

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Minier

Laboratoire de Génie Minier



## Mémoire de magister

En : Génie Minier

Présenté par

**BELGHOUL Mohamed Amine**

Intitulé

# Etude du vieillissement de la bentonite de MEGHNIA, Tlemcen.

Soutenu publiquement le **28 / 10 / 2015** devant le jury composé de :

Président	Mr. DJEGHLAL Mohamed Amine	Pr	ENP
Rapporteur	Mme. DERAMCHI Karima	MC/A	ENP
Examineurs	Mr. OULD HAMOU Malek	MC/A	ENP
	Mr. M.A BACHAR ASSED	MC/A	ENP

**ENP 2015**

# DEDICACES

*A la mémoire de monsieur SAADA Abd El-Hafidh*

*Que Dieu, le miséricordieux, vous accueille dans son éternel paradis.*

# ***REMERCIEMENTS***

*Nous exprimons toute notre gratitude à Mme DERAMCHI Karima notre promotrice, pour la confiance qu'elle nous a accordé, pour les conseils qu'elle nous a prodigué et sa patience.*

*Nous exprimons toute notre gratitude à monsieur OULD HAMOU Malek, le chef de département du Génie Minier de l'Ecole Nationale Polytechnique, pour avoir mis à notre disposition tous les moyens nécessaires à la réalisation de notre projet.*

*Nous remercions très sincèrement l'ensemble du personnel de l'unité de MEGHNIA –ENOF-pour leur accueil, professionnalisme, disponibilité et leur aide.*

*Nous profitons de cette occasion, pour remercier les professeurs du département génie minier spécialement et de l'école en général. Un salut particulier au groupe des 7.*

*A AMMI SALAH, père spirituel de tous les polytechniciens et qui n'a jamais refusé son aide à qui que se soit, nous disons merci.*

*Enfin, Nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis qui nous ont toujours soutenu et encouragé tout au long de notre cursus universitaire.*

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة الخصائص الريولوجية، خاصة درجة اللزوجة، للبتونيت المستخرجة في مغنية، و هذا، اعتمادا على محاليل ماء - بنتونيت. من أجل التحقق من إشكالية تغير درجة لزوجة هذه البنتونيت.

من أجل هذا، قمنا بعدة تجارب قياس درجة اللزوجة على عدة عينات للبتونيت وفق درجات مختلفة من التفعيل  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  و وفق تراكيز مختلفة من وزن البنتونيت.

كلمات مفتاحية: الطين، البنتونيت، درجة اللزوجة، التيكسوتروبي، الريولوجي.

## Résumé

L'objectif principal de ce travail est de caractériser les propriétés rhéologiques, essentiellement la viscosité, de la bentonite de MEGHNIA en se basant sur des solutions d'eau-bentonite. Ceci est pour mettre en évidence la problématique de la variation de viscosité de cette bentonite.

Pour cela nous avons effectué des essais de mesures de viscosité sur des échantillons de bentonite à différents degrés d'activation avec  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  et à différents concentrations massiques de bentonite.

**Mot clés :** Argile, bentonite, viscosité, thixotropie, rhéologie.

## Abstract:

The main objective of this study is to characterize the rheological properties, essentially the viscosity, of MEGHNIA bentonite based on a water - bentonite solution. This, in order to the underscore the viscosity variation problem of this bentonite.

For that, we run several viscosity measurements test on several samples of bentonite with different activation degree using  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  at different mass concentrations of bentonite.

**Key words:** clay, bentonite, viscosity, thixotropic, rheology.

# Table des matières

Introduction générale.....	9
I.Généralités sur les bentonites.....	12
I.1 Description des bentonites .....	13
I.2 Classification des argiles.....	13
I.3 La microstructure de la bentonite .....	15
I.3.1 Cristallite et feuillet.....	15
I.3.2 Particule .....	16
I.3.3 Floc, agrégat.....	16
I.4 Le système eau bentonite.....	18
I.4.1 Dispersion de bentonite.....	17
I.4.2 Les interactions et associations inter-feuillets .....	18
I.4.2.1 Interactions particules-eau .....	18
I.4.3 Rôle des cations compensateurs : .....	22
I.5 Utilisations de la bentonite.....	22
I.5.1 Géotextile, ingénierie environnementale .....	23
I.5.2 Les céramiques.....	23
I.5.3 La peinture : .....	24
I.5.4 L'agroalimentaire : .....	24
I.5.5 La pharmacie et la cosmétique.....	24
I.5.6 Forage pétrolier .....	24
II. Gisement de MEGHNIA .....	31
II.1 Situation géographique .....	32
II.2 Géologie du gisement .....	33
II.3 Méthode d'exploitation.....	37
II.4 Traitement de la bentonite de MEGHNIA .....	38
II.4.1 La chaîne de production de MEGHNIA.....	38
II.4.2 La méthode d'activation et de traitement adopté.....	48
II.5 Les différents produits de l'unité de MEGHNIA : .....	53
II.6 Stock tout-venant bentonite : .....	54
II.7 Stock de produits finis .....	54
III. Rhéologie des fluides .....	55
III.1 Rhéologie.....	56

III.2	But de la rhéologie.....	56
III.2.1	Grandeurs fondamentales de la rhéologie [21] .....	56
III.2.2	Rhéogramme .....	57
III.2.3	Modèles rhéologiques [23], [08] .....	58
III.2.4	Thixotropie [08] .....	60
III.3	Caractérisation rhéologique du système eau-bentonite.....	62
III.3.1	Comportement d'écoulement .....	62
III.3.2	Thixotropie .....	63
III.3.3	Contrainte seuil .....	64
III.3.4	Facteurs d'influençant sur la rhéologie des suspensions.....	64
III.4	Conclusion.....	65
IV.	Les essais effectués .....	66
IV.1	L'échantillonnage.....	67
IV.1.1	Principe de l'échantillonnage.....	67
IV.1.2	Procédures d'échantillonnages.....	67
IV.1.3	Echantillonnage sur stock .....	67
IV.2	Réduction des échantillons.....	67
IV.2.1	Définitions et symboles.....	67
IV.2.2	Réduction de l'échantillon à l'aide d'un diviseur rotatif .....	68
IV.2.3	Réduction de l'échantillon à l'aide d'un diviseur à couloir .....	68
IV.2.4	Réduction par quartage .....	68
IV.3	Activation a la soude – phase préparation - .....	69
IV.3.1	But de l'essai.....	69
IV.3.2	Principe de l'essai .....	69
IV.3.3	Matériel utilisé .....	69
IV.3.4	Préparation de l'échantillon .....	69
IV.3.5	Mode opératoire .....	69
IV.4	Mesure de viscosité.....	69
IV.4.1	But de l'essai.....	69
IV.4.2	Principe de l'essai .....	69
IV.4.3	Matériels utilisés .....	70
IV.4.4	Préparation de l'échantillon .....	70
IV.4.5	Mode opératoire .....	70

IV.5 Résidus 75 µm.....	70
IV.5.1 But de l'essai.....	70
IV.5.2 Principe de l'essai .....	70
IV.5.3 Matériels utilisés .....	71
IV.5.4 Préparation de l'échantillon .....	71
IV.5.5 Mode opératoire .....	71
IV.6 Humidité.....	71
IV.6.1 But de l'essai .....	71
IV.6.2 Principe de l'essai .....	71
IV.6.3 Matériels utilisés .....	71
IV.6.4 Préparation de l'échantillon .....	71
IV.6.5 Mode opératoire .....	71
IV.7 Indice de gonflement : but de l'essai.....	72
IV.7.1 But de l'essai.....	72
IV.7.2 Principe de l'essai .....	72
IV.7.3 Matériels utilisés .....	72
IV.7.4 Préparation de l'échantillon .....	72
IV.7.5 Mode opératoire .....	72
V. Partie expérimentale .....	73
V.1 Introduction .....	74
V.2 Analyse minéralogiques .....	74
V.3 Analyse chimiques .....	75
V.4 Préparation des échantillons.....	76
V.5 Résidu 75 µm .....	77
V.6 Humidité.....	78
V.7 Indice de gonflement.....	78
V.8 Mesures de viscosité.....	79
V.8.1 Influence de l'activation avec le Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> sur la viscosité.....	79
V.8.2 Variation de la viscosité à un degré d'activation .....	80
Conclusion général.....	85

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau .I. 1:Classification des phyllosilicates.....	14
Tableau .II. 1: Etat des réserves géologiques par catégorie.....	36
Tableau .III. 1: Récapitulation des modèles rhéologiques.....	58
Tableau .V. 1: Répartition des minéraux contenus dans les bentonites de MEGHNIA.....	74
Tableau .V. 2: Analyse chimique de la bentonite de MEGHNIA - oxydes -.....	75
Tableau .V. 3: Analyse chimique de la bentonite de MEGNNIA - éléments en traces -.....	76
Tableau .V. 4: Mesure du résidu 75 µm.....	77
Tableau .V. 6: Mesure de l'humidité des différents échantillons.....	78
Tableau .V. 8: Mesure de l'indice de gonflement des différents échantillons. ....	78
Tableau V. 10 : viscosité des échantillons a différents degrés d'activation.....	79
Tableau V. 11:Variation de la viscosité des échantillons de bentonite de forage.....	80
Tableau V. 12:Variation de la viscosité des échantillons activé à 2%.....	81
Tableau V. 13:Variation de la viscosité des échantillons activé à 4%.....	81
Tableau V. 14:Variation de la viscosité des échantillons activé à 8%.....	82



