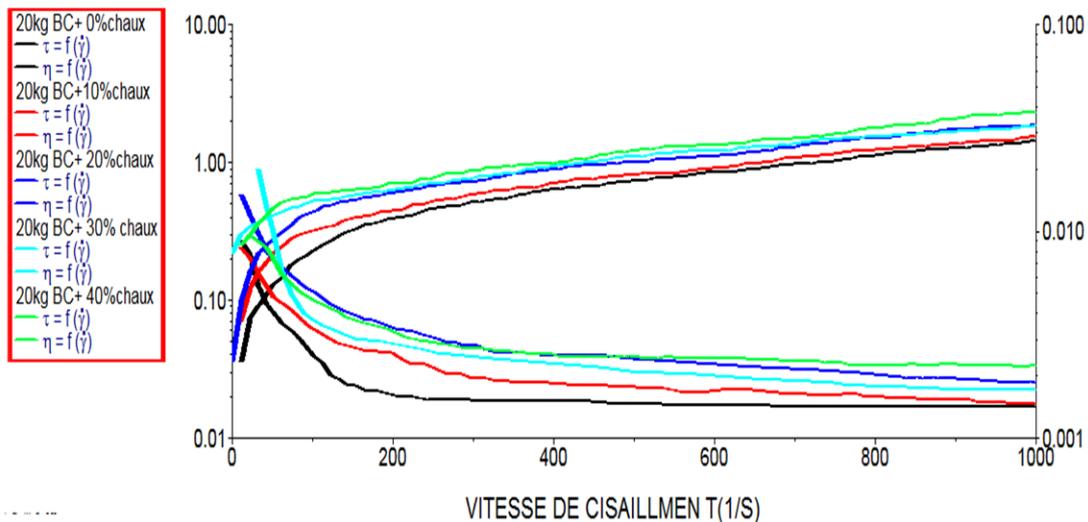


Figure IV.1: Rhéogrammes de suspension 20 kg/m<sup>3</sup> BC + Chaux.

• Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta

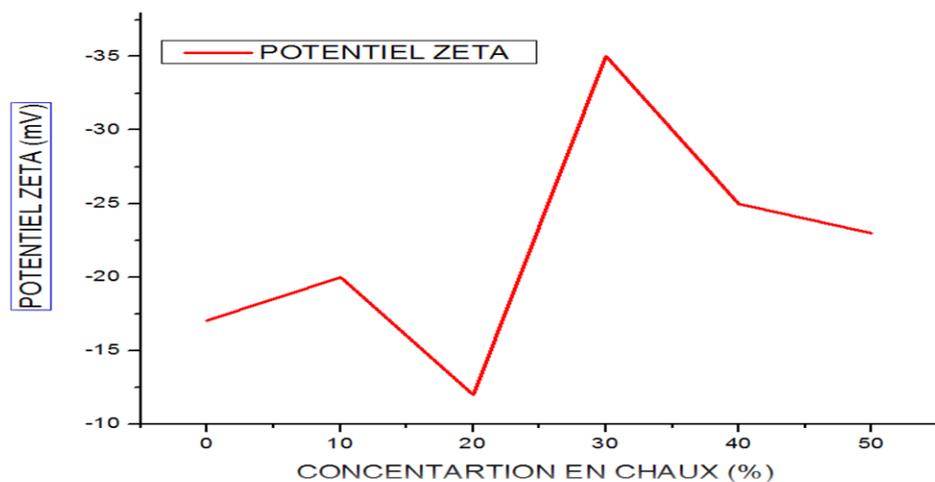


Figure IV.2: Potentiel Zêta de suspension 20Kg/m<sup>3</sup> BC + Chaux.

**Commentaire:**

La **Figure IV.1** présente les courbes d'écoulement des mélanges de bentonite à  $20 \text{ Kg/m}^3$  avec la chaux à plusieurs concentrations.

Toutes les solutions montrent un écoulement non newtonien. La variation de la viscosité des dispersions aqueuses de  $20 \text{ Kg/m}^3$  BC + la chaux à différentes concentrations, a été examinée en fonction du gradient de cisaillement. La viscosité a diminué avec le taux de cisaillement. Cependant, la viscosité de la suspension a augmenté avec sa concentration. Une caractéristique importante de la rhéologie de la bentonite calcique est la présence d'une contrainte seuil, qui représente un effort exigé pour commencer l'écoulement. Cette contrainte diminue avec la diminution de la concentration.

Le modèle de Herschel Buckley est celui qui convient pour décrire les propriétés rhéologiques des solutions, la gomme de la suspension s'est comportée en solution comme un fluide pseudo plastique (rhé fluidifiant) avec une contrainte seuil.

Selon la **figure IV.2** on observe une forte augmentation de potentiel zêta qui a été observée à 30% de chaux qui dépasse une valeur de  $-33.3 \text{ mV}$ . et d'après la **figure (IV.3)** et à cette concentration au chaux on a une bonne stabilité de suspension après 24 heures de repos



**Figure IV. 3 : suspension  $20 \text{ Kg/m}^3$  BC + 30% Chaux.**

- *Suspension 30kg/m<sup>3</sup> BC + Chaux :*
  - *Etude Rhéologique :*

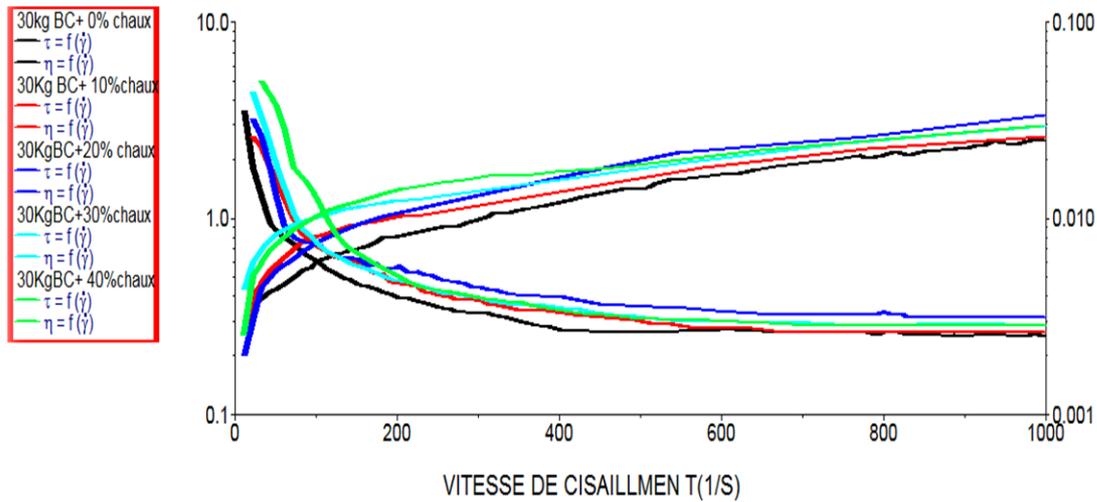


Figure IV.4 : Rhéogrammes de suspension 30 kg/m<sup>3</sup> BC + Chaux.

- *Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta*

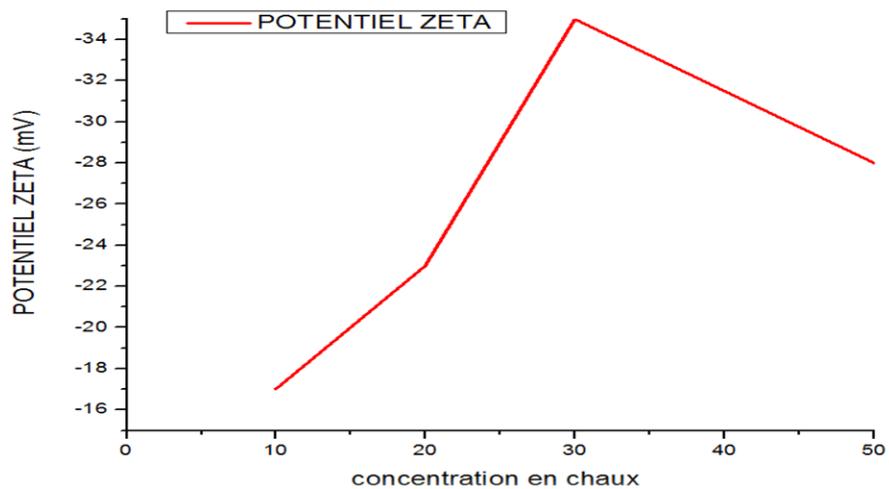


Figure IV.5 : Potentiel zêta de suspension 30 Kg/m<sup>3</sup>BC + Chaux.

**Commentaire:**

De même que les solutions de 20 Kg/m<sup>3</sup> bentonite calcique, les courbes d'écoulement des solutions de **30 Kg/m<sup>3</sup>BC +Chaux** qui montrent un caractère pseudo plastique (rhé fluidifiant) obéissant au modèle rhéologique de loi de puissance, où la viscosité augmente avec l'augmentation de la concentration est diminué avec l'augmentation du taux de cisaillement.

**La figure (IV.4)** montre l'augmentation de la viscosité avec l'augmentation de la concentration en chaux et une augmentation de la contrainte de cisaillement que dépasse 5,00 Pa pour 40 % de chaux.

Mais on observe d'après **La figure IV.6** une forte augmentation de potentiel zêta qui a été observée à 30% de chaux qui dépasse une valeur de -33.3 mV.

**La figure IV.6** une bonne stabilité de suspension après 24 heures de repos.



*La figure IV.6 : suspension 30 Kg/m<sup>3</sup>BC + 30% Chaux*

➤ Suspension 40kg/m<sup>3</sup> BC + Chaux :

- Etude Rhéologique :

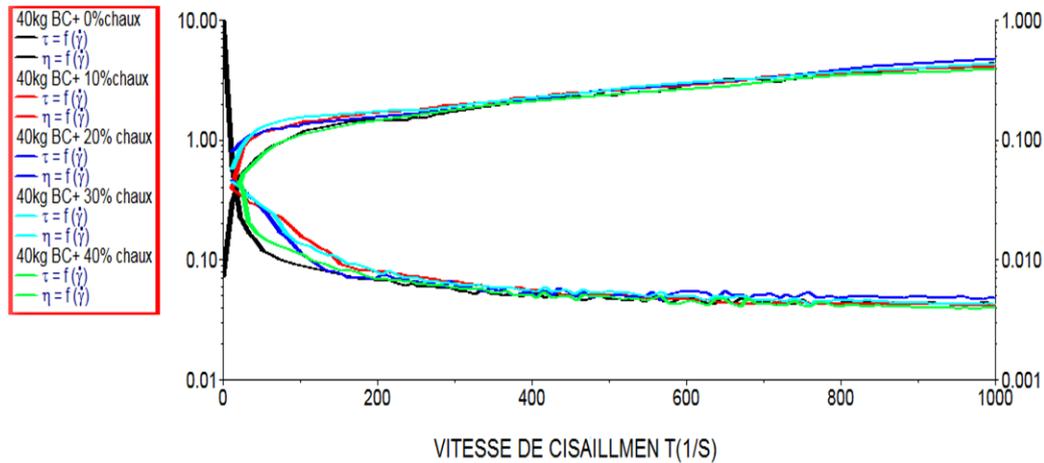


Figure IV.7 : Rhéogrammes de suspension 40 kg/m<sup>3</sup> BC + Chaux

- Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta:

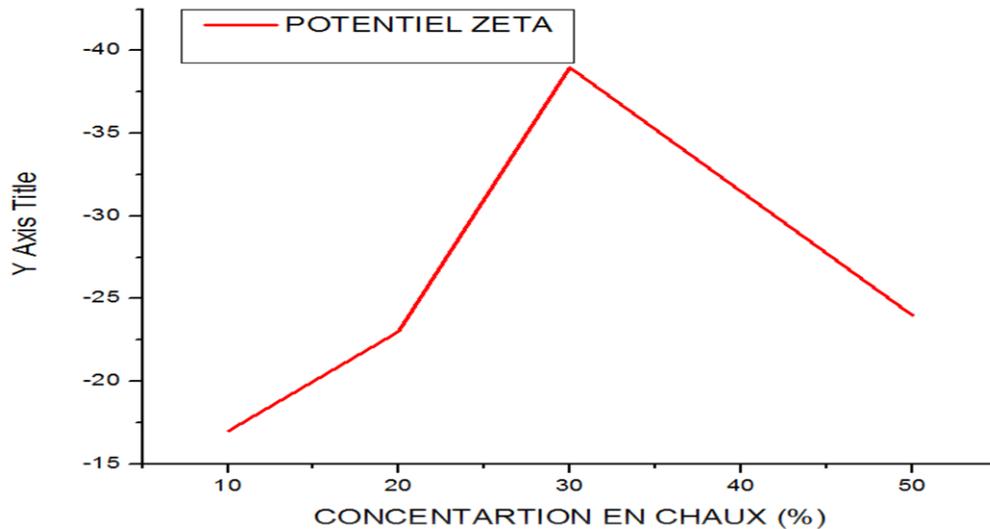


Figure IV.8 : Potentiel Zêta de suspension 40 Kg/m<sup>3</sup>BC + Chaux.