# LISTE DES FIGURES

Figure. I. 1: Classification des silicates [2] [3]. .....	13
Figure. I. 2: Représentation ans l'espace d'un phyllosilicate [6]. .....	15
Figure. I. 3: Représentation schématique des différents ordres d'organisation des feuillets de Smectite [6]. .....	17
Figure. I. 4: Structure d'un feuillet de Kaolinite. ....	18
Figure. I. 5: Mode d'organisation des feuillets de montmorillonite en suspension (théorie de Van Olphen) [6] : A dispersion, B association face/face, C association bord/face et D association bord/bord. ....	20
Figure. I. 6: Représentation schématique en deux dimensions du modèle en bande propose par Weiss et Frank (a) [6] et du modèle de Keren et al. (b) [16]. ....	20
Figure. I. 7: Association de type d'argile à différentes échelles d'observation [17]. .....	21
Figure. I. 8: Organisation en rubans (M'Ewen et Pratt, illustration) [6]. ....	21
Figure. I. 9: Domaines d'utilisations des bentonites. ....	23
Figure .II. 1: Localisation du gisement de MEGHNIA. ....	32
Figure .II. 2: Carte de situation de gisement de bentonites. ....	32
Figure .II. 3: localisation de l'unité de MEGHNIA par rapport au gisement. ....	33
Figure .II. 4: Carte de répartition des gisements de bentonites de Hammam Boughrara. ....	35
Figure .II. 5: Carrière Roussel 1 (En exploitation). ....	36
Figure .II. 6: Extraction bentonite et chargement tout-venant (carrière Roussel I). ....	37
Figure .II. 7: flow sheet de production de l'usine de MEGHNIA. ....	38
Figure .II. 8: Description du procédé du traitement. ....	50
Figure .II. 9: Stock tout venant bentonite u niveau de l'unité de production. ....	54
Figure .II. 10: Stock tout venant bentonite u niveau de l'unité de production. ....	54
Figure .III. 1: Rhéogramme d'un fluide thixotrope. 61	
Figure .III. 2: Thixotropie en fonction de temps de repos. ....	61
Figure .III. 3: Effet de la modification de structure. ....	62
Figure .IV. 1: Opération de quartage. ....	68
Figure .V. 1: Echantillons utilisé pour l'étude de la bentonite de MEGHNIA. ....	77
Figure .V. 2: Variation de la viscosité en fonction du degré d'activation. ....	79
Figure .V. 3: Variation de la viscosité en fonction de la concentration du fluide. ....	80
Figure .V. 6: Variation de la viscosité en fonction du temps –bentonite de forage-. ....	82
Figure .V. 7: Variation de la viscosité en fonction du temps -Act 2%-. ....	82
Figure .V. 8: Variation de la viscosité en fonction du temps -Act 4%-. ....	83
Figure .V. 9: Variation de la viscosité en fonction du temps -Act 8%-. ....	83

# **Introduction Générale**

La bentonite de forage est une argile qui contient principalement la montmorillonite, elle est employé couramment comme additif dans les boues de forage pour la commande de viscosité et de filtration.

Grâce à ses propriétés rhéologiques, la bentonite est utilisée avec beaucoup de succès comme additif de base dans les fluides de forage à base d'eau, elle est employé dans toute une gamme de types de fluide, depuis les fluides à base d'eau douce jusqu'à ceux à base d'eau salée saturée, à haute température, dans divers environnements chimiques.

La bentonite confère au fluide de forage d'importantes propriétés rhéologiques, la forme et la taille de ses particules permettent d'obtenir d'excellentes propriétés de contrôle de filtrat. L'utilisation de la bentonite en tant qu'additifs dans les fluides de forage est étroitement liée avec ses propriétés chimiques et physiques. Pour pleinement apprécier aussi bien ses points forts que ses faiblesses il faut partir d'une bonne connaissance de sa structure et de ses réactions à divers environnements.

Les mélanges fluides/argiles présentent donc un grand intérêt, le fluide qui fait l'objet de ce travail est l'eau douce. Par ailleurs, l'ajout d'argile aux solutions provoque une modification importante des propriétés rhéologiques des fluides. En général, les lois de comportement de ces matériaux se révèlent complexes en raison de leur caractère rhéofluidifiant à seuil et de leur comportement viscoélastique. La détermination des propriétés rhéologiques des dispersions eau/Bentonite, ainsi que la compréhension des interactions de nature microscopique et physicochimique de ces systèmes colloïdaux sont des éléments primordiaux pour adapter la composition du fluide aux conditions industrielles.

La bentonite faisant partie de cette étude est la bentonite de MEGHNIA de la wilaya de Tlemcen. La problématique présente dans ce projet est l'étude du vieillissement de cette bentonite.

Le produit de MEGHNIA est essentiellement constitué de bentonite de boue de forage, celle-ci étant conditionné par des normes très strictes dont la norme API, appliqué par la plupart des acteurs pétroliers.

La norme API 13 section 6 exige pour qu'une boue de forage soit optimale pour une opération de forage parfaite qu'elle remplit les exigences suivantes :

- Lecture 600 rpm  $\geq 30$  Cp
- Ratio  $\leq 6$
- Perte au filtrat  $\leq 16$  cm<sup>3</sup>
- Résidu sur tamis 75 $\mu$   $\leq 2,5\%$
- Humidité  $\leq 13\%$

Lors de sa production, la bentonite de MEGHNIA, ne répond pas au minimum des exigences de viscosité, elle est de l'ordre de 20 Cp, tandis que sa viscosité ne cesse pas d'accroître en fonction du temps.

Une fois le produit stocké à l'abri est après un vieillissement de 15 jours à 2 mois et après vérification des indices de qualité on trouve que la viscosité de la bentonite répond parfaitement aux exigences de la norme API.

Ce changement de viscosité, un croisement en fonction de temps, pose problème à la commercialisation des produits de la bentonite de boue de forage.

Dans ce travail, on vise à mettre en évidence cette variation de viscosité en fonction de temps et de proposer une analyse de cette dernière.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les bentonites**

## I.1 Description des bentonites

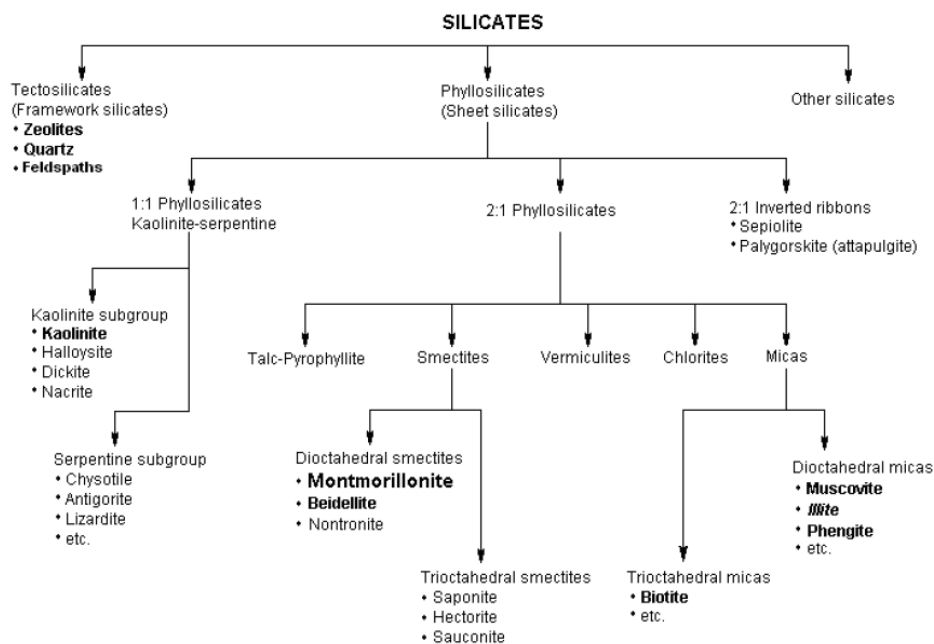
Le nom "bentonite" provient de fort Benton (Wyoming, les Etats-Unis), le lieu où elle a été trouvée pour la première fois. La bentonite est un matériau naturel très diversifié dont les propriétés physico-chimiques et mécaniques sont largement utilisées dans l'industrie. Elle est une roche constituée d'argile colloïdale et plastique composée principalement de montmorillonite, du groupe smectique (Figure. I. 1). Cette argile est produite à partir de la dévitrification in situ de la cendre volcanique. La transformation de la cendre en bentonite ne peut avoir lieu que dans l'eau (eau de mer, lacs alcalins, et eau douce) [1].

## I.2 Classification des argiles

L'argile est une matière première utilisée depuis la plus haute antiquité. Le mot argile vient du grec "argilos" dérivé de "argos" qui veut dire blanc, ou du latin "argila"; c'est la couleur du matériau utilisé en céramique qui a conduit les anciens à lui donner ce nom. [20]

La première définition des argiles est **granulométrique**, c.-à-d. les argiles correspondent à la fraction inférieure à 2 µm d'un sol ou d'une formation géologique, et **Minéralogiquement**, c.-à-d. que les argiles correspondent à des minéraux aluminosilicates le plus souvent de la famille des « Phyllosilicates » qui sont formés de particules dont les unités de bases sont des feuillets de très faible épaisseur (7, 10 ou 14 Å).

Les deux définitions (granulométrique et minéralogique) se recoupent mais ne sont pas équivalentes. En effet si les minéraux argileux sont le plus souvent constitués de particules inférieures à 2 µm, la fraction granulométrique inférieure à 2 µm d'un sol ou d'une formation géologique comprend très souvent d'autres minéraux que les seuls minéraux argileux (quartz, silice colloïdale, carbonates, etc.). Compte tenu de la granulométrie des particules et de leur structure (association de feuillets de très faible épaisseur). Les matériaux argileux développent des surfaces spécifiques très élevées, comprises entre 5 et 800 m<sup>2</sup>/g, ce qui leur confère des propriétés d'adsorption très importantes. [21]



**Figure. I. 2:** Classification des silicates [2] [3].

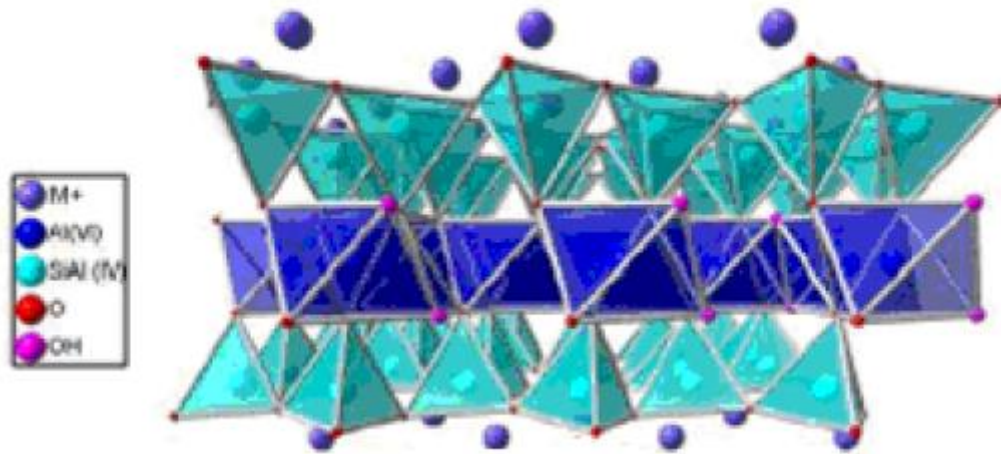
Le tableau suivant nous donne en résumé la classification des phyllosilicates :

**Tableau .I. 1:**Classification des phyllosilicates.

Groupe	Sous-groupe	Espèces	Formules
Kaolinite	Kaolinites	Dichite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
		Nocrite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Kaolinite		$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	
Mètahalloysitehalloysite		$Al_2Si_2O_5(OH)_4$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 4H_2O$	
	Serpentine	Antigorite	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
Talc	Pyrophyllite	Pyrophyllite	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$
	Talc	Talc	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
Smectite	Smectites Dioctaédriques	Montmorillonite	$(Al_{1,67}Mg_{0,33})SiO_{10}(OH)_2$
	Smectites Trioctaédriques	Saponite	$Mg_3(Si_{3,67}Al_{0,33})O_{10}(OH)_2$
Vermiculites	Vermiculite Dioctaédrique	Vermiculite Dioctaédrique	$(Al,Fe...)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$
	Vermiculite Trioctaédrique	Vermiculite	$(Mg,Fe...)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$
Micas	Micas Dioctaédrique	Muscovite	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
	Micas Trioctaédrique	Phlogopite	$KMg_3(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$
	Chlorite Dioctaédrique	Sudoite	$(Al_4Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
Chlorite	Chlorite Trioctaédrique	Espèces différentes	$(Mg,Al,Fe)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$

Une smectite est donc une argile en feuillets, de type Phyllosilicate (minéraux de la famille des silicates). Les smectites forment une des familles d'argile les plus importantes (Figure. I. 1). La plupart des minéraux argileux sont en formes de feuillets. Le feuillet d'argile est formé par une couche octaédrique comprise entre deux couches tétraédriques (T-O-T) (Figure. I. 3) [4].

La formule moléculaire de la montmorillonite est toujours donnée sous la forme :  $(M+x.nH_2O) (Al_{2-y}Mg_x) Si_4O_{10}(OH)_2$ , avec  $M^+ = Na^+, K^+, Mg^{2+}, ou Ca^{2+}$  [5]. Les ions  $Si^{4+}$  sont situés à l'intérieur d'un tétraèdre dont les sommets sont occupés par des atomes d'oxygène. Les ions  $Al^{3+}$  sont situés à l'intérieur d'un octaèdre dont les sommets sont occupés par quatre atomes d'oxygène et deux ions hydroxyles. Les feuillets élémentaires sont séparés par des molécules d'eau et des cations échangeables. Ces cations rétablissent la neutralité du système et assurent également la liaison entre les feuillets adjacents.



**Figure. I. 4:** Représentation dans l'espace d'un phyllosilicate [6].

La smectite est composée de particules plates avec des diamètres allant de quelques microns à des centaines de microns. Le degré d'hydratation de l'argile 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 "argiles gonflantes". 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 les cations compensateurs. Cette charge négative est couramment notée charge structurale permanente et se situe aux alentours de  $7.10^{-3} e/\text{\AA}^2$ . Elle est à l'origine du gonflement de ces minéraux en présence d'eau [7].

### I.3 La microstructure de la bentonite

Dans cette partie nous allons essayer de décrire la structure multi-échelle des montmorillonites ainsi que leurs propriétés spécifiques. Les montmorillonites ont la particularité de présenter différents niveaux d'organisation selon l'échelle, présentés par le Pluart [8]. Paumier [6] a présenté une synthèse des différents modes d'organisation des particules d'argile. Nous proposons ci-dessous un résumé :

#### I.3.1 Cristallite et feuillet

La cristallite est la cellule de base des minéraux argileux (Figure. I. 5, ordre 2). Elle est constituée de feuillets (Figure. I. 6, ordre 1) et d'interfeuillet ou espace interfoliaire.

Les feuillets sont les unités de base de la structure qui définissent la nature minéralogique, les propriétés physico-chimiques ainsi que le comportement macroscopique des argiles. Chaque feuillet est lui-même formé de la superposition de deux ou trois couches cristallisées, dans lesquelles les atomes, sont régulièrement distribués.



L'interfeuille est constitué d'eau assurant la liaison électrochimique entre les feuillets. L'épaisseur totale du feuillet et de l'espace interfeuille associé est d'environ 14 Å [7].

### I.3.2 Particule

La particule est une unité structurale élémentaire qui résulte de l'empilement de quelques feuillets ou quelques cristallites (Figure. I. 7, ordre 3). Les particules constituent le premier niveau d'organisation. La structure de la particule peut se présenter suivant trois grands types d'empilements:

➤ **Empilement ordonné**

Où les feuillets sont empilés les uns sur les autres dans un ordre parfait.

➤ **Empilement semi-ordonné (ou désordre translationnel)**

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.

➤ **Empilement désordonné (ou désordre turbostratique)**

Des feuillets successifs présentent des translations et/ou des rotations aléatoires. Les feuillets sont séparés par un film d'eau permettant une libre rotation autour d'un axe perpendiculaire au plan de la particule [9].

### I.3.3 Flocc, agrégat

Le flocc est le regroupement des particules. L'ensemble est gorgé d'eau et donc facilement déformable sous cisaillement.

L'agrégat est l'association de particules pluri-feuillets. Ils ont une taille qui varie de 0.1 à 10 microns (Figure. I. 8, ordre 3). L'agrégat est plus ou moins dense selon la texture et le nombre des particules, ainsi que les distances entre elles [9]. La formation d'un réseau (Figure. I. 9, ordre 4) donne à la suspension, des propriétés mécaniques spécifiques (viscoélasticité...) [6].

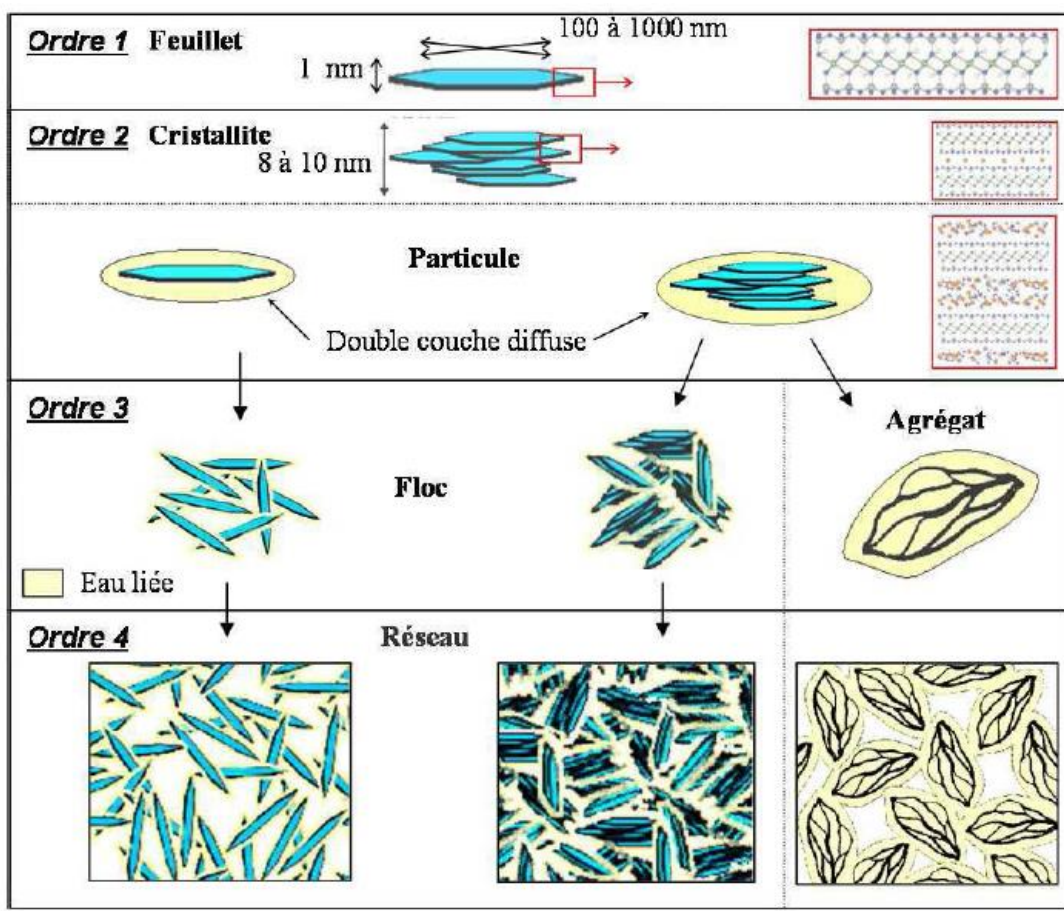


Figure. I. 10: Représentation schématique des différents ordres d'organisation des feuillets de Smectite [6].

## I.4 Le système eau bentonite

### I.4.1 Dispersion de bentonite

Les propriétés de gonflement des montmorillonites sont dues au caractère hydrophile de leurs surfaces et à la présence des cations hydratés dans la galerie interfoliaire [10]. Le degré d'hydratation de l'argile dépend de la nature du cation hydraté et de l'humidité relative. "Ces cations présents en solutions sont attirés vers les surfaces des feuillets d'argile chargés négativement. Ils sont par ailleurs repoussés de ces surfaces par la force osmotique qui tend à uniformiser la concentration en cations dans la solution. Il résulte de ces deux effets opposés une certaine distribution des cations au voisinage des feuillets" [11].

Lorsque l'hydratation se poursuit par le gonflement des particules, en présence de l'eau, la bentonite peut former un solide hydraté, une suspension ou un gel. Cela est possible grâce au caractère gonflant de cette argile. Ces types de gels sont caractérisés par des particules très lâches constituées d'un nombre faible de feuillets (en moyenne 5), voire des feuillets isolés, situés à des distances allant de 30 à quelques centaines d'Å. L'ensemble forme un réseau très souple, avec des propriétés importantes de viscosité et de thixotropie [9]. Le volume du matériau peut se multiplier par vingt par la prise d'eau.