**Commentaire:**

Les courbes d'écoulement des solutions de 40 Kg/m<sup>3</sup>BC + Chaux qui montrent un caractère pseudo plastique (rhé fluidifiant) où la viscosité augmente avec l'augmentation dans la concentration du la chaux est diminué avec l'augmentation du taux de cisaillement.

La figure (IV.7) montre l'augmentation de la viscosité avec l'augmentation de la concentration en chaux.

La Figure IV.8 montre une augmentation du potentiel Zêta pour la concentration de 30% de chaux, ceci peut être expliqué par l'apport des charges. La densité des charges en signe positif augmente dans le milieu d'où l'explication de cette augmentation dans le potentiel Zêta, puis il diminue légèrement pour une concentration de 40% liée certainement à la saturation en charge du milieu.

La Figure IV.9 montrera qu'une concentration de 40% de chaux en a une bonne suspension.



La figure IV.9 : suspension 30 Kg/m<sup>3</sup>BC + 40% Chaux

#### Conclusion :

La chaux est un corps chimique minéral, l'oxyde de calcium de formule brute (Ca(OH)<sub>2</sub>), l'ajout de chaux provoque une augmentation de la quantité d'ions Ca<sup>2++</sup> et OH<sup>-</sup> en Solution de bentonite calcique plus l'eau. Ces ions vont réagir avec les constituants du matériau, modifiant ainsi leurs caractéristiques par différents processus physico-chimiques à court terme. L'utilisation de la chaux dans les boues de forage aboutit principalement à l'amélioration des caractéristiques mécaniques du matériau final, selon la concentration de chaux utilisée et les conditions de traitement.

Les courbes d'écoulement des solutions de la bentonite calcique plus la chaux qui montrent un caractère pseudo plastique (rhé fluidifiant) obéissant au modèle rhéologique de loi de puissance, où la viscosité augmente avec l'augmentation dans la concentration de la chaux et tous les *Rhéogrammes* montre l'augmentation de la viscosité avec l'augmentation de la concentration de la chaux est diminué avec l'augmentation du taux de cisaillement. Ce comportement en milieu calcique pourrait s'expliquer par l'adsorption d'ions calcium à la surface des argiles qui assura le gonflement de la bentonite calcique. [Carty M. W., "The colloidal nature of kaolinite". *The American Ceramic Society Bulletin*, 1999, 78, 72-76].

Selon toutes les figures l'augmentation du potentiel Zêta en fonction de la concentration ceci peut être expliqué par l'apport des charges. La densité des charges négatif augmente dans le milieu d'où l'explication de cette augmentation dans le potentiel Zêta, puis il diminue légèrement pour une concentration de 40% liée certainement à la saturation en charge du milieu.

3) L'effet de Gypse sur les propriétés physicochimiques et rhéologiques :

Cette partie est consacrée à l'étude physicochimique et rhéologique de la suspension bentonite calcique avec l'addition de gypse. L'objectif de l'ajout de cette dernière est d'améliorer la qualité de gonflement de la bentonite calcique. Et de comprendre l'influence de gypse sur les propriétés rhéologiques du système.

- *Suspension 20kg/m<sup>3</sup> BC + Gypse:*
  - *Etude Rhéologique :*

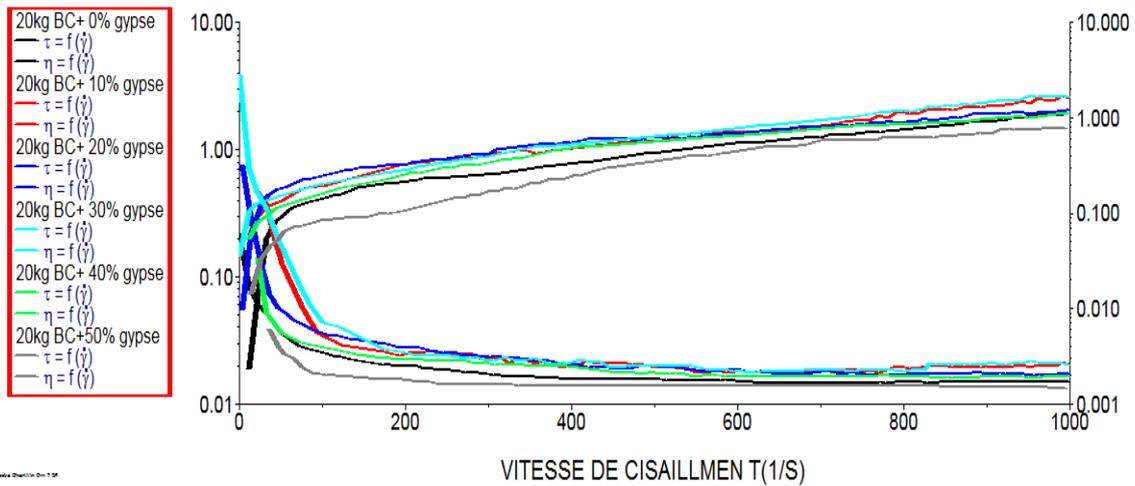


Figure IV.10: Rhéogrammes de suspension 20 Kg/m<sup>3</sup> BC + gypse.

- *Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta:*

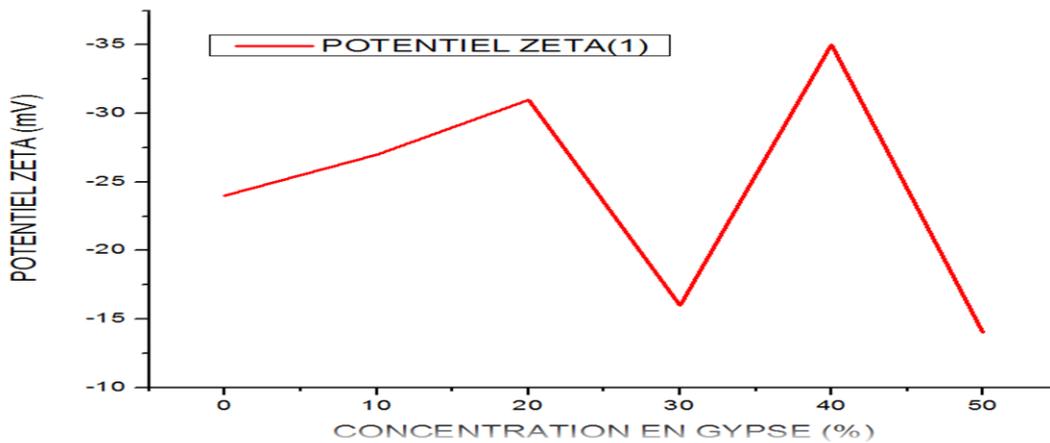


Figure IV.11: Potentiel Zêta de suspension 20 Kg/m<sup>3</sup> BC + gypse

Commentaire:

La **Figure IV.10** montre une augmentation de la contrainte de cisaillement que dépasse **1,00Pa** pour **50 %** de gypse et une diminution de la viscosité qui ne dépasse pas **0,05pas**, avec l'augmentation du pourcentage de traitement en gypse mais on remarque une forte augmentation de potentiel zêta qui a été observée à une concentration de **40%** de gypse jusqu'à y arrivée à une valeur de **-35 mV**.

Et d'après **Figure IV.12** en remarque une bonne stabilité de la suspension après **24** heures de repos.



Figure IV.12 : suspension  $20 \text{ Kg/m}^3 \text{ BC} + 40\% \text{ gypse}$

➤ Suspension  $30\text{kg/m}^3 \text{ BC} + \text{Gypse}$ :

- Etude Rhéologique :

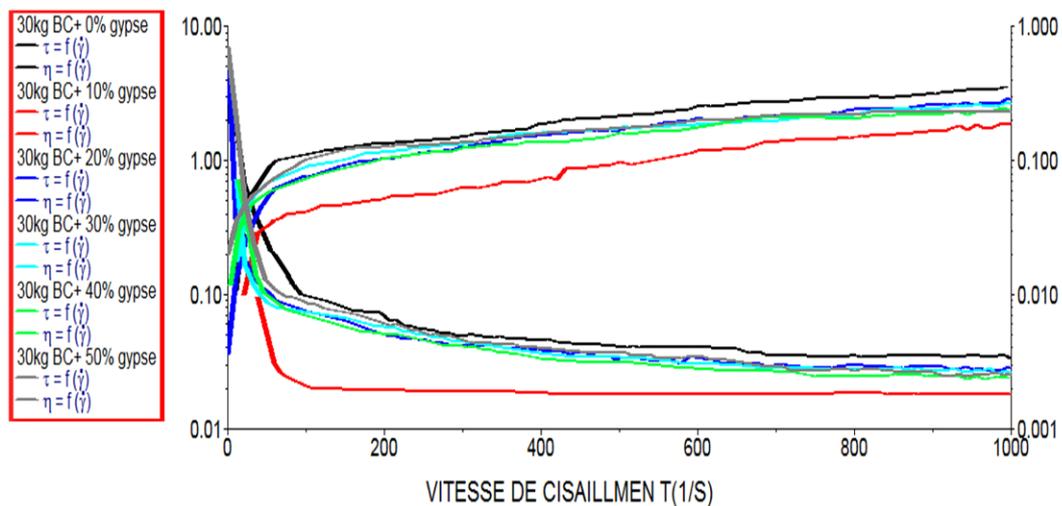
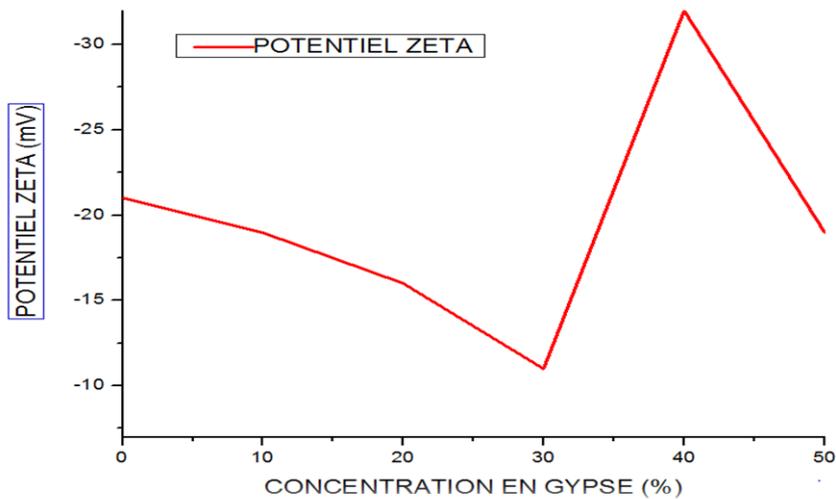


Figure IV.13: Rhéogrammes de suspension  $30 \text{ Kg/m}^3 \text{ BC} + \text{gypse}$ .

- *Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta:*



**Figure IV.14 : Potentiel Zêta de suspension 30 Kg/m<sup>3</sup>BC + gypse**

**Commentaire :**

La **Figure IV.12** présente les courbes d'écoulement (représentation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement) des mélanges de bentonite à 30kg / m<sup>3</sup> avec gypse à plusieurs concentrations, la figure montre clairement que les mélanges présentant un comportement rhéologique de type non-newtonien

Pour tous les concentrations en gypse il y a une augmentation de la contrainte de cisaillement qui dépasse 6,00 Pa pour 50% de gypse mais on observe une forte augmentation de potentiel zêta qui a été observé à 40% de gypse qui dépasse une valeur de -30 (mV)

Cette augmentation de potentiel de zêta peut être expliquée par la densité des charges en signe positive augmente dans le milieu

D'après la **Figure IV.15** et à cette concentration on a une bonne stabilité de suspension après 24h de traitement.



**Figure IV.15 : suspension 30 kg/m<sup>3</sup> BC + 40% gypse.**

➤ Suspension 40kg/m<sup>3</sup> BC + Gypse:

- Etude Rhéologique :

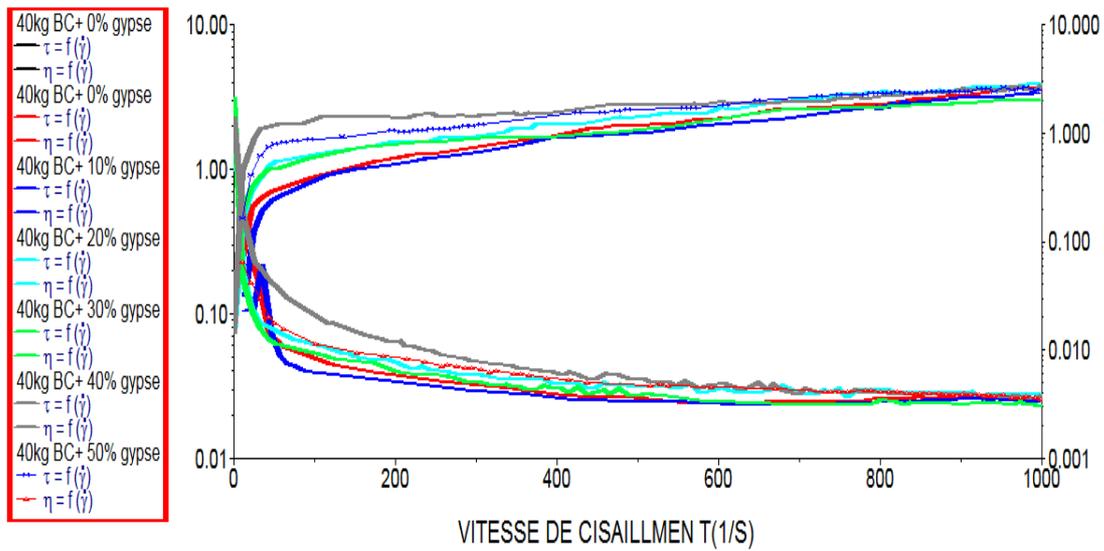


Figure IV.16 : Rhéogrammes de suspension 40 kg/m<sup>3</sup> BC + gypse.

- Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta:

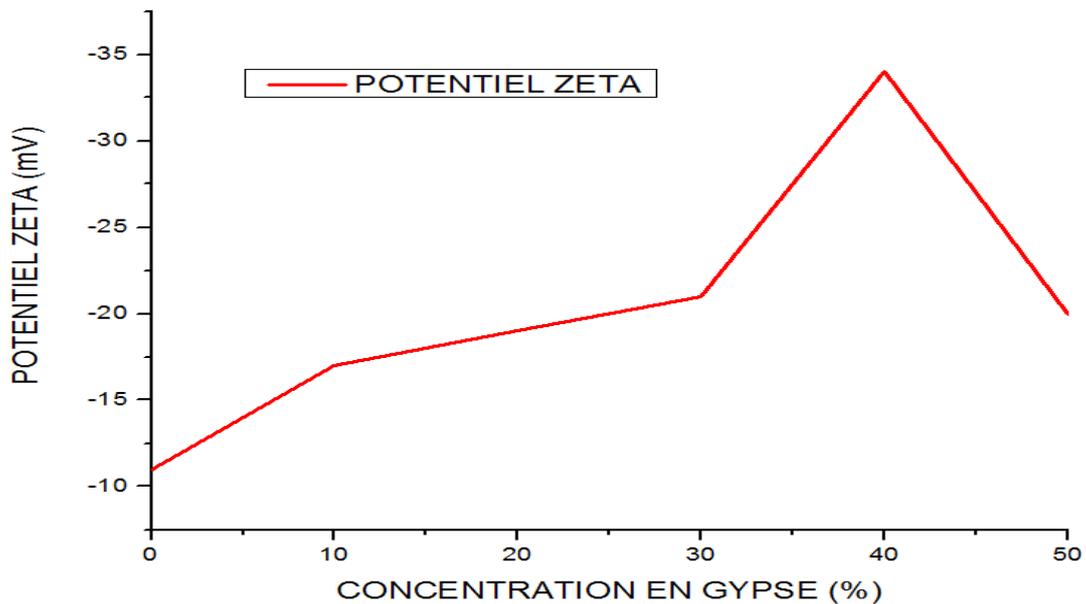


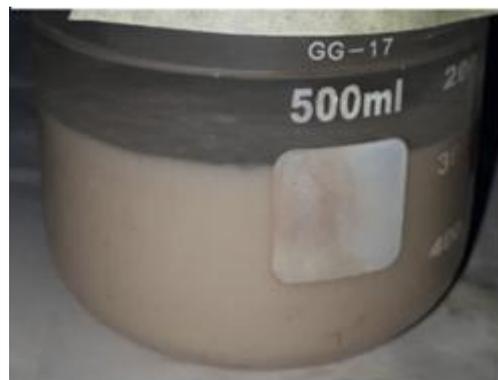
Figure IV.17 : Potentiel Zêta de suspension 40 kg/m<sup>3</sup> BC + Gypse.

**Commentaire :**

On observe dans La **Figure IV.16** que Toutes les solutions montrent un écoulement non-newtonien, avec une variation de la viscosité des dispersions aqueuses de bentonite calcique, a différant concentration de gypse examine en fonction gradient de cisaillement.

La viscosité a diminué avec le taux de cisaillement, ce pondant la viscosité a augmenté avec sa concentration une caractéristique importante de la rhéologie et la présence d'une contrainte seuil qui représente un effort exige pour commence l'écoulement.

Le modelé de Herschel Buckley est celui qui convient pour d'écrire les propriétés rhéologique des solutions de la suspension ce comporte on solution comme un fluide pseudo plastique avec une contrainte seuil.



**Figure IV.18 : suspension 40 kg/m<sup>3</sup> BC +40% gypse**

Selon la **Figure IV.17** l'augmentation de potentiel zêta pour la concentration de 40% en remarque une forte augmentation de potentiel zêta qui a été observée à une concentration de 40% de gypse jusqu'à y arrivée à une valeur de -35 mV. Puis il diminue légèrement pour une concentration de 50% lie certainement a la saturation en charge de milieu. La **Figure IV.18** montrons que a une concentration de 40% de gypse en a une bonne suspension

- *Suspension 50kg/m<sup>3</sup> BC + Gypse:*
  - *Etude Rhéologique :*

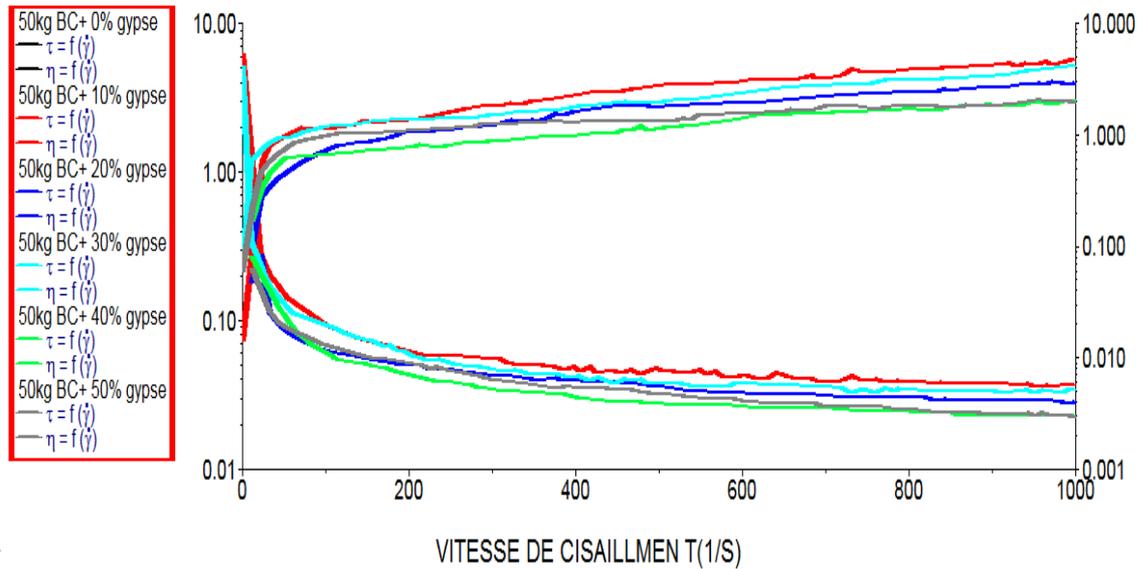


Figure IV.19 : Rhéogrammes de suspension 50 kg/m<sup>3</sup> BC + gypse

- *Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta:*

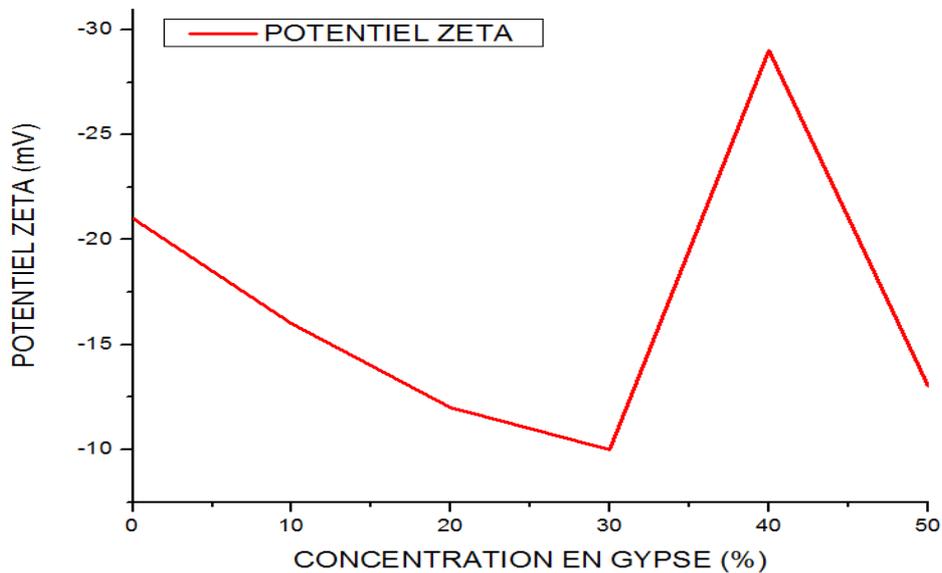


Figure IV.20 : Potentiel Zêta de suspension 50 kg/m<sup>3</sup> BC + Gypse.

**Commentaire :**

La **Figure IV.19** montre une augmentation de la contrainte de cisaillement que dépasse 1,00 Pa pour 50 % de gypse et une diminution de la viscosité qui ne dépasse pas 0,05 Pa S ,avec l'augmentation du pourcentage de traitement en gypse mais en remarque une forte augmentation de potentiel zêta qui a été observée à une concentration de 40% de gypse jusqu'à y arrivée à une valeur de -35 mV. (**Figure IV.20**)

Et d'après la **Figure IV.21** en Remarque une bonne stabilité de la suspension après 24 heures de repos.



**Figure IV.21 : suspension 50 kg/m<sup>3</sup> BC + 40% gypse.**

**Conclusion :**

Le Gypse est un corps chimique minéral, de formule brute ( $\text{CaSO}_4$ ), l'ajout de Gypse provoque une augmentation de la quantité d'ions  $\text{Ca}^{2+}$  en Solution de bentonite calcique plus l'eau. Ces ions vont réagir avec les constituants du matériau, modifiant ainsi leurs caractéristiques par différents processus physico-chimiques à court terme. L'utilisation de la chaux dans les boues de forage aboutit principalement à l'amélioration des caractéristiques mécaniques du matériau final, selon la concentration de chaux utilisée et les conditions de traitement.

Les courbes d'écoulement des solutions de la bentonite calcique plus la chaux qui montrent un caractère pseudo plastique (rhé fluidifiant) obéissant au modèle rhéologique de loi de puissance, où la viscosité augmente avec l'augmentation dans la concentration de la chaux et tous les *Rhéogrammes* montre l'augmentation de la viscosité avec l'augmentation de la concentration de la chaux est diminué avec l'augmentation du taux de cisaillement. Ce comportement en milieu calcique pourrait s'expliquer par l'adsorption d'ions calcium à la surface des argiles qui assura le gonflement de la bentonite calcique.

Selon toutes les figures l'augmentation du potentiel Zêta en fonction de la concentration ceci peut être expliqué par l'apport des charges. La densité des charges négatif augmente dans le milieu d'où l'explication de cette augmentation dans le potentiel Zêta, puis il diminue légèrement pour une concentration de 50% liée certainement à la saturation en charge du milieu.

**4) Suspension bentonite calcique + Chaux : étude de l'effet de mixte métal hydroxydes (MMH) sur les propriétés rhéologiques et physico-chimiques :**

Pour étudier l'effet de MMH sur le comportement rhéologique des suspensions argileuses, nous avons choisi de fixer la concentration de la chaux à 30%. Cette concentration moyenne, utilisée dans la formulation des boues de forage, permet de mettre en évidence l'effet de mixte métal hydroxydes (MMH) sur la suspension de bentonite.