C'est d'ailleurs le cas de la bentonite où l'eau en s'engouffrant dans l'espace interfoliaire (Figure. I. 11), provoque l'écartement des feuillets [11]. On peut distinguer deux échelles différentes de l'organisation structurale de la bentonite :

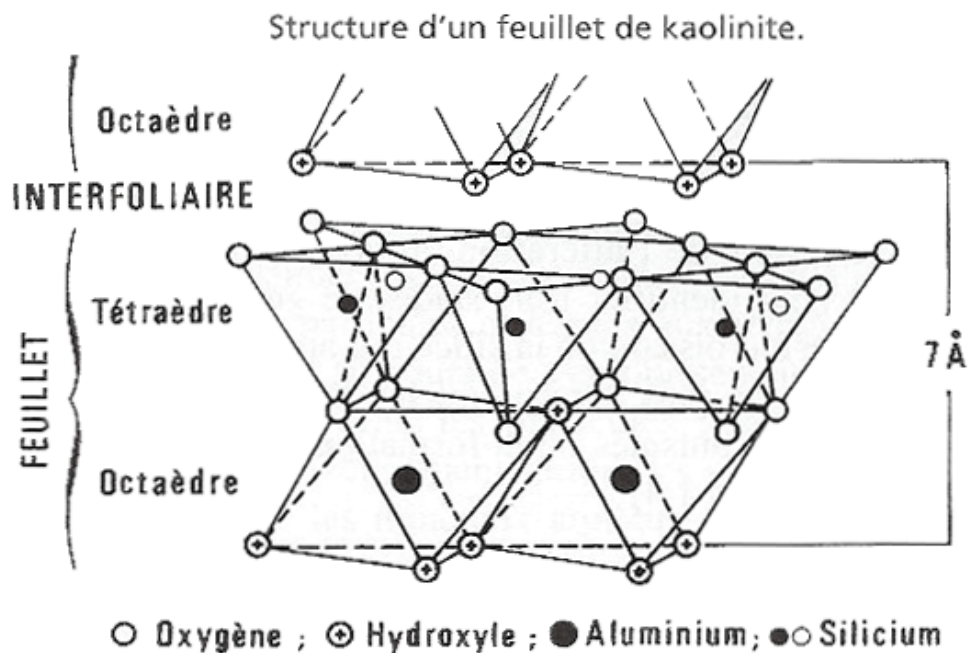


Figure. I. 12: Structure d'un feuillet de Kaolinite.

➤ **une dispersion interparticulaire**

Où la pénétration des molécules d'eau est localisée entre les particules élémentaires ;

➤ **une hydratation interfeuillet**

Où la pénétration des molécules d'eau est localisée entre les feuillets qui constituent une particule [9]. Le phénomène d'hydratation interfeuillet augmente la distance entre les feuillets (distance basale) [12]

## I.4.2 Les interactions et associations inter-feuillets

### I.4.2.1 Interactions particules-eau

Les feuillets chargés engendrent des propriétés électrostatiques à l'interface solide/fluide lorsqu'ils sont hydratés. Pour assurer l'électroneutralité, la charge négative est compensée par un nuage de cations en solution qui se développe à proximité de la surface. On distingue trois théories différentes:

- **La théorie de Chapman (1910)**

Permet de déterminer la distribution des cations autour des feuillets de smectite. Elle repose sur l'existence, à proximité d'une surface chargée, d'une couche dite diffuse (ou ddl: diffuse double layer) possédant des propriétés différentes de celles du fluide [13].

- **Le modèle à double couche de Stern (1924)**

Rend compte de la taille finie des ions en divisant l'interface solide-fluide suspendant en deux parties appelée couche de Stern et couche diffuse [13].

- **Le modèle à triple couches (1947)**

Qui introduit la division de la couche de Stern en deux parties.

### I.4.2.2 Les interactions inter-particules

En résumé, le potentiel d'interaction entre particules résulte d'interaction de plusieurs types:

- **Répulsion de sphères dures.**
- **Répulsion électrostatique.**
- **Interaction stérique** (par exemple lorsque des tensioactifs ou des polymères sont adsorbés à la surface des particules).
- **Attraction de Van der Waals.**

### I.4.2.3 Organisation des cristallites

Pour les suspensions stables électrostatiquement, un regroupement des feuillets se produit. Ce phénomène est d'autant plus important lorsque l'addition d'électrolyte conduit à la contraction de la double couche. La répulsion due à la double couche (VR) est donc réduite de telle sorte qu'elle devienne inférieure à l'attraction de Van der Waals (VA) pour toutes les distances de séparation. Les feuillets s'orientent au sein des cristallites en empilements. Pour une même concentration, les feuillets associées en cristallites occupent moins de place que les feuillets isolés. Cette notion d'occupation influence la viscosité de la suspension. Ainsi, la nature des interactions influence fortement les propriétés d'écoulement des suspensions.

Au sein des cristallites, les cations sont souvent considérés comme statiques et préférentiellement localisés dans les cavités trigonales. Pourtant, les cations ne sont pas fixés par des liaisons mais uniquement attirés par des interactions électrostatiques. L'ensemble feuillet/cation devrait donc être considéré dans une stabilité dynamique où les cations compensent la charge des feuillets sans être soumis à un site en particulier. Les poudres de smectites sont hydratées dans les conditions atmosphériques. Dans le cas d'une saturation sodique, une couche d'eau sépare les feuillets, et deux couches d'eau dans le cas d'une saturation calcique [6].

### I.4.2.4 Les modes d'organisations des feuillets :

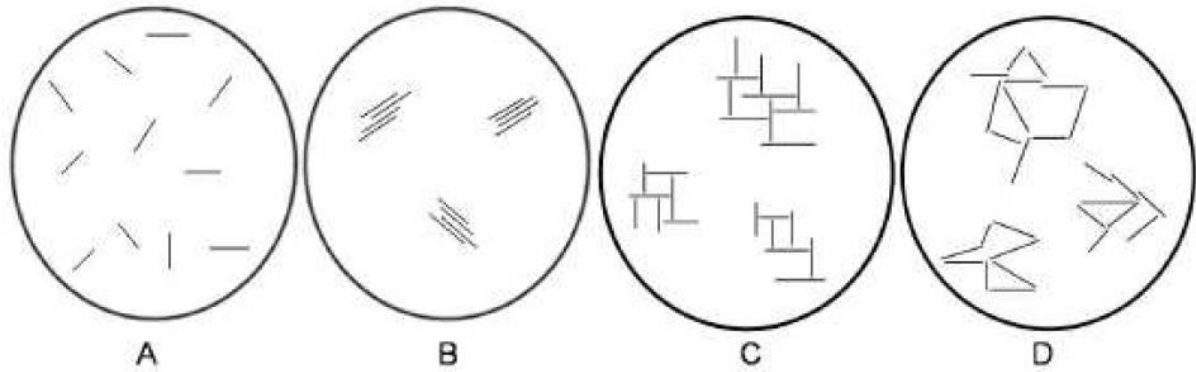
Les feuillets dispersés dans la suspension (Figure. I. 13) interagissent et s'associent sous certaines conditions pour former des structures.

Trois modes d'association élémentaire de particules ont été définis par Van Olphen [14]:

**B** : association entre les oxygènes de deux feuillets parallèles (face/face, FF)

**C** : association entre une surface périphérique et une surface plane (bord/face, BF)

**D** : association entre les surfaces périphériques de deux particules voisines (bord/bord BB).



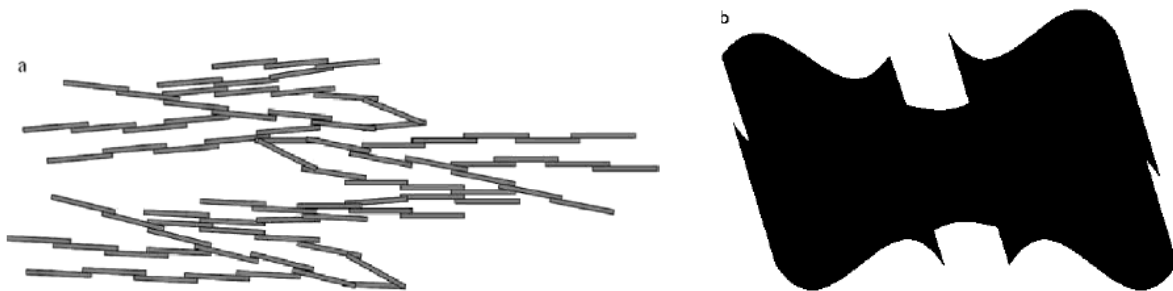
**Figure. I. 14:** Mode d'organisation des feuillets de montmorillonite en suspension (théorie de Van Olphen) [6] : A dispersion, B association face/face, C association bord/face et D association bord/bord.

**A:** En suspension, une telle dispersion des feuillets induit une forte occupation volumique donc une viscosité relativement importante dès les plus faibles concentrations.

**B:** L'association face/face des feuillets est à l'origine de la formation des cristallites, ce type d'organisation suppose la coalescence des doubles couches. Deux types d'organisation sont possibles.

- la création d'une structuration extensive dans la suspension par recouvrement partiel tel que le modèle en bandes de Weiss et Frank [15] (Figure. I. 15.a).
- l'existence de petites unités compactes avec recouvrement quasi-total (Figure. I. 16.b).

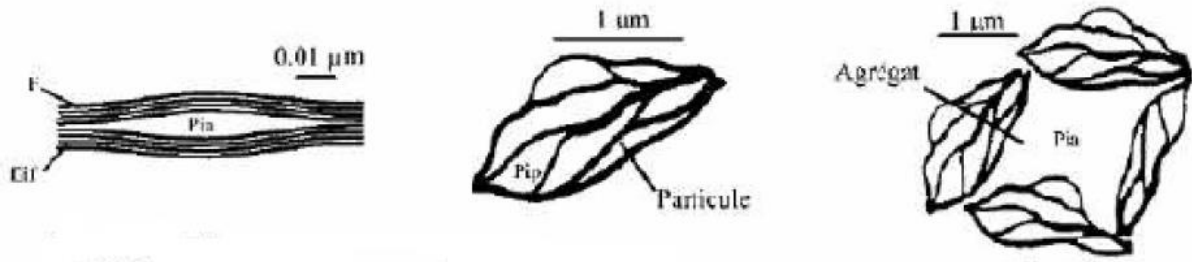
La flexibilité de la structure obtenue pourrait permettre l'obtention d'un réseau tridimensionnel.



**Figure. I. 17:** Représentation schématique en deux dimensions du modèle en bande proposé par Weiss et Frank (a) [6] et du modèle de Keren et al. (b) [16].

Keren et al [16] proposent une structuration basée sur le mode d'association ponctuel face/face des feuillets. Selon cette étude, l'hétérogénéité des répartitions des charges à la surface des feuillets induirait l'existence de zones ponctuelles, non chargées susceptibles de s'associer. La flexibilité de la structure serait alors due à la seule flexibilité du feuillet. Cependant, la flexibilité d'un feuillet seul est limitée et l'évaluation précise de l'hétérogénéité

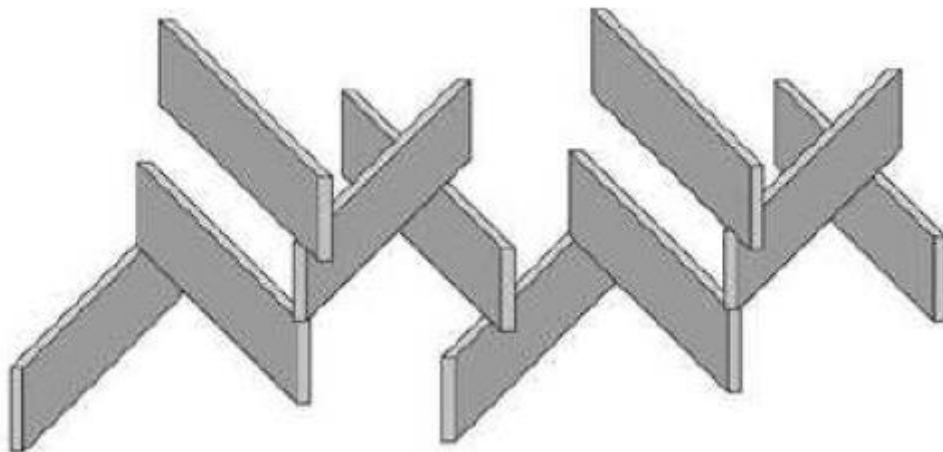
des charges reste difficile. La combinaison de ces deux modes d'association pourrait être en accord avec la description des espaces poreux intra-particulaires, inter-particulaires et inter-agrégats de Touret (Figure. I. 18) [17].



**Figure. I. 19:** Association de type d'argile à différentes échelles d'observation [17].

**C:** L'association bord/face est théoriquement possible entre les faces constamment chargées négativement et les bords, chargés positivement, lorsque le pH est inférieur au point isoélectrique. Ce mode d'association est à la base de la théorie de l'organisation en château de cartes proposée par Hofmann [18]. Ce mode d'association permettrait le piégeage de grandes quantités d'eau, il est donc souvent proposé pour expliquer l'apparence gélineuse des suspensions et leur forte viscosité.

**D:** L'association bord/bord des feuillettes est envisageable dans la mesure où les bords des feuillettes sont des zones où le potentiel électrostatique est minimal (Figure. I. 20). Ces liaisons seraient alors privilégiées lors de la compaction du système par augmentation de la concentration. L'organisation en ruban proposée par M'Ewen et Pratt [6] [19] s'appuie sur cette hypothèse. Elle permettrait, au même titre que l'organisation en château de carte de mobiliser une grande quantité d'eau et donc d'expliquer les propriétés mécaniques des suspensions.



**Figure. I. 21:** Organisation en rubans (M'Ewen et Pratt, illustration) [6].

### I.4.3 Rôle des cations compensateurs :

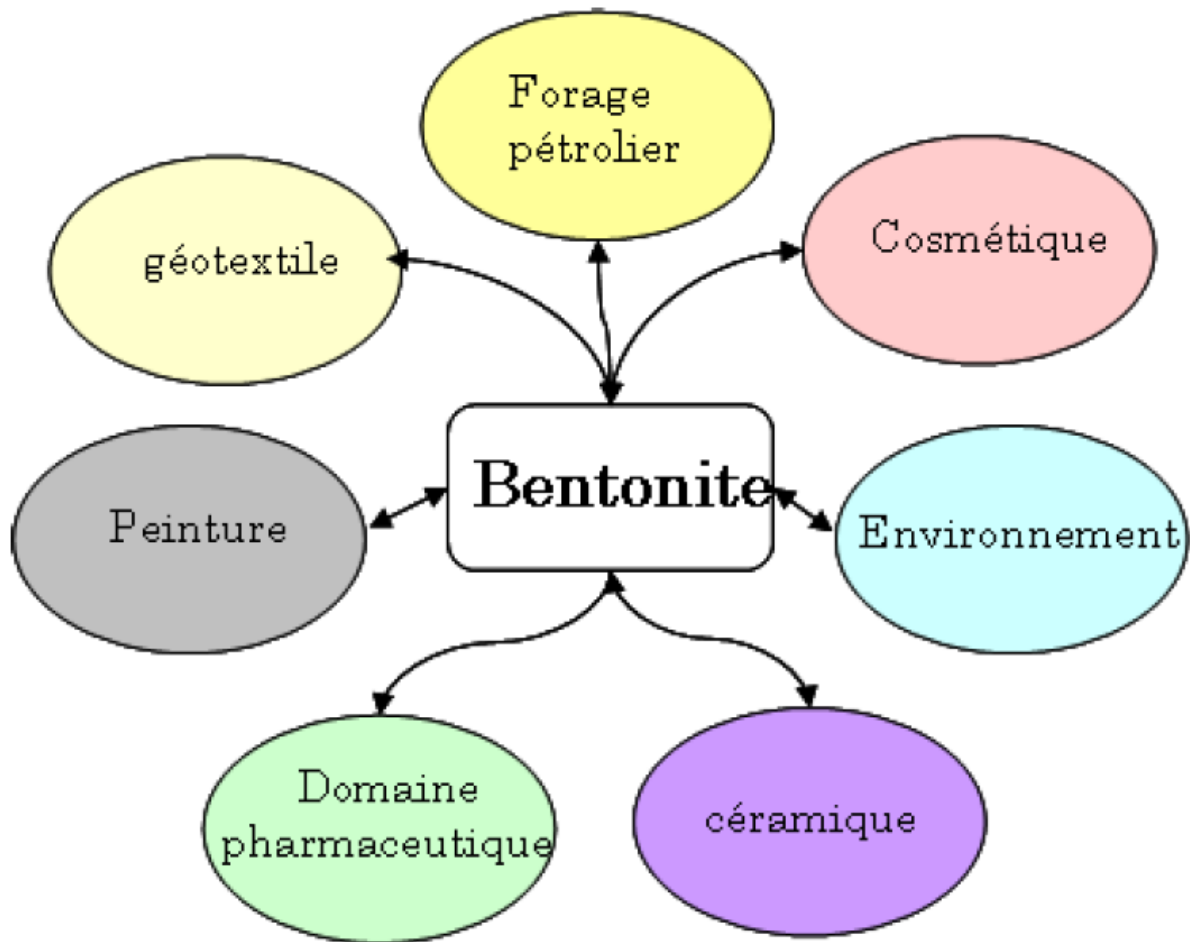
On distingue deux groupes de cations compensateurs :

- Les cations qui permettent d'obtenir la dispersion maximum pour la montmorillonite mais également pour tous les phyllosilicate présentant des propriétés d'hydratation. Ces cations sont :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Ag}^+$ .
- Les cations qui ne permettent qu'une hydratation limitée à quelques couches d'eau (2-4 suivant le minéral) :  $\text{Cs}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ , Il y a une relation entre le gonflement des particules argileuses et l'hydratation des cations en classant ces derniers par valeur décroissante de leur énergie d'hydratation réduite.

On obtient le classement suivant :  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  puis  $\text{Cs}^+$ . Ce classement est bien logique à partir du moment où les cations  $\text{Li}^+$  et  $\text{Na}^+$  permettent d'obtenir une dispersion maximale alors que les cations  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Cs}^+$  ne permettent d'une hydratation limitée. Ce n'est que les  $\text{K}^+$  qui pose problème, tantôt il se comporte comme les  $\text{Na}^+$  et tantôt comme des  $\text{Ca}^{2+}$ . De plus, la présence de certains métaux ou cations d'un grand rayon ionique pouvait diminuer le gonflement interfoliaire.

### I.5 Utilisations de la bentonite

L'obtention des bentonites nécessite plusieurs étapes: l'extraction du matériau, le concassage, et le traitement. Les bentonites procurent des propriétés adsorbantes, d'étanchéité, de transport ou de liant [6]. Leurs propriétés mécaniques (viscosité, fluidification, seuil d'écoulement, thixotropie) sont largement utilisées dans les produits de notre quotidien. Leur domaine d'utilisation s'étend du génie civil où le matériau brut broyé est utilisé en grandes quantités (géotextile), fluides de forage; jusqu'à la pharmacie et l'agroalimentaire (Figure. I. 9) où la smectite est spécifiquement purifiée et contrôlée pour sa consommation (crèmes, pansements gastrique, filtres naturels...).



**Figure. I. 22:** Domaines d'utilisations des bentonites.

Chaque domaine a ses propres exigences au niveau des capacités d'adsorption, des propriétés mécaniques (viscosité, seuil, thixotropie) et des caractères minéralogiques (présence de minéraux non argileux). Les bentonites sont utilisées sous différentes formes, de la poudre ou des granules (associé à un géotextile), jusqu'à la suspension plus ou moins concentrée et plus ou moins traitée (fluides de forage). L'utilisation de la bentonite dans les domaines liés à l'agroalimentaire et à la pharmacie est soumise à des règles strictes de composition. Nous allons détailler quelques utilisations :

### **I.5.1 Géotextile, ingénierie environnementale**

Les géotextiles sont des nappes de fibres synthétiques utilisées dans les travaux publics. Les Géosynthétiques Bentonitiques (GSB) sont des produits formés par une couche de bentonite de faible perméabilité, comprise entre des géotextiles. Les GSB sont utilisés pour l'étanchéité de différents dispositifs (fond et couverture de décharge, lac artificiel) [6].

### **I.5.2 Les céramiques**

La bentonite permet de maintenir des mélanges de particules assez grossières en suspension dans les émaux [6].