➤ **Suspension 20 Kg/m<sup>3</sup>BC + 30% Chaux + MMH):**

• **Etude Rhéologique :**

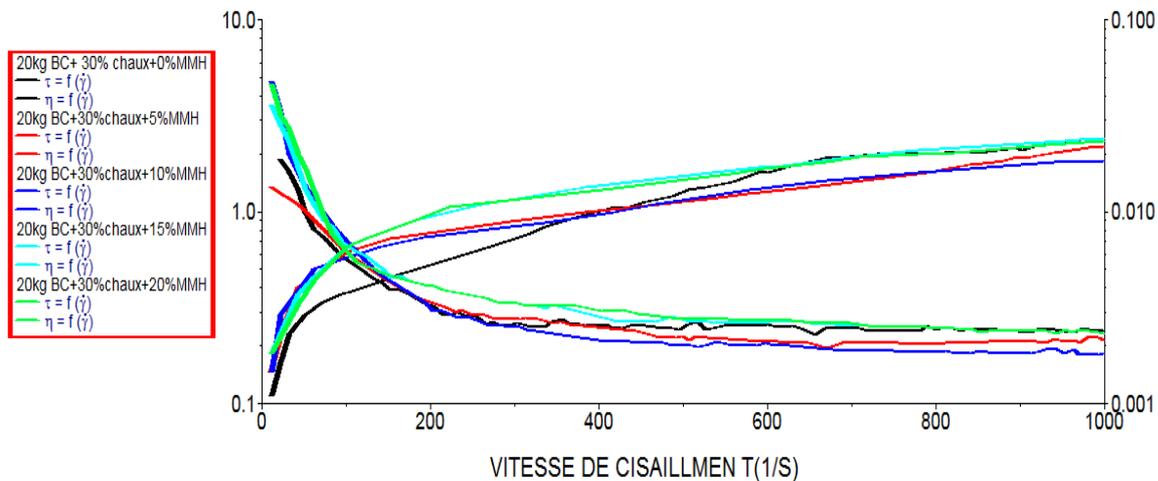


Figure IV.22: Rhéogrammes de suspension 20 Kg/m<sup>3</sup>BC + 30% Chaux + MMH.

• **Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta:**

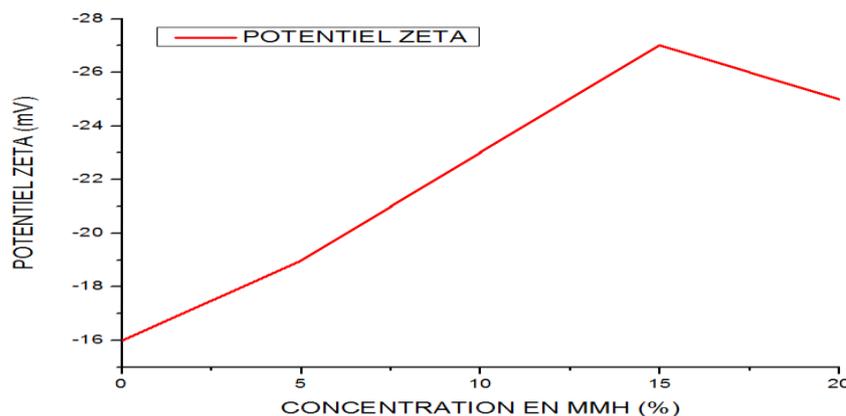


Figure IV.23 : Potentiel Zêta de suspension 20 Kg/m<sup>3</sup>BC + 30% Chaux + MMH

**Commentaire :**

Nous avons représenté sur **la figure IV.22** les courbes d'écoulement de la suspension  $20 \text{ Kg/m}^3$  bentonite Calcique + 30%Chaux de référence et la solution de MMH à différentes concentrations (entre 05% et 20%). On remarque une augmentation de la viscosité en fonction de la concentration de MMH. Le comportement rhéologique de la solution peut être décrit d'une manière satisfaisante par le modèle de Herschel-Bulkley. L'effet de l'ajout de MMH sur les propriétés rhéologiques de la suspension de  $20 \text{ Kg/m}^3$  bentonite Calcique + 30%Chaux est montré dans **la figure IV.22**, On observe une augmentation de la viscosité apparente en fonction de la concentration de MMH. À cisaillement égal, et pour la même concentration de MMH, la viscosité apparente du mélange bentonite-chaux-MMH reste toujours supérieure à la viscosité de la solution de la référence. Une répulsion mutuelle entre les charges fait que les chaînes enroulées aléatoirement s'allonge linéairement, et de ce faite la viscosité augmente. Et ceci explique l'augmentation du potentiel zêta avec l'augmentation de la concentration en MMH mais il diminue légèrement pour une concentration de 20% lié certainement à la saturation en charge du milieu comme montre **la figure IV.23**.



**Figure IV.24 :  $20 \text{ Kg/m}^3 \text{ BC} + 30\% \text{ Chaux} + 15\% \text{ MMH}$ .**

➤ Suspension 30 Kg/m<sup>3</sup>BC + 30% Chaux + MMH):

• Etude Rhéologique :

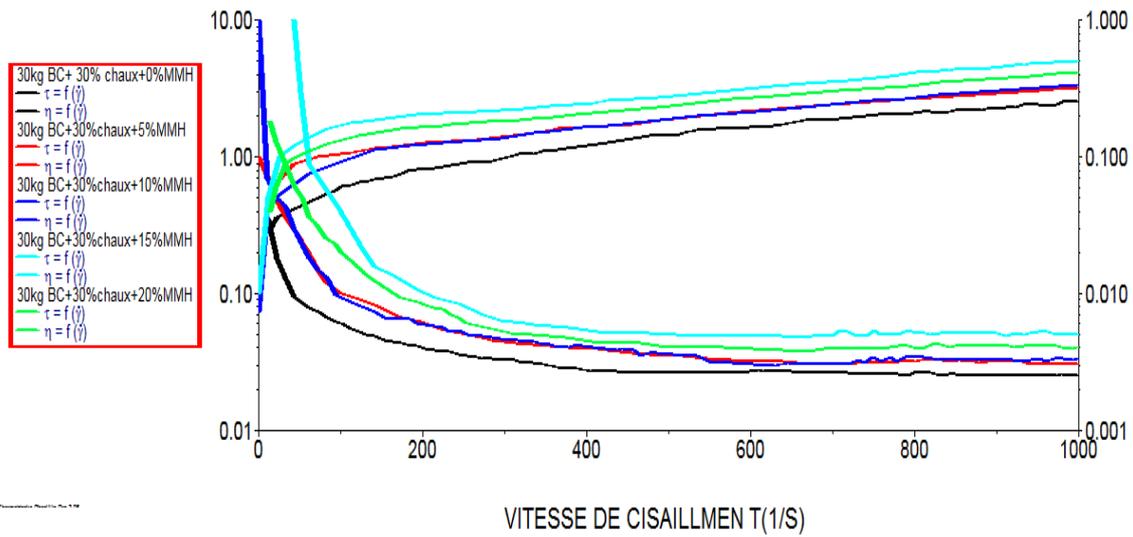


Figure IV.25: Rhéogrammes de suspension 30 Kg/m<sup>3</sup>BC + 30% Chaux + MMH.

• Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta:

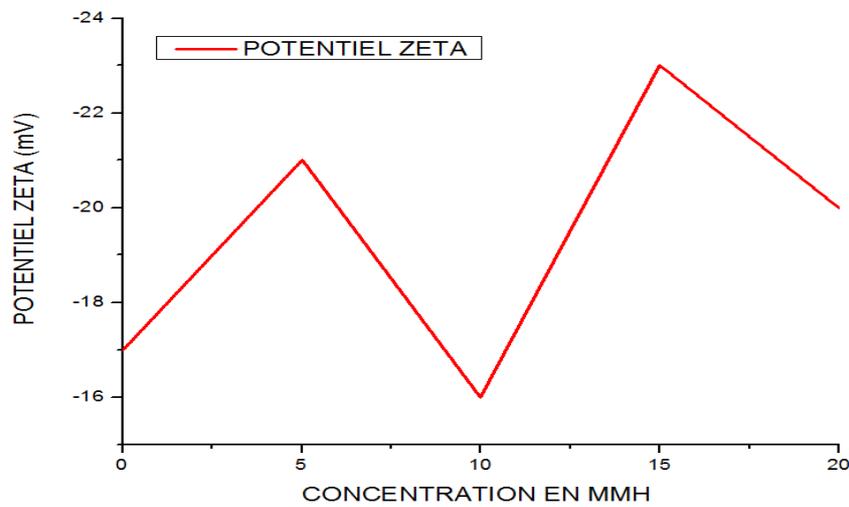


Figure IV.26 : Potentiel Zêta de suspension 30 Kg/m<sup>3</sup>BC + 30% Chaux +MMH

**Commentaire :**

De même que les solutions de  $30 \text{ Kg/m}^3 \text{BC} + 30\% \text{Chaux} + \text{MMH}$ , les courbes d'écoulement des solutions de  $30 \text{ Kg/m}^3 \text{BC} + 30\% \text{Chaux} + \text{MMH}$  qui montrent un caractère pseudo plastique (rhéo fluidifiant) obéissant au modèle rhéologique de loi de puissance, où la viscosité augmente avec l'augmentation dans la concentration du MMH est diminué avec l'augmentation du taux de cisaillement.

**La figure (IV.25)** montre l'augmentation de la viscosité avec l'augmentation de la concentration en MMH et une augmentation de la contrainte de cisaillement que dépasse  $8,00 \text{ Pa}$  pour  $20\%$  du mmh.

Mais on observe d'après **La figure IV.26** une forte augmentation de potentiel zêta qui a été observée à  $15\%$  de MMH qui dépasse une valeur de  $-24.3 \text{ mV}$ .

**La figure IV.27** une bonne stabilité de suspension après 24 heures de traitement



**Figure IV.27 :  $30 \text{ Kg/m}^3 \text{BC} + 30\% \text{Chaux} + 15\% \text{MMH}$**

➤ Suspension  $40 \text{ Kg/m}^3 \text{BC} + 30\% \text{Chaux} + \text{MMH}$ :

• Etude Rhéologique :

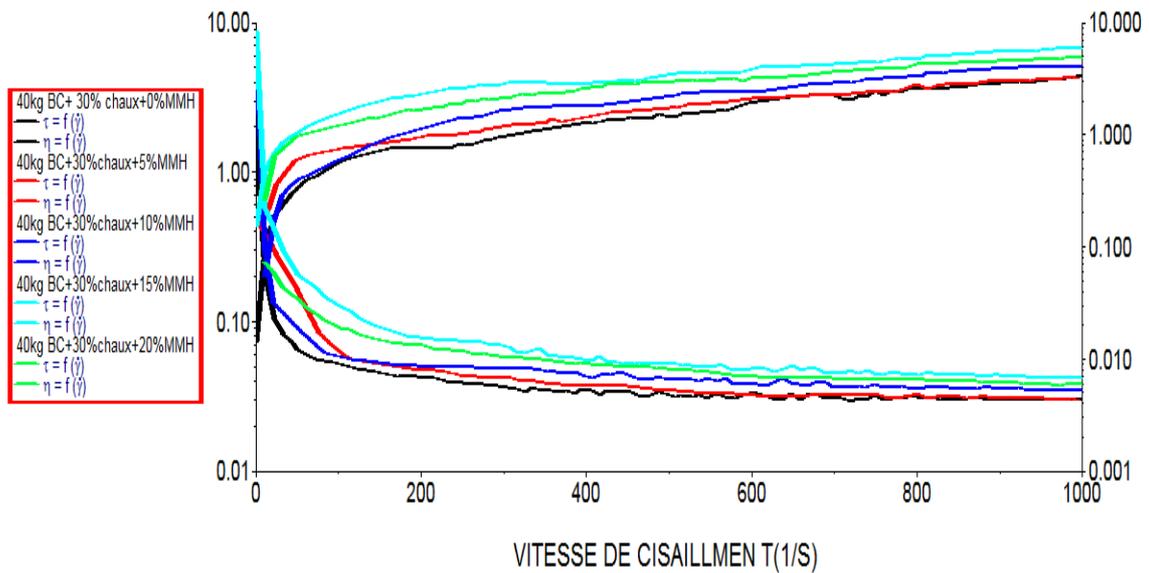


Figure IV.28: Rhéogrammes de suspension  $40 \text{ Kg/m}^3 \text{BC} + 30\% \text{Chaux} + (\text{MMH})$ .

• Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta:

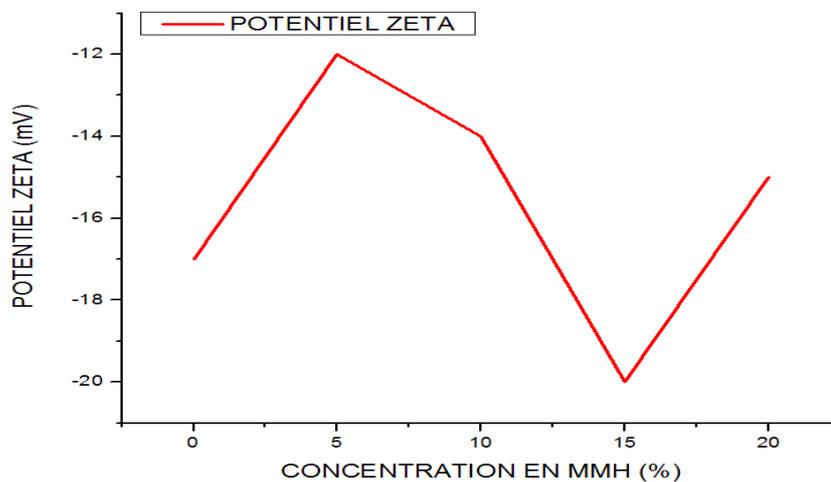


Figure IV.29 : Potentiel Zêta de suspension  $40 \text{ Kg/m}^3 \text{BC} + 30\% \text{Chaux} + (\text{MMH})$

Commentaire :

Nous avons représenté sur la figure IV.28 les courbes d'écoulement de la suspension  $40 \text{ kg/m}^3 \text{BC}$  bentonites calciques + 30%Chaux de référence et la solution de le MMH à différentes concentrations (entre 05%, et 20% de MMH). On remarque une augmentation de

la viscosité en fonction de la concentration de MMH. Le comportement rhéologique de la solution peut être décrit d'une manière satisfaisante par le modèle de Herschel-Bulkley.

L'effet de l'ajout de MMH sur les propriétés rhéologiques de la suspension de  $40 \text{ kg/m}^3$  BC bentonite calciques + 30% Chaux est montré dans la figure IV.28, on observe une augmentation de la viscosité apparente en fonction de la concentration de MMH. À cisaillement égal, et pour la même concentration de polymère, la viscosité apparente du mélange bentonite-chaux-MMH reste toujours supérieure à la viscosité de la solution de la référence. Une répulsion mutuelle entre les charges fait que les chaînes enroulées aléatoirement s'allonge linéairement, et de ce fait la viscosité augmente. Et ceci explique l'augmentation du potentiel zêta avec l'augmentation de la concentration en MMH, mais il diminue légèrement pour une concentration de 20% lié certainement à la saturation en charge du milieu comme montre la figure IV.29.



Figure IV.30 :  $40 \text{ Kg/m}^3$  BC + 30% Chaux + 15% MMH

### Conclusion :

L'additif utilisé est un Composé contenant des anions hydroxyde en combinaison avec deux ou plusieurs Cations métalliques. Les particules de MMH sont extrêmement petites et portent de nombreuses charges positives. Ils peuvent s'associer à la bentonite pour former un complexe fort avec des propriétés de cisaillement très élevées

Les courbes d'écoulement des solutions de la bentonite calcique gypse MMH qui montrent un caractère pseudo plastique (rhéofluidifiant) obéissant au modèle rhéologique de loi de puissance, où la viscosité augmente avec l'augmentation de la concentration de MMH et tous les *Rhéogrammes* montre l'augmentation de la viscosité avec l'augmentation de la concentration de la MMH est diminué avec l'augmentation du taux de cisaillement. Ce comportement en milieu calcique pourrait s'expliquer que de petites cristallites de MMH sont fixées sur les surfaces basales de plaquettes de bentonite volumineuses. De plus, les particules de bentonite réticulée résultantes sont visibles sous le TEM. Par conséquent, l'étude TEM suggère que MMH peut être considéré comme un agent de pontage pour les particules de bentonite. Puisque ce pontage de particules est basé sur une force électrostatique faible, la viscosité se décompose lors du pompage du fluide. Le liquide retournera instantanément à une condition gélifiée une fois que la contrainte de cisaillement est éliminée.

Selon toutes les figures l'augmentation du potentiel Zêta en fonction de la concentration ceci peut être expliqué par l'apport des charges. La densité des chaînes de polymères chargés en signe négatif augmente dans le milieu d'où l'explication de cette augmentation dans le potentiel Zêta, puis il diminue légèrement pour une concentration de 20% de MMH certainement à la saturation en charge du milieu.

### 5) Suspension bentonite calcique + gypse: étude de l'effet de mixte métal hydroxydes (MMH) sur les propriétés rhéologiques et physico-chimiques :

Pour étudier l'effet de le MMH sur le comportement rhéologique des suspensions Bentonite calcique-gypse, nous avons choisi de fixer la concentration de gypse à 40%. Cette concentration moyenne elle a donnée des bonnes résultats rhéologique, permet de mettre en évidence l'effet de mixte métal hydroxydes (MMH) sur la suspension de bentonite.

#### ➤ Suspension 20 Kg/m<sup>3</sup>BC + 40% Gypse + MMH:

- Etude Rhéologique :

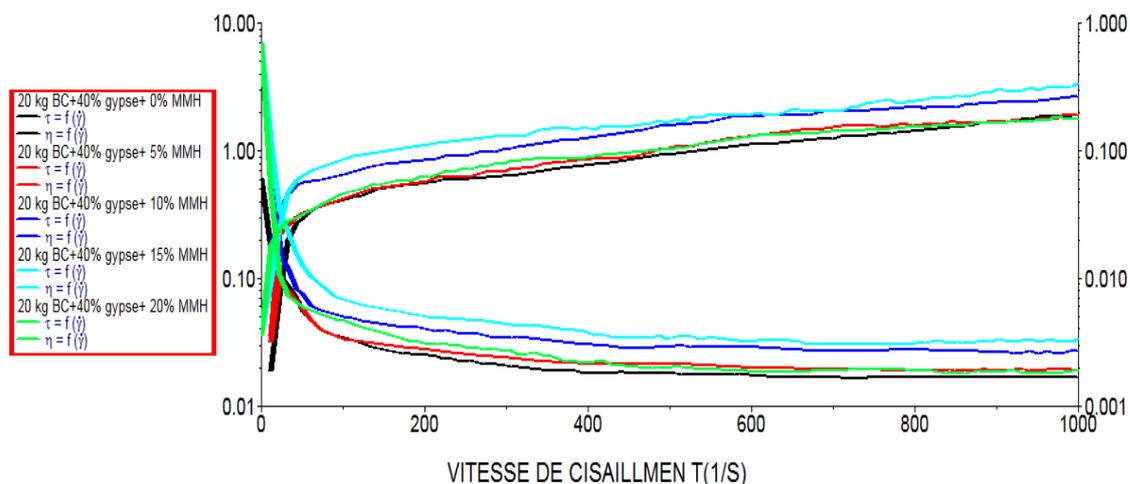
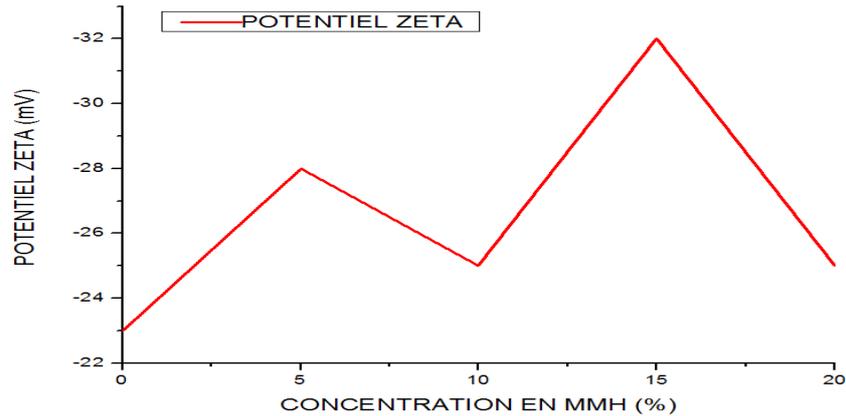


Figure IV.31: Rhéogrammes de suspension 20 Kg/m<sup>3</sup>BC + 40% GYPSE + MMH.

- Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta:



**Figure IV.32 : Potentiel Zêta de suspension 20 Kg/m<sup>3</sup>BC + 40% gypse +MMH**

**Commentaire:**

La **Figure IV.31** montre une augmentation de la contrainte de cisaillement que dépasse **30,00Pa** pour **20 %** de MMH et une diminution de la viscosité qui ne dépasse pas **0,01pas**, avec l'augmentation du pourcentage de traitement en MMH, mais en remarque une forte augmentation de potentiel zêta qui a été observée à une concentration de **15%** de MMH jusqu'à y arrivée à une valeur de **-32 mV**.- **Figure IV.32**

Et d'après **Figure IV.33** en remarque une bonne stabilité de la suspension après **24** heures de repos



**Figure IV. 33 : 20 Kg/m<sup>3</sup>BC + 40%gypse+ 15%MMH.**

➤ **Suspension 30 Kg/m<sup>3</sup>BC + 40% Gypse + MMH:**

• Etude Rhéologique :

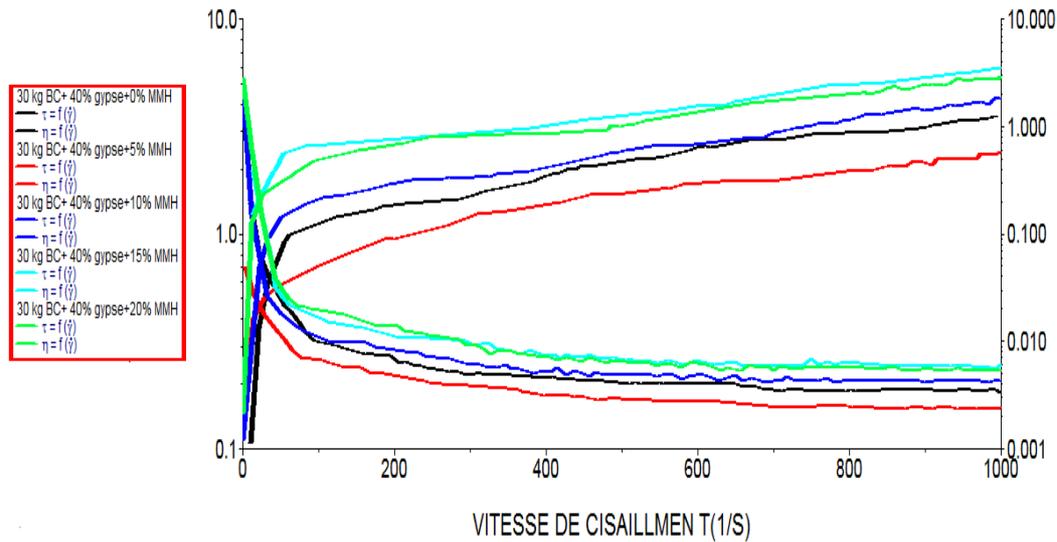


Figure IV.34: Rhéogrammes de suspension 30 Kg/m<sup>3</sup>BC + 40% GYPSE + (MMH).

• Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta:

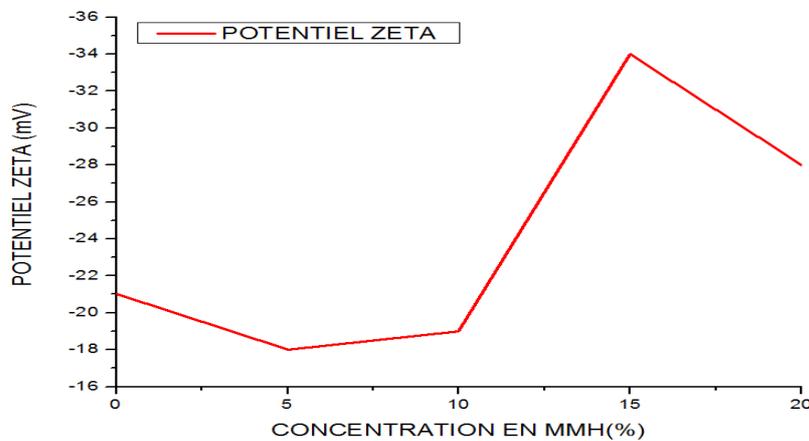


Figure IV.35 : Potentiel Zêta de suspension 30 Kg/m<sup>3</sup>BC + 40% gypse + MMH

Commentaire:

La figure (IV.34) illustre le comportement rhéologique des solutions de 30 Kg/m<sup>3</sup>BC bentonite Calcique + 40%gypse + (MMH)a plusieurs concentration, la même remarque que pour les solutions de 30 Kg/m<sup>3</sup>BC bentonite Calcique ,une augmentation de la viscosité est observé avec l'augmentation de la concentration, le caractère rhéofluidifiant des systèmes est donné bien claire sur la figure (II. 34) où la viscosité diminue avec le taux de cisaillement.