## I.5.3 La peinture :

Dans l'industrie de la peinture, la bentonite est utilisée pour épaissir les liquides. L'écoulement de la peinture doit être suffisant pour permettre une bonne couverture et doit pouvoir se structurer en gel dès l'arrêt des cisaillements. La durée de séchage de la peinture (liée à la thixotropie) doit être ni trop courte sous peine de conserver les marques de pinceau, ni trop longue pour ne pas entraîner des coulures [6].

## I.5.4 L'agroalimentaire :

Dans l'agroalimentaire, la bentonite est utilisée pour ses propriétés structurantes en vue d'épaissir les aliments pour animaux, lier les aliments en comprimés ou en pastilles ou comme agent antiagglomérant. Puisque la smectite est un bon agent absorbant, elle est également utilisée pour ses propriétés d'hydratation.

## I.5.5 La pharmacie et la cosmétique

Les smectites sont largement employées en dermopharmacie et dermocosmétiques pour leurs propriétés de gonflement (onctuosité, consistance) ainsi que leurs propriétés mécaniques. Leurs formulations doivent répondre à de nombreuses exigences telles que la facilité d'étalement (rhéofluidifiant) et la restructuration liée à sa thixotropie. Leur utilisation permet d'éviter l'emploi de corps gras dans les shampoings, les crèmes et les pâtes dentifrice. Les propriétés de gonflement des argiles sont également utilisées comme principes actifs (protection gastro-intestinale, laxatifs, anti-diarrhéiques) ou comme excipients (base inertes, émulsifiants, lubrifiants) [6]. Les suspensions argileuses ont une forte adhésion à la peau. En cosmétique cette propriété facilite la diffusion de l'eau interstitielle et contribue à l'échauffement local qui assure une dilatation des pores et contribue à son hydratation.

## I.5.6 Forage pétrolier

Lors d'un forage pétrolier, on injecte un mélange de bentonite pour remplir l'espace entre la sonde du forage et les parois du puits de forage. Ce procédé permet de refroidir l'outil de forage, aide à attaquer la roche par injection sous pression et nettoie le trou en remontant les morceaux de roche broyée. La boue de forage est aussi indispensable au maintien du trou, pour éviter qu'il ne s'effondre. Lors d'un arrêt temporaire des travaux, la boue se gélifie évitant ainsi leur sédimentation. Lors de la reprise, la boue se fluidifie. L'ajustement des propriétés de la boue permet de colmater les pertes [6].

### I.5.6.1 Historique de la boue de forage

La tradition rapporte que c'est sur le champ de SPINDLETOP, près de BEAUMONT (Texas) que la boue de forage fut utilisée pour la première fois par le capitaine LUCAS. Cependant l'évolution s'est faite au fur et à mesure des problèmes rencontrés et des possibilités de la technique et, bien avant 1901, on utilisait déjà un mélange d'eau et d'argiles.

- Avant 1901 : période artisanale.
- De 1901 à 1928 : période empirique.
- De 1928 à 1955 : période expérimentale.
- A partir de 1955 : période technique.

Avant 1901, les fluides de forage étaient constitués essentiellement d'eau et l'on n'attachait aucune importance à ces fluides. Le capitaine LUCAS passe pour être le premier homme qui s'intéressa à la constitution de la boue. Cependant, jusqu'en 1928, la littérature est pauvre en articles concernant la boue et il semble que jusqu'à cette époque on n'attacha d'importance qu'à la densité (mesurée par pesée directe à l'aide d'une balance ordinaire), à la viscosité (appréciée visuellement) et l'eau libre surnageante. Mais déjà en 1920, on utilisait le sulfate de barine pour alourdir et s'opposer aux éruptions d'huile ou de gaz.

- A partir de 1928, de nombreux chercheurs se penchent sur l'étude expérimentale des fluides et les progrès deviennent très vite sensibles. La première société de services de boues se crée aux Etats-Unis.
- En 1929, on commence à employer les bentonites pour augmenter la viscosité et les phosphates pour la diminuer.
- En 1930 et 1931, le viscosimètre MARCH fait son apparition sur les chantiers et le viscosimètre STORMER dans les laboratoires. L'emploi du tanin de Quebracho commence à se généraliser et la boue au silicate de soude est employée pour forer les argiles gonflantes.
- En 1935, les premiers éluriomètres permettent de mesurer la concentration en sable de la boue et la première boue à l'huile est utilisée pour forer une zone productrice.
- En 1936, l'attapulgite est employée pour augmenter la viscosité des boues salées. La Division Production de l'A.P.I édite un manuel contenant les recommandations pour tester les boues de forage.
- En 1937, apparaît la première balance à boue (construite par P.H JONES) qui détrônera progressivement l'hydromètre. L'amidon de maïs est introduit sur le marché et employé comme réducteur de filtrat. En même temps, les premiers filtres presses commencent à se généraliser.
- En 1944, apparaît la carboxyméthylcellulose (CMC) comme réducteur de filtrat non fermentescible.
- En 1945, on emploie pour la première fois, comme réducteur de viscosité, les lignosulfonate de calcium et les lignines. Les premières boues à chaux sont mises au point et vont dominer, pendant plus de 15 ans toute la technologie des boues.
- En 1949, apparaît le viscosimètre FANN qui améliora l'interprétation de caractéristiques rhéologiques des boues de forage.
- En 1955, la mise au point des lignosulfonates de ferrocrome permet l'emploi de la boue de Gypse qui va progressivement détrôner la boue à la chaux.
- A partir de 1955, les progrès sont très rapides et les produits dont on dispose actuellement permettent de faire face à peu près à tous les problèmes.

## I.5.6.2 Les types des boues de forage

On a quatre types de boue de forage, qui sont :

- Les boues à base d'eau.
- Les boues à base d'huile.
- Les boues de réservoir.
- Les boues airées et à mousse.

### I.5.6.2.1 Les boues à base d'eau :

Les fluides de forage à base d'eau sont des fluides dont la phase continue est l'eau, éventuellement chargée en électrolytes (NaCl). Ces boues peuvent être constituées essentiellement soit par :

- L'eau douce dont la salinité en NaCl ne dépasse pas quelques g/l.
- Les boues salées, dont la salinité est de quelques dizaines de g/l (eau de mer par exemple) jusqu'à la saturation (320 g/l environ)

#### ➤ Les boues douces (boues bentonitiques)

Les boues douces sont principalement constituées par une suspension colloïdale d'argile, plus précisément de la bentonite sodique dans l'eau. Ces bentonites sodiques présentent une grande faculté de gonflement. La concentration en bentonite varie de 3 à 10% selon la qualité de la bentonite et les caractéristiques de la boue désirée.

Comme fluide de forage, la suspension bentonitique présente des propriétés intéressantes liées à la valeur de ses caractéristiques rhéologiques (viscosité, gels) et de filtration (filtrat).

Les principaux types de boues douces : généralement, ils sont classés en quatre groupes :

- Boues douces simplifiées.
- Boues douces au FCL (lignosulfonate de Ferrochrome).
- Boues calciques (boue à la chaux et boue au gypse).
- Boues de forage à faible teneur en solides (ce type de fluide peut être utilisé dans les boues douces ou les boues salées. Aussi, elle provoque l'agrégation des solides indésirables et les maintient en suspension).

#### ➤ Les boues salées

Les boues salées sont apparues par auto saturation des fluides à base d'eau douce lors de traversée de formation salifères. Cette auto saturation a entraîné des ennuis sérieux de forage résultant en :

- Des contaminations spectaculaires (floculation de la bentonite, accroissement des viscosités et gels, décrochement du filtrat).
- Des cavages et des éboulements de formation importante.

Cette boue salée est utilisée :

- Pour les traversées de formation salifères.
- Utilisation quasi systématique en offshore.
- Pour certains problèmes particuliers d'exploration (protection d'une couche par l'utilisation d'eau de gisement).

## ➤ Les boues polymères

Qui sont utilisées dans les champs d'explorations ou quand le forage passe par une nappe d'eau (les lois du ministère de l'environnement).

### I.5.6.2.2 Les boues à base d'huile

Ce sont des boues dont la phase continue est l'huile. On distingue les boues à l'huile contenant 5 à 15% d'eau, et les boues à émulsion inversée pouvant contenir jusqu'à plus de 50% d'eau. Pour ces deux types de boues, l'émulsion formée est toujours du type eau dans l'huile. L'avantage des boues à base d'huile sont :

- Contrôle aisé des caractéristiques en absence de venue d'eau ou de brut.
- Insensibilité aux contaminants habituels des boues à base d'eau (NaCl, CaSO<sub>4</sub>, ciment, argile, etc).
- Forage à densité faible (<0.88 S.G).
- Meilleur calibrage du trou.
- Meilleure récupération en carottage.

L'avantage des boues a émulsion inversée :

Cette boue présente à peu près les mêmes avantages que la boue à l'huile, puisque l'eau s'y trouve sous forme d'émulsion et n'entre pas en contact en principe avec l'argile.

Ce type de boue s'est révélé moins sensible à un excès d'eau, salissante (nettoyage plus facile), plus économique, principalement utilisées pour le forage des niveaux producteurs, pour les reprises et entretiens des puits productifs ainsi que le forage des argiles gonflantes.

Elles sont aussi utilisées dans les puits profonds posant des problèmes de hautes températures. Enfin il faut signaler que lors des forages dirigés (déviés), elles permettent de réduire les frottements sur les parois du puit et les risques de collage.

Ainsi, elle représente des difficultés pour déceler la présence de formation dans les déblais et le prix de revient général supérieur à celui des boues à l'eau. Les propriétés de ces boues sont facteur de :

- Le ratio « eau/huile »
- Le type d'émulsifiant et sa concentration
- La température et la pression de fond de trou
- La teneur en solides

On a deux types d'huile : huile 'Diesel' et huile minérale.

### I.5.6.2.3 Les boues de réservoir

Ces systèmes de boue sont utilisés dans le forage de la zone productrice (réservoir) et sont conçus pour fournir le plus bas taux de filtration possible dans un ordre minimisé des dégâts de la formation.

### I.5.6.2.4 Les boues airées et à mousse

Dans le cas où les boues de forage citées précédemment ne sont pas appropriées, le choix de la boue à mousse, et boues aérées peut être efficace. Ces fluides peuvent être utilisés pour forer les formations suivantes :

- Formations extrêmement poreuses.
- Formation cavernueuses.

Donc ce type de boue est généralement utilisé dans les zones de pertes.

### I.5.6.3 Principales actions des boues de forages

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

Afin de réunir ces qualités tout en maintenant des prix de revient en rapport avec les problèmes posés, voyons quelles sont les principales fonctions des boues de forages :

#### ➤ Nettoyage des puits

La boue doit débarrasser le trou des formations forées qui se présentent sous forme de déblais. L'aptitude de la boue à entraîner des déblais dépend des variables suivantes : sa rhéologie, sa densité, sa vitesse de circulation dans l'espace annulaire.

#### ➤ Maintien des déblais en suspension

La boue doit non seulement débarrasser le puits des déblais de forage durant les périodes de circulation mais, elle doit également les maintenir en suspension pendant les arrêts de circulation.

#### ➤ Sédimentation des déblais fins en surface

Alors que nous venons de voir que la boue doit permettre le maintien en suspension des déblais dans le puit durant les arrêts de circulation, nous demandons à ce même fluide de laisser sédimenter les déblais fins en surface.

Bien qu'apparemment ces deux aptitudes semblables contradictoires, elles ne sont pas compatibles. En effet dans le cas du maintien en suspension dans le sondage, c'est à tous les déblais et particulièrement aux particules les plus grosses, ceci dans une section réduite, que nous nous intéressons. En surface le problème est différent car c'est une boue débarrassée des déblais éliminés sur les toiles des vibrateurs que nous avons. Le fluide ne conserve donc en suspension que les particules les plus fines et les plus denses qui dans un circuit favorisant la décantation pourront sédimenter, tout au moins partiellement.

## ➤ Refroidissement et lubrification de l'outil et du train de sonde

Durant le forage, des quantités considérables de chaleur sont générées par forces de frottement, dues à la rotation du trépan et du train, cette chaleur ne peut être absorbée totalement par la formation et doit être évacuée par le fluide de forage. Une grande part de cette chaleur est perdue en surface, avec un fluide relativement froid qui est recyclé dans le puit.

## ➤ Dépôt de cake imperméable

La filtration dans les formations perméables d'une partie de la phase liquide de la boue crée un film sur les parois du sondage. Le film est appelé cake, sa formation dépend non seulement de la vitesse de filtration, mais de la distribution, de la compressibilité des particules solides, de la pression différentielle de la filtration et de la température.

Le dépôt du cake permet de consolider et de réduire la perméabilité des parois du puit.

## ➤ Prévention des venues d'eau, de gaz ou d'huile

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

## ➤ Entraînement de l'outil

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

## ➤ Diminution du poids apparent du matériel de sondage

Bien que ce soit beaucoup plus une conséquence d'une fonction, la présence d'une boue d'une certaine densité dans les puits permet de diminuer le poids apparent du matériel de sondage, garnitures de forage et tubages. Ceci permet de réduire la puissance exigée au lavage.

## ➤ Apport des renseignements sur le sondage

L'objectif dans un forage d'un puit est de récupérer le maximum d'informations sur les types de formations traversées, ainsi que les fluides remplissant les pores, ces informations sont obtenues par analyse des déblais, gaz dissous ou l'huile et par la technologie de diagraphies électriques.

## ➤ Corrosion et usure du matériel

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

## ➤ Toxicité et sécurité

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

## I.5.6.4 La concentration de sable

En terminologie boue de forage, on désigne par le sable les particules qui ne passent pas par un tamis de 200 mesh de taylor, c'est-à-dire les particules dont la section est supérieure à 0.074mm.

La présence de sable dans une boue a un effet abrasif sur tout le matériel au contact de la boue :

- Circuit de surface, conduites, vanne.
- Pompes volumétriques et centrifuges.
- Garnitures de forage, tiges,...
- Outils de forage conventionnels, à jet ou diamant.
- Turbine, carrotier.

De plus, une concentration élevée en sable augmente la densité de la boue et peut amener une sédimentation dans les puits pendant les arrêts de circulation. Il est recommandé de maintenir la teneur en sable à moins de 2.6%.

# **Chapitre II**

## **Gisement de MEGHNIA**



## II.1 Situation géographique

L'unité de production de la bentonite est située à l'entrée est de la ville de MAGHNIA à 45Km de TLEMCEN, chef-lieu de wilaya. Le gisement de bentonite en exploitation est situé à HAMMAM Bouhrara, à 15 Km de la ville de MAGHNIA et celui de carbonate de calcium à BENI SAF à 80Km.

Le port d'Oran, deuxième ville du pays est à 160Km au nord Est, et celui de Ghazaouet, à 50Km au nord.

Des lignes aériennes permettent de joindre à partir d'Oran et de Tlemcen, les principales villes du pays et certaines en France et en Espagne.

L'unité de production est mitoyenne de la gare ferroviaire de Maghnia et reliant la ville de Maghnia au port de Ghazaouet, d'Oran et les autres villes.

L'autoroute EST-OUEST passe à proximité de la carrière de HAMMAM Bouhrara et la ville de Maghnia.



Figure .II. 1: Localisation du gisement de MEGHNIA.

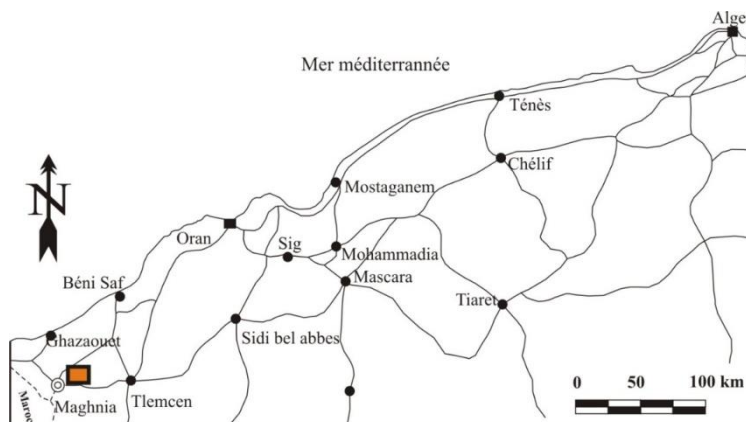


Figure .II. 2: Carte de situation de gisement de bentonites.

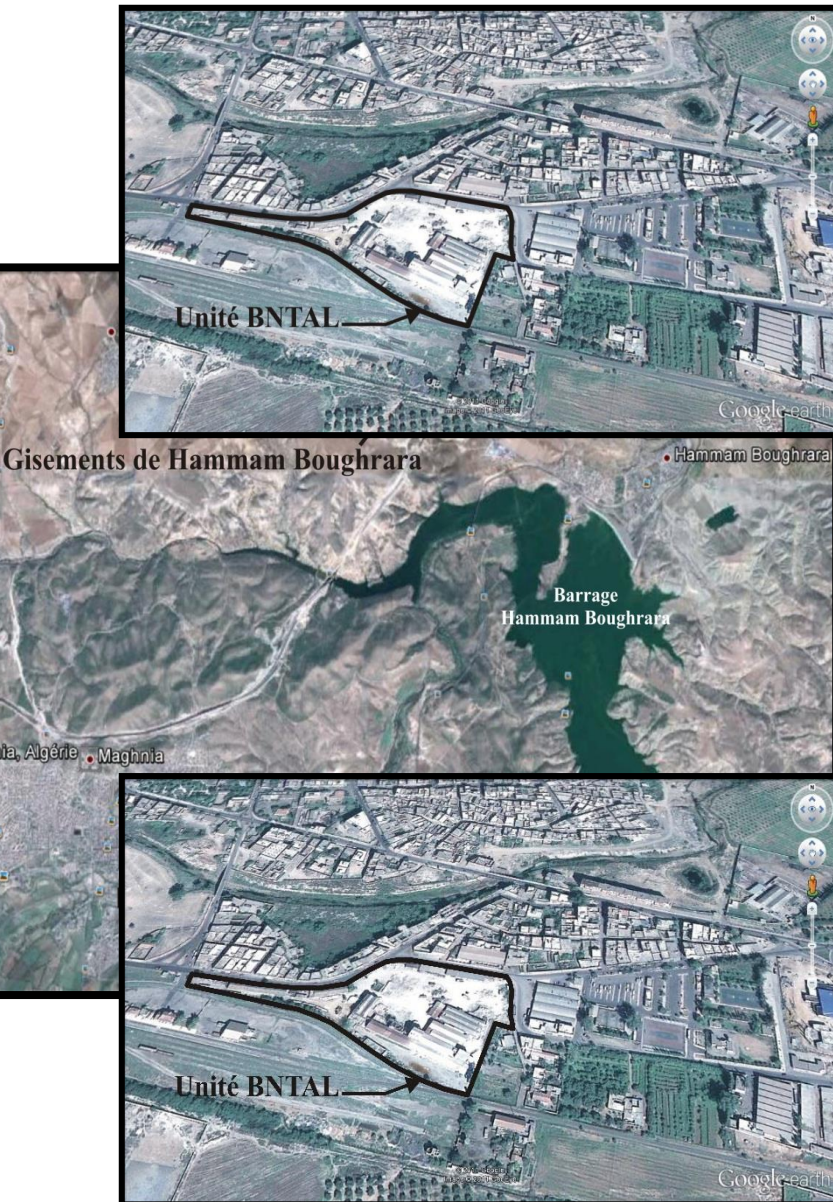


Figure .II. 3: localisation de l'unité de MEGHNIA par rapport au gisement.