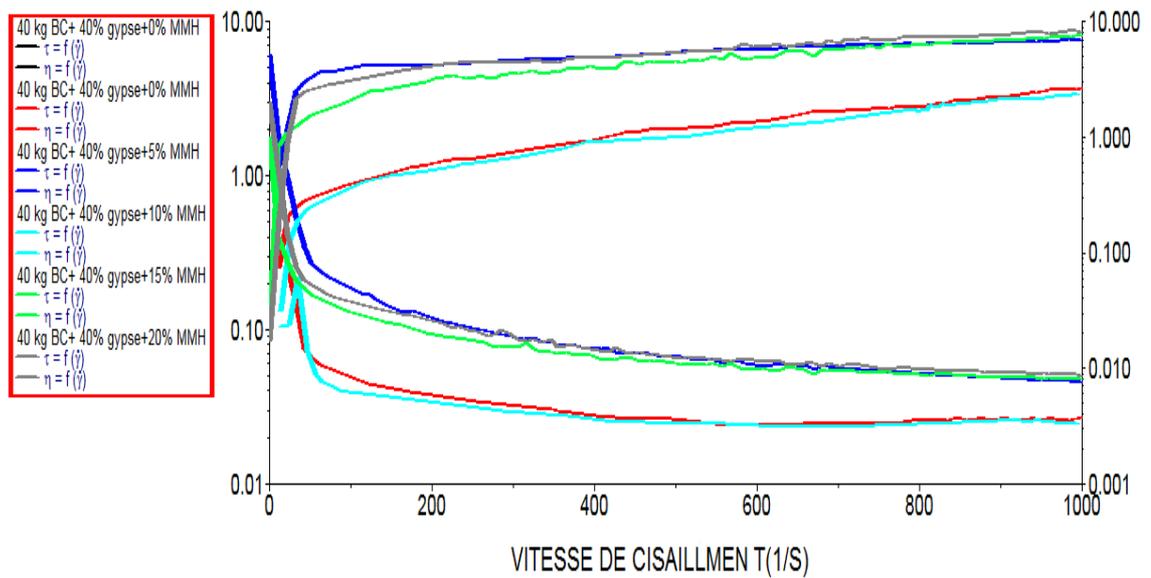
La charge du potentiel Zêta des solutions de  $30 \text{ Kg/m}^3 \text{ BC}$  bentonite Calcique + 40% gypse + (MMH) augmente pour se stabiliser au voisinage de -36,2 Mv pour 15% de MMH.- **figure (II. 35).**



**Figure IV. 36 :  $30 \text{ Kg/m}^3 \text{ BC}$  + 40%gypse+ 15%MMH**

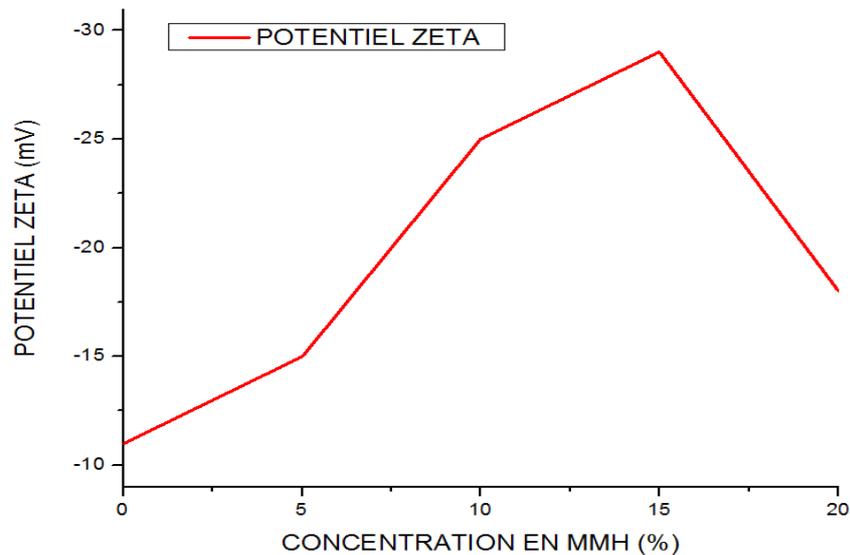
➤ **Suspension  $40 \text{ Kg/m}^3 \text{ BC}$  + 40% Gypse + MMH:**

- **Etude Rhéologique :**



**Figure IV.37: Rhéogrammes de suspension  $40 \text{ Kg/m}^3 \text{ BC}$  + 40% GYPSE + MMH.**

- *Etude Electrocinétique : Potentiel Zêta:*



**Figure IV.38 : Potentiel Zêta de suspension 40K g/m<sup>3</sup>BC + 40%gypse + MMH.**

**Commentaire :**

Nous avons représenté sur **la figure IV.37** les courbes d'écoulement de la suspension 40 kg/m<sup>3</sup>bentonite calcique + 40%de gypse de référence et la solution de MMH à différentes concentrations (entre 05% et 20%). On remarque une augmentation de la viscosité en fonction de la concentration de polymère. Le comportement rhéologique de la solution peut être décrit d'une manière satisfaisante par le modèle de Herschel-Bulkley.

L'effet de l'ajout de MMH sur les propriétés rhéologiques de la suspension de 40 kg/m<sup>3</sup>BC + 40%gypse est montré dans **la figure IV.37**, on observe une augmentation de la viscosité apparente en fonction de la concentration de MMH. À cisaillement égal, et pour la même concentration de polymère, la viscosité apparente du mélange bentonite-chaux-MMH reste toujours supérieure à la viscosité de la solution de la référence. La dissociation de l'ion Ca<sup>2+</sup> du MMH crée des sites négatifs le long de la chaîne du polymère. Une répulsion mutuelle entre les charges fait que les chaînes enroulées aléatoirement s'allonge linéairement, et de ce fait la viscosité augmente. Et ceci explique l'augmentation du potentiel zêta avec l'augmentation de la concentration en MMH, mais il diminue légèrement pour une concentration de 20% lié certainement à la saturation en charge du milieu comme montre **la figure IV.38**.



Figure IV. 39 :  $40\text{kg/m}^3\text{BC} + 40\%\text{gypse} + 15\%\text{MMH}$

#### Conclusion :

L'additif utilisé est un Composé contenant des anions hydroxyde en combinaison avec deux ou plusieurs Cations métalliques. Les particules de MMH sont extrêmement petites et portent de nombreuses charges positives. Ils peuvent s'associer à la bentonite pour former un complexe fort avec des propriétés de cisaillement très élevées

Les courbes d'écoulement des solutions de la bentonite calcique gypse MMH qui montrent un caractère pseudo plastique (rhéofluidifiant) obéissant au modèle rhéologique de loi de puissance, où la viscosité augmente avec l'augmentation de la concentration de MMH et tous les *Rhéogrammes* montre l'augmentation de la viscosité avec l'augmentation de la concentration de la MMH est diminué avec l'augmentation du taux de cisaillement. Ce comportement en milieu calcique pourrait s'expliquer que de petites cristallites de MMH sont fixées sur les surfaces basales de plaquettes de bentonite volumineuses. De plus, les particules de bentonite réticulée résultantes sont visibles sous le TEM. Par conséquent, l'étude TEM suggère que MMH peut être considéré comme un agent de pontage pour les particules de bentonite. Puisque ce pontage de particules est basé sur une force électrostatique faible, la viscosité se décompose lors du pompage du fluide. Le liquide retournera instantanément à une condition gélifiée une fois que la contrainte de cisaillement est éliminée.

Selon toutes les figures l'augmentation du potentiel Zêta en fonction de la concentration ceci peut être expliqué par l'apport des charges. La densité des chaînes de polymères chargés en signe négatif augmente dans le milieu d'où l'explication de cette augmentation dans le potentiel Zêta, puis il diminue légèrement pour une concentration de 20% de MMH liée certainement à la saturation en charge du milieu.

## **II) Effet de réducteur de filtrat API/HPHT sur les propriétés rhéologiques de la suspension bentonite calcique/MMH :**

### **1\* Filtre presse API :**

Le filtre-presse API se compose essentiellement d'un étrier muni d'une vis de serrage permettant le blocage des trois parties du corps du filtre.

Le filtre presse API est composé de:

- D'une embase percée d'un trou et dotée d'un ajutage par lequel s'écoule le filtrat. Cette embase supporte un tamis métallique sur lequel est placé le papier filtre de 90 mm de diamètre (surface de filtration 7 pouces carrés). L'ensemble papier et tamis est placé entre deux joints plats qui assurent l'étanchéité entre l'embase et le cylindre ;
- D'un cylindre de diamètre intérieur égal à 3 pouces (76,2 mm) et de hauteur 5 pouces (128 mm). L'API recommande au moins 1/2 de hauteur (2,5 pouces, 64 mm) ;
- D'un couvercle muni d'une arrivée de gaz comprimé dont l'étanchéité avec le cylindre est assurée à l'aide d'un joint plat du même type que ceux placés sur l'embase.

### **Principe :**

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

Les solides déposés pendant la filtration constituent ce que l'on appelle le Cake. L'épaisseur du cake est notée. La filtration s'effectue donc en statique, à température ambiante ce qui ne reflète qu'imparfaitement les conditions de filtration dans le sondage.

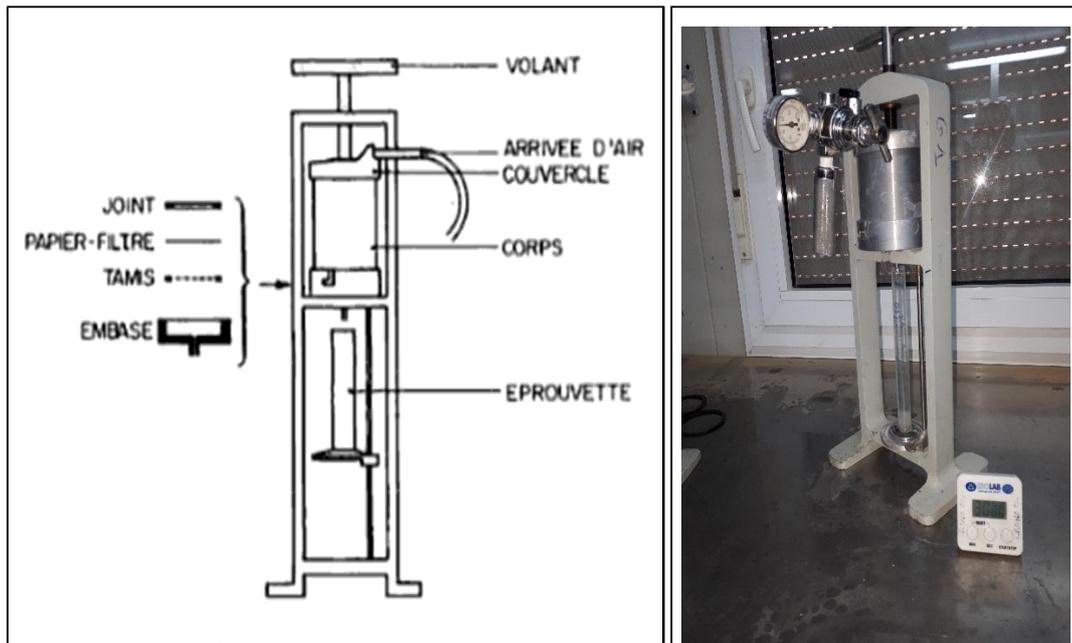


Figure IV. 40 : Schéma de filtre-pressé API.

#### Mode d'emploi :

Pour utiliser le filtre presse API :

- Poser le joint sur l'embase.
- Poser le tamis sur le joint.
- Poser le papier filtre sur le tamis.
- Poser le second joint sur le papier filtre.
- Emboîter le cylindre sur l'embase et verrouiller le système à baïonnette.
- Remplir le fluide jusqu'à environ de 1 cm de la hauteur du cylindre.
- Poser le couvercle sur le cylindre en intercalant un joint.
- Placer l'ensemble dans l'étrier et bloquer à l'aide de la vis de serrage.
- Disposer une éprouvette graduée sous l'ajutage.
- Appliquer une pression de 100 psi (7 bar) et simultanément déclencher le chronomètre.
- Après 30 minutes lire le volume de fluide recueilli dans l'éprouvette, exprimé en  $\text{cm}^3$  (cc), c'est la valeur de filtrat API.
- Purger le circuit de gaz comprimé, démonter l'appareil et recueillir le papier filtre qui est recouvert d'une couche de solides, c'est le cake. Après un lavage superficiel, mesurer l'épaisseur de cake, exprimer la valeur en millimètre.

**2\* Filtre presse HPHT**

- Rôle de la filtration

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

- La vitesse d'avancement du forage.
- La tenue des terrains forée.
- L'envahissement des couches perméables.

Le filtre presse à haute pression haute température se compose essentiellement d'une enceinte chauffante thermo statée, d'une cellule de filtration, d'une unité de pression, d'une unité de contre-pression collectant le filtrat dont l'utilisation est indispensable au-delà de 200°F, d'un thermomètre et de joints résistant à l'huile.

**Principe :**

Le principe est le même que pour la filtration API, seules les conditions de pression et température diffèrent. On applique les pressions pouvant aller jusqu'à 1500 psi (105 bars) et des températures atteignant 450 °F (232°C). Pour les températures supérieures à 200°F (93°C), une unité de contre-pression est utilisée pour recevoir le filtrat. Aux températures supérieures à 200°F, des précautions particulières sont à prendre, tenant compte des constantes physiques de l'eau et vapeur d'eau.

Pour les températures jusqu'à 400°F (204°C) on utilise un papier filtre. Au-delà de 400°F (204°C) on remplace le papier filtre par un disque métallique poreux.

**Mode d'emploi :**

Température entre 300 et 450 °F (149 et 232°C) :

- Opérer comme précédemment pour le chauffage de l'enceinte chauffante, la préparation de la cellule, sa mise en place ainsi que celle des unités de pression et contre pression, mais ne remplir la cellule de boue que jusqu'à environ 1,5 pouce (37 mm) du bord (volume d'expansion de sécurité) et au-delà de 400°F (204°C) utiliser un disque métallique poreux au lieu de papier filtre.
- La cellule étant en place dans l'enceinte chauffante, les unités de pression et contre pression engagées sur les ajustages supérieur et inférieur fermés, régler la pression à 450 psi (31.5 bar) sur l'unité de pression ainsi que sur l'unité de contre pression.
- Ouvrir l'ajutage supérieur de 1/4 de tour maintenir la pression de 450 psi (31,5 bar) pendant toute la durée de montée à la température désirée.
- Lorsque cette température est atteinte, augmenter la pression jusqu'à 950 psi (66,5 bar) et ouvrir l'ajutage inférieur de 1/4 de tour. Simultanément déclencher

- le chronomètre.
- Recueillir le filtrat pendant 30 minutes en maintenant la température à plus ou moins 5°F (3°C) et la pression supérieure et inférieure.



*Figure IV. 41: photo de filtre-presse HPHT.*

### **3\* Résultats et Interprétations :**

L'objectif de cette partie est de déterminer la concentration exacte qui doit être utilisée dans la formulation finale des fluides de forage à base d'eau (bentonite calcique/MMH). Pour ce but une variation de la concentration est mise en évidence et des tests ont été faits soit API ou HPHT, les résultats obtenus dans les tableaux sont après le hotrooling procès à 250 F pendant 16 heures.

- Suspension Bentonite sodique + chaux + MMH :
- Suspension 20 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH + Starch Modifier :

Tableau IV. 3 : Filtration API et HPHT pour 20 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH

20 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH			
starch modifié	API (100psi)	filtre cake	HPHT (250°F+ΔP=950psi)
00 kg/m <sup>3</sup>	N.C	/	N.C
09 kg/m <sup>3</sup>	Relâche >10	/	Relâche >10
15 kg kg/m <sup>3</sup>	>10	/	>10
18 kg kg/m <sup>3</sup>	10	/	>10
22 kg/m <sup>3</sup>	 08	01	 09

**Commentaires :**

La variation de la concentration de starch modifier dans la suspension est base sur la concentration recommandé (09 kg/m<sup>3</sup> à 26 kg/m<sup>3</sup>).

On remarque qu’avec l’augmentation de la concentration de filtrat diminue jusqu’à 08 cc/30 min (Test API) et 09 cc/30 min (Test HPHT), résultats satisfaisante avec une concentration de 22 kg/m<sup>3</sup>.

- Suspension 30 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH + Starch Modifier :

Tableau IV. 4 : Filtration API et HPHT pour 30 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH

30 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH			
starch modifié	API (100psi)	filtre cake	HPHT (250°F+ΔP=950psi)
00 kg/m <sup>3</sup>	N.C	/	N.C
09 kg/m <sup>3</sup>	>10	/	>10
15 kg/m <sup>3</sup>	09	/	>10
18 kg/m <sup>3</sup>	08	01	09
22 kg/m <sup>3</sup>		01	

Commentaires :

On observe dans le *Tableau IV. 4* que plus on augmente la concentration de starch modifier le filtrat diminue jusqu'à 07cc /30min (test API) et 08cc/30min (test HPHT), résultat satisfaisante avec une concentration de 18 kg/m<sup>3</sup> et 22 kg/m<sup>3</sup>, a cette concentration de starch modifié on peut l'utiliser dans la formulation des boues de forage à base d'eau.

➤ Suspension 40 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH + Starch Modifier :

Tableau IV. 5 : de filtration API et HPHT pour 40 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH

40 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH			
starch modifié	API (100psi)	filtre cake	HPHT (250°F+ΔP=950psi)
00 kg/m <sup>3</sup>	N.C	/	N.C
09 kg/m <sup>3</sup>	09	02	>10
15 kg/m <sup>3</sup>	08	01	09
18 kg/m <sup>3</sup>	07	01	08
22 kg/m <sup>3</sup>	<b>05</b>	01	<b>06</b>

**Commentaires :**

Quand on a une augmentation de la concentration de starch modifier, le filtrat diminue jusqu'à 05cc/30min (test API) et 06cc/30min (test HPHT) pour 22 kg/m<sup>3</sup>, et a des faibles concentrations de starch modifier, on a des bons résultats 15 kg/m<sup>3</sup> nous a donnée 08 cc /30min, après un lavage superficiel du papier filtre on a mesurée la longueur du cake et on a trouvée 1 cm et c'est les résultats voulus.



Figure IV. 42 : photo de la mesure du cake 40 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH + 15 kg/m<sup>3</sup> de starch modifier

➤ Suspension 50 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH + Starch Modifier

Tableau IV. 6: filtration API et HPHT pour 50 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH

50 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH			
starch modifié	API (100psi)	filtre cake	HPHT (250°F+ΔP=950psi)
00 kg/m <sup>3</sup>	N.C	/	N.C
09 kg/m <sup>3</sup>	08	01	09
15 kg/m <sup>3</sup>	07	01	08
18 kg/m <sup>3</sup>	05	01	07
22 kg/m <sup>3</sup>	<b>04</b>	01	<b>05</b>

Commentaires :

A cette suspension de 50 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH, des petites concentrations de starch modifier nous donne des bons résultats, 09 kg/m<sup>3</sup> nous a donnée 08cc/30 min (test API) et 09cc/30min (test HPHT), dans le cas des grandes concentrations de starch modifier 22 kg/m<sup>3</sup> on a eu 04cc/30min (test API) et 05cc/30min (test HPHT).

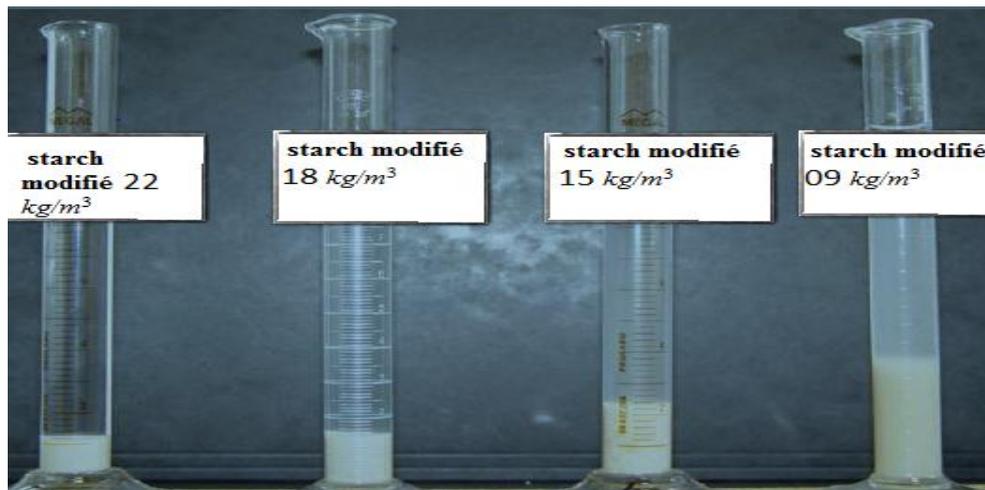


Figure IV. 43 : filtration API pour 50 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH

## II.2.2. Suspension Bentonite sodique + GYPSE + MMH :

- Suspension 20 kg BC + 30 %GYPSE +15% MMH + Starch Modifier :

Tableau IV. 7 : de filtration API et HPHT pour 20 kg BC + 40 %GYPSE +15% MMH

20 kg BC + 40 %gypse +15% MMH			
starch modifié	API (100psi)	filtre cake	HPHT (250°F+ΔP=950psi)
00 kg/m <sup>3</sup>	N.C	/	N.C
09 kg/m <sup>3</sup>	>10	/	>10
15 kg kg/m <sup>3</sup>	>10	/	>10
18 kg kg/m <sup>3</sup>	10	/	>10
22 kg/m <sup>3</sup>	<b>07</b>	01	<b>09</b>

**Commentaires :**

La variation de la concentration de starch modifier dans la suspension est base sur la concentration recommandé (09 kg/m<sup>3</sup> à 26 kg/m<sup>3</sup>).

On remarque qu'avec l'augmentation de la concentration de filtrat diminue jusqu'à 07 cc/30 min (Test API) et 09 cc/30 min (Test HPHT), résultats satisfaisante avec une concentration de 22 kg/m<sup>3</sup>.

➤ Suspension 30 kg BC + 40 %GYPSE +15% MMH + Starch Modifier :

Tableau IV. 8 : de filtration API et HPHT pour 30 kg BC + 40 % GYPSE +15% MMH

30 kg BC + 40 %GYPSE+15% MMH			
starch modifié	API (100psi)	filtre cake	HPHT (250°F+ΔP=950psi)
00 kg/m <sup>3</sup>	N.C	/	N.C
09 kg/m <sup>3</sup>	>10	/	>10
15 kg/m <sup>3</sup>	>10	/	>10
18 kg/m <sup>3</sup>	09	01	10
22 kg/m <sup>3</sup>		01	

#### Commentaires :

La variation de la concentration de starch modifier dans la suspension est base sur la concentration recommandé (09 kg/m<sup>3</sup> à 26 kg/m<sup>3</sup>).

On observe dans le **Tableau IV. 8** que plus on augmente la concentration de starch modifier le filtrat diminue jusqu'à 07cc /30min (test API) et 08cc/30min (test HPHT), résultat satisfaisante avec une concentration de 18 kg/m<sup>3</sup> et 22 kg/m<sup>3</sup>, a cette concentration de starch modifié on peut l'utiliser dans la formulation des boues de forage à base d'eau

➤ Suspension 40 kg BC + 40 %GYPSE +15% MMH + Starch Modifier :

Tableau IV. 9 : de filtration API et HPHT pour 40 kg BC + 40 %GYPSE+15% MMH

40 kg BC + 40 %CHAUX +15% MMH			
starch modifié	API (100psi)	filtre cake	HPHT (250°F+ΔP=950psi)
00 kg/m <sup>3</sup>	N.C	/	N.C
09 kg/m <sup>3</sup>	>10	02	>10
15 kg/m <sup>3</sup>	08	01	09
18 kg/m <sup>3</sup>	07	01	08
22 kg/m <sup>3</sup>	<b>06</b>	01	<b>07</b>

**Commentaires :**

Quand on a une augmentation de la concentration de starch modifier, le filtrat diminue jusqu'à 06cc/30min (test API) et 07cc/30min (test HPHT) pour 22 kg/m<sup>3</sup>, et à des faibles concentrations de starch modifier, après un lavage superficiel du papier filtre on a mesuré la longueur du cake et on a trouvée 1 cm et c'est les résultats voulus.

➤ Suspension 50 kg BC + 40 %GYPSE +15% MMH + Starch Modifier

Tableau IV. 6: filtration API et HPHT pour 50 kg BC + 40 %GYPSE+15% MMH

50 kg BC + 40 %GYPSE +15% MMH			
starch modifié	API (100psi)	filtre cake	HPHT (250°F+ΔP=950psi)
00 kg/m <sup>3</sup>	09	/	>10
09 kg/m <sup>3</sup>	09	01	10
15 kg/m <sup>3</sup>	07	01	08
18 kg/m <sup>3</sup>	05	01	07
22 kg/m <sup>3</sup>	<b>05</b>	01	<b>06</b>

**Commentaires :**

A cette suspension de 50 kg BC + 30 %CHAUX +15% MMH, des petites concentrations de starch modifier nous donne des bons résultats, 09 kg/m<sup>3</sup> nous a donnée 09cc/30 min (test API) et 10cc/30min (test HPHT), dans le cas des grandes concentrations de starch modifier 22 kg/m<sup>3</sup> on a eu 05cc/30min (test API) et 06cc/30min (test HPHT).



Figure IV. 44: Photo de la mesure du cake 40 kg BC + 40 %GYPSE +15% MMH + 22 kg/m<sup>3</sup> de starch modifier.

**Conclusion :**

L'addition de réducteur de filtrat aux suspensions de bentonite calcique selon des concentrations recommander (entre 09 kg/m<sup>3</sup> au 26 kg/m<sup>3</sup>) faits objectifs de :

- Etude de compatibilité de réducteur de filtrat avec le composé MMH.
- Réduire l'infiltration de la phase aqueuse dans les formations poreuses.
- Minimiser la phase aqueuses dans la formation surtout dans les formations argileuses qui peu causé de gonflement de celle-ci et qui conduit au coincement de la garniture.
- Le Hootrooling a confirmé la stabilité des suspensions élaboré dans des températures 200 °F et une circulation de 16 heures.
- Les concentrations obtenues pour un filtrat adéquat est toujours dans la marge de fournisseur.

*Conclusion générale et recommandations.*

## **Conclusion générale :**

Ce mémoire porte sur l'objectif de formuler une boue de forage à base d'eau (WBM) à l'aide d'une bentonite calcique Algérienne -région de Mostaganem.

La présente étude vise à expliquer l'importance de la rhéologie des composés d'une part par l'analyse systématique des constituants du fluide de forage indépendamment du système complet, et d'autre part par l'étude de la contribution de l'ensemble des additifs sur les propriétés rhéologiques.

Un intérêt particulier a été donné à la caractérisation des produits utilisés dans ce travail afin de présenter la matière avec laquelle nos systèmes dispersés ont été préparés.

Sans oublier la particularité dans ce travail est l'utilisation la bentonite algérienne à son état brut –calcique, sans avoir un préalable traitement avec soda ash provient de gisement de Mostaganem.

Pour atteindre ce but nous avons commencé par faire l'état des connaissances d'un point d'une théorie sur les boues de forage, leur cycle, leurs principales fonctions ainsi que les types de ces boues. Nous avons exposé aussi la rhéologie, une discipline qui traite l'écoulement des fluides dans le puits de forage.

Nous avons décrit aussi les différents additifs rencontrés au cours du forage. Pour chaque additif nous avons exposé ses indices et son traitement.

Pour la 1ere partie expérimentale réalisée au laboratoire de l'université, nous avons démarré notre étude par l'effet de l'ajout de deux aditifs cationiques, la chaux et le gypse, sur les caractéristiques rhéologiques et physico-chimiques d'une suspension aqueuse de bentonite-calcique algérienne de forage au on a montré que a 30% de la chaux et 40% de gypse a donnée des bonnes resulta rhéologique, permet de mettre en évidence l'effet de mixte métal hydroxydes (MMH) sur la suspension de bentonite..

Ainsi, les résultats obtenus sur les solutions de mmh ont montré que ce polymère provoque des changements remarquables, si on augmente sa concentration dans le système "bentonite-chaux-mmh" et "bentonite-gypse-mmh". Nous aura une augmentation de la consistance et de la viscosité apparente et on aura une bonne stabilité de la suspension.

Pour la 2eme partie expérimentale réalisée au laboratoire du besb nous avons étudié l'effet de réducteur de filtrat API/HBHT sur les propriétés rhéologiques des formulations réalisiez donne la 1ere partie et on a motionniez les concentration exactes qui doit etre

utiliser dans la formulation finale de fluides de forage à base d'eau a base bentonite  
calcique/mmh.

*Références Bibliographiques.*

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE**

- [1] R. BENSEGHIER, « Traitement des Cuttings de Forage de Hassi Messaoud avec des Solutions Tensioactives », Projet de fin d'Etudes pour l'Obtention du titre d'Ingénieur d'Etat en Génie de l'Environnement, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique 'ENSP' Hacem Badi, El-Harrach, Alger, (2009).
- [2] C. GARCIA et P. PARIGOT, « Boues de Forage » (Historique, pages 11,63) (1974).
- [3] J.P. Wauquier, « Pétrole brut; Produits Pétroliers », (1994)
- [4] Forage Rotary, la Boue de Forage, « Groupe II Leçon 2 Edition Technip », (1982).
- [5] A. Aarroussi, « Manuel de Stage, Département Analyse Sonatrach », (2009).
- [6] CHKIRED, « Cours de la Technologie de Forage Pétrolier 1<sup>er</sup> année Magister Génie Pétrolier », (2010).
- [7] M. KHODJA et S. KHODJA, « Etude Comparative de Pouvoir Inhibiteur des Fluides de Forage à Base d'Eau sur le Champ de Hassi Messaoud », (1999).
- [8] P. Parigot, « Mesure des Caractéristiques Enormes, les Fluides de Forages, Edition Technip France », (1968).
- [9] Forage Rotary, « la boue de forage, Groupe II leçon 2 édition technip », (1984).
- [10] Baroid Halliberton Handboug
- [11] Abdelouahab. Belhabib, « les Fluides de Forages à Base d'huile : Impact sur L'environnement et Technique de Traitement, Mémoire Master Professionnelle, Université Kasdi merbah ouaregla », (2012-2013).
- [12] D. Abid, « Etude de Synthèse sur les Fluides de Forage, 1<sup>er</sup> Partie du Rapport CRD Boumerdes », (1994).
- [13] Document Technique et Réglementaire Traitement et Recyclage de boue, « Direction de Recherche et des Affaires Scientifique et Techniques ».
- [14] C.M. Himel et E.G. Lee, «Drilling Fluids and Méthods of Using Same», (1951).
- [15] K. Fourar, « Etude du comportement rhéologique et de filtration des fluides de forages, Thèse de Magister université M'hamed Bougara

- Boumerdas », (2006).
- [16] J.P .Rushton «Ethnic Nationalis, Evolution ».
- [17] Journal of Non Newton Fluids Mechanics.
- [18] A. AHMED, et H.S RAMASWAMY, « Effet of high-hydrostatic Pressure and Concentration On Rheological Characteristics Of Xanthan Gum», *Food Hydrocolloids* 18,367–373, (2004).
- [19] MICHEL FONTANILLE, YVES GNANOU « chimie et physico-chimie des polymères » Dudon, Paris, 2002.
- [20] STEVE YOUNG, and al., “Novel polymer chemistry increases shale stability”, AADE 01-NC-HO-41, National Drilling Conference, March 27 - 29, 2001.
- [21] A SENTHIL KUMAR, VIKAS MAHTO & V P SHARMA “Behaviour of organic polymers on the rheological propeties of Indian bentonite-water based drilling fluid system and its effect on formation damage”, *Indian Journal of Chemical technology*, Vol. 10, September 2003, pp. 525-530.
- [22] M.A BOUAZIZ, « introduction aux polymères hydrosolubles » IAP, Mai.2001.
- [23] CLARK RK, & al.: "Polyacrylamide-Potassium Chloride Mud for Drilling Water Sensitive Shales," *Journal of Petroleum Technology* 28, no. 6 (June 1976): 719-726
- [24] FRASER LJ: "New Method Accurately Analyzes PHPA's in Muds," *Oil & Gas Journal* 85, no. 27, 39-42 (July 6, 1987).
- [25] Silicate drilling fluids technology, PQ Corporation, 2001
- [26] ILER, R.K. “The Chemistry of Silica”. New York. John Wiley and Sons. 1979.
- [27] CAILLERE S., HENIN S., RAUTUREAU M. « Minéralogie des argiles » *Tomes 1 et 2. Paris : Masson. 184-189, 1982*
- [28] PEDRO G. « Les minéraux argileux, 47-64, dans pédologie. 2-Constituants et propriétés du sol. *Eds. Duchaufour Ph. et Southier B. Masson, Paris 665p 1994*
- [29] TOURET O., PONS C. H., TESSIER D., TARDY Y. « Etude de la répartition de l’eau dans les argiles saturées Mg 2+ aux fortes teneurs en eau ». *Clay Minerals*, 25, 217-233, 1990.
- [30] VAN OLPHEN H. “An introduction to clay colloid chemistry”. Ed. *Inter science New York, 1963.*
- [31] EGLOFFSTEIN T. A. “Ion exchange in geosynthetic clay liners”. *Geotechnical fabrics report. 15 (5), St. Paul,USA 1997.*

- [32] PAUL F. LUCKHAM U, SYLVIA ROSSI « The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions », *Advances in Colloid and Interface Science*, 82, 1999.43-92
- [33] R. DUPONT, « Influence de la boue dans le forage des formations argileuses bouillantes », *Collection colloques et Séminaires, VOL. 9*, pp 87, I.F.P, Editions Technip, Paris, 1968.
- [34] AHMED KAYACIER, MAHMUT DOGAN “Rheological properties of some gums- salep mixed solutions”, *Journal of Food Engineering* 72, 261–265, 2006.
- [35] O. M’BODJ et al. “Plastic and elastic properties of the systems interstratified clay–water– electrolyte–xanthan”, *Journal of Colloid and Interface Science* 273, 675–684, 2004.
- [36] JASIM AHMED, H.S. RAMASWAMY “Effect of high-hydrostatic pressure and concentration on rheological characteristics of xanthan gum”, *Food Hydrocolloids* 18, 367– 373, 2004
- [37] LOEBER, L., DURND, C., LECOURTIER J. et ROSENBERG, G.E. (1996) "Relationship between composition, structure and permeability of drilling filter cakes. *Rev.I.F.P* vol 51. N°6.P.777-788. Nov-Dec
- [38] JADA, A. ; H. DEBIH, et M. KHODJA (2006) « Montmorillonite surface properties modifications by asphaltene adsorption” *Journal of Petroleum Science and Engineering* Article in press (accepted 7 March 2006)
- [39] XIE, W. et LECOURTIER, J., 1989, *polym. Degradation stability* 38, 155-164
- [40] BRUTON, J., MERCER, R., PAUL, D., (2000) « The application of new generation CaCl<sub>2</sub> mud systems in the Deepwater Gulf of Mexico”. *IADC/SPE Drilling Conf.*, New Orleans, February, SPE 59051.
- [41] MASASHI, K., RONAO, O., et YASUFUMI, O., « Viscosity behavior of silica suspensions flocculated by associating polymers », *Journal of colloid and interface science* 290 (2005) 592-597.
- [42] BAILEY L., REID P.I., SHERWOOD J.D. “Mechanisms and solutions for mechanical inhibition of shale swelling and failure”, Paper presented at the Royal Society of Chemistry Meeting : Chemistry in the oil industry, Ambleside, April 1994.
- [43] LIAO X.A et D.R. SEIMS. (1990) « Adsorption characteristic of PHPA on formations solids ». *IADC/SPE*. 1990.
- [44] M.KHODJA, J.P.Canselier, F.Bergaya, K. Fourar, M.Khodja-Saber and A. Benmounah “Effect of water/polymer/electrolyte/clay systems on the rheological and filtration

characteristics of oil-well drilling fluids” Fourth Mediterranean Clay Meeting, Ankara September 2006.

- [45] Khaled Benyounes a, Adel Benchabane b & Abderrahmane Mellak « Effet de l’ajout de polyanionique et de KCl sur le comportement rhéologique de la suspension de bentonite de Maghnia (Algérie) » *18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 août 2007*
- [46] K. BENYOUNES, A. BENCHABANE & A. MELLAK « caractérisation rhéologique de la bentonite de maghnia en Suspension aqueuse sans et avec additifs anioniques » *Courrier du Savoir – N°10, Avril 2010, pp.51-57*
- [47] Halliberton cour Edition, (2016).
- [48] T. Permien et G. Lagaly, «The Rheological and colloidal proprieties of bentonite dispersions in the presence of organique compounds », (1995).
- [49] C.G .Ryaen , et V .Chillingar, «Drilling fluids: state of the art, Journal of Petroleum science and engineering vol 14, pp.221- 230», (1996).

*Résumé :*

*Le but de ce présent travail : valorisation de la Bentonite Algérienne( gisement de Maghnia) avec l'introduction de celle-ci dans la fabrication des boues à base d'eau type KCL/Polymères.*

*Nous étudions l'effet de l'ajout des polymères (xanthane, PAC R, PAHPA, CMC LV) ainsi le sel (KCl) sur le comportement rhéologique d'une suspension de bentonite de Maghnia (Algérie). Des tests rhéologiques ont mis en évidence l'influence du polymère et du KCl sur son comportement en écoulement. Les tests rhéologiques réalisés sur la suspension de bentonite ont révélé un comportement de type Herschel-Bulkley. Ainsi, Il a été montré que le comportement rhéologique de la solution de polymères domine le comportement des mélanges argile-polymère. L'ajout de KCl provoque une augmentation de la viscosité et de la contrainte seuil expliquée par l'agrégation des particules argileuses due à la compression de la double couche électrique.*

*Mots Clés : Bentonite, boues, Polymères (xanthane, PAC R, CMC LV, PHPA), KCL, Rhéologie, Herschel-Bulkley, viscosité, suspension.*

*Abstract:*

*The object of this present work: valorization of the Algerian Bentonite (Maghnia) with the introduction of this one into the industry of water based mud (WBM) type KCL/Polymers mud.*

*We thus study the effect of the addition of polymers (xanthane, CAP R, PAHPA, CMC LV) salt (KCl) on the rheological behavior of a bentonite suspension of Maghnia (Algeria). Rheological tests highlighted the influence of polymer and KCl on its behavior in flow. The rheological tests carried out on the bentonite suspension revealed a behavior of the Herschel-Bulkley type. Thus, It was shown that the rheological behavior of the polymer solution dominates the behavior of the clay-polymer mixtures. The addition of KCl causes an increase in viscosity and constraint threshold explained by the aggregation of the argillaceous particles due to the compression of the double electric layer.*

*Key words: Bentonite, muds, Polymers (xanthane, CAP R, CMC LV, PHPA), KCL, Rheology, Herschel-Bulkley, viscosity, suspension.*