- **Situation de l'unité BENTAL par rapport aux gisements**

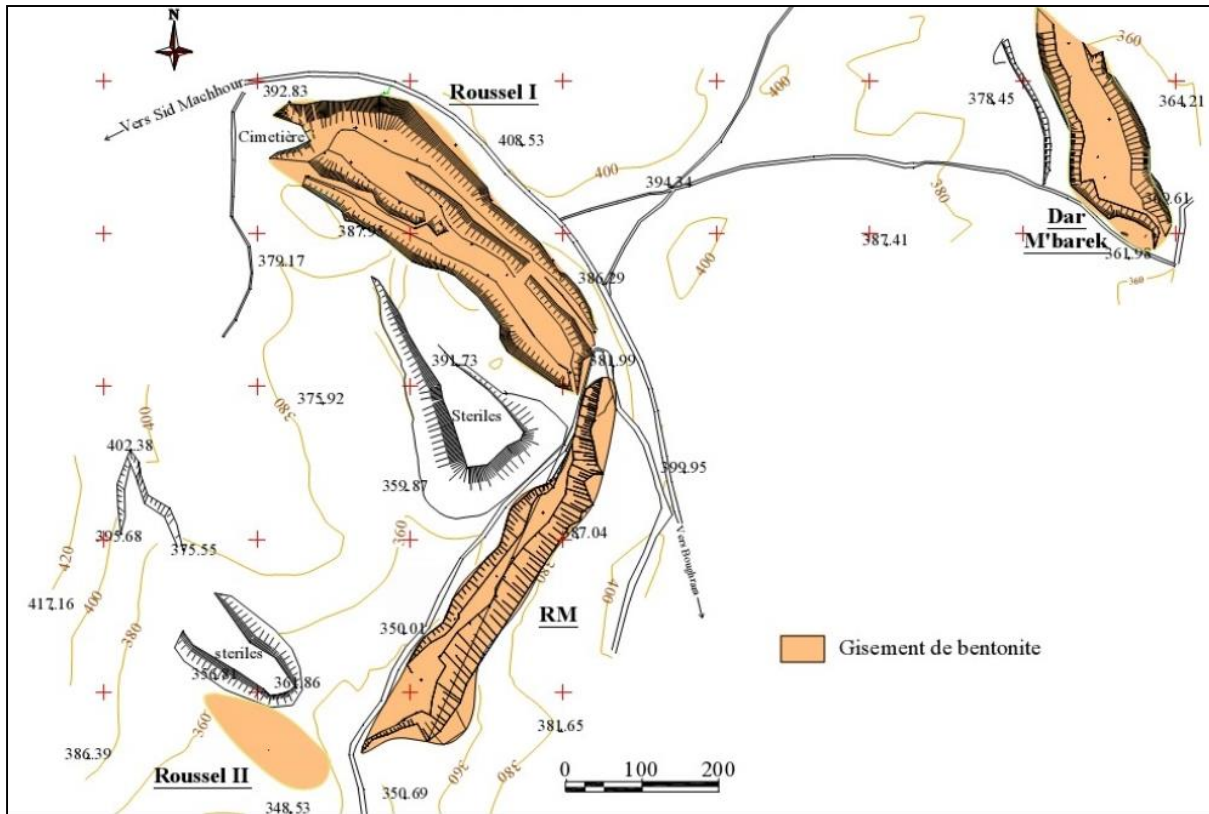
Le gisement qui s'étale sur une superficie de 175Ha Est composé de cinq carrières (Roussel1, Roussel 2, DarM'Barek 1, Dar M'Barek2 et RM).

## II.2 Géologie du gisement

Les argiles bentonitiques sont connues dans la région de Hammam Boughrara depuis le début de 20<sup>ème</sup> siècle. L.Gentil (1903) a communiqué les premières informations sur les argiles bentonitiques de Hammam Boughrara. Dans son mémoire, il a mentionné les types et variétés des argiles et les a attribuées la nomenclature des **smectites**. Plus tard ce sont Millot (1958), Boniface (1959) et G.Sadram (1964) qui se sont penchés sur la géologie de cette région. Dans son ouvrage SADRAN (1958) a interprété en détail le volcanisme de la région, la pétrographie du matériel argileux, la genèse des bentonites et les phénomènes qui l'ont accompagné.

L'exploitation en carrière a débuté dans les années 30. Durant les années 50, l'exploitation artisanale a été menée par des concessionnaires étrangers à l'aide des puits et des galeries. Cette exploitation a ciblé les endroits riches en bentonites de meilleure qualité ; elle fut interrompue pendant la guerre entre 1954 et 1962 pour reprendre dès 1963 par la société CECA Algérie dans les carrières Roussel, RM, Torba.

- **1970** : des travaux de recherches et de prospection sur les argiles bentonitiques de la carrière Roussel et Dar Mbarek ont été menés par des spécialistes Hongrois, par la suite la tâche a été confiée à un groupe de géologues soviétiques.
- **1971 et 1978** : SONAREM a effectué une estimation économique des bentonites de Hammam Boughrara dont 4 gisements de bentonite (Roussel, Bab, Torba, Dar Embarek).
- **1979-1981** : SIDAM (Bureau Canadien) expertise et réévalue les réserves dans le cadre d'une étude de développement de l'industrie algérienne de bentonite, kieselguhr, argiles activées et perlite expansée.
- **1991-1992** : EREM (ALGERIE) évaluation des réserves de Dar Embarek 1 pour une utilisation en fonderie.
- **1994** : SIDAM (Expert conseils) réévalue les réserves de Roussel 1 dans le cadre d'une étude de faisabilité préliminaire et a réalisé des cartes de distribution des paramètres chimique et physique des bentonites de la région de MEGHNIA.
- **2000-2001** : réalisation d'une carte qualité pour la partie en exploitation de la carrière Roussel 1. Cette carte est l'outil principal de la gestion des réserves qui permet d'orienter les tout venants pour la terre décolorante ou pour la bentonite de forage.
- **Janvier 2005** : BENTAL a réalisé le projet de forage par tarière de la carrière Roussel 1.
- **2005** : BENTAL a réalisé Projet de découverte de carrière Roussel 1.
- **2008** : Etude de développement et de faisabilité technique et économique pour la réalisation d'usine de traitement et de production de bentonite (BUMIGEME).



**Figure .II. 4:** Carte de répartition des gisements de bentonites de Hammam Boughrara.

Le district de Hammam Boughrara, sur lequel BENTAL détient les droits d'exploitation, comprend les gisements suivants : Roussel 1, Roussel 2, Bab, Dar Embarek, Torba et RM. Ils sont très favorables pour une exploitation à ciel ouvert. **BENTAL exploite actuellement la carrière de Roussel**, les autres constituent le potentiel de réserves. L'extraction se fait sans recours à l'explosif, par décapage au bulldozer.

Les gisements d'argile bentonitique de Hammam Boughrara sont associés à des volcanites du Miocène supérieur. L'ensemble volcanique est recoupé par des formations rhyolitiques altérées et transformées en argiles bentonitiques

Dans la région du gisement actuellement en exploitation, **Roussel 1**, les terrains sédimentaires du miocène supérieur sont recoupés par des rhyolithes qui forment un massif extrudé à l'aspect d'un dôme dont le diamètre atteint 550 à 600 m.

Les gîtes d'argile bentonitiques forment le contour externe de la principale extrusion de rhyolite et sont le produit de l'altération hydrothermale de roches intrusives et extrusive (tuf, pyroclastique) situés sur le pourtour du dôme.

Les argiles bentonitiques se placent le long du contact externe du massif extrudé et leur extension atteint 500 m.

La largeur des gîtes est de 100 à 120 m pour la partie NW et de 60 à 70 m pour la partie SE du chantier. L'épaisseur de la couche varie de 10 à 40m et diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du contact externe. Le pendage est de 10° à 28° avec une direction NW-SE.

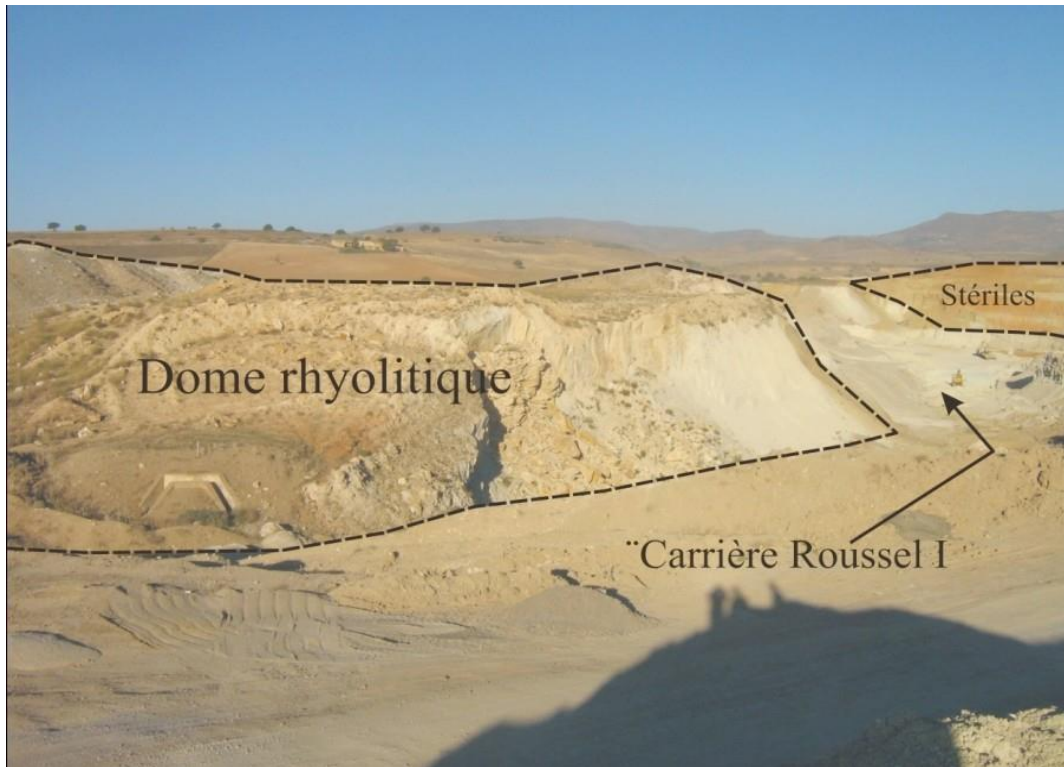


Figure .II. 5: Carrière Roussel 1 (En exploitation).

Tableau .II. 1: Etat des réserves géologiques par catégorie.

Carrières	Réserve /Catégorie			Total
	B	C1	C2	
Dar M'Barek	3 633 771	311 428	607 200	4 552 399
Roussel I	1 560 328	556 444		2 116 772
RM			1 861 228	1 861 228
Roussel II			2 380 048	2 380 048
<i>Total</i>	5 194 099	867 872	4 848 476	10 910 447

### II.3 Méthode d'exploitation

La découverte s'effectue à l'aide d'un bull CATERPILAR D8 de l'unité de Mostaganem.



**Figure .II. 6:** Extraction bentonite et chargement tout-venant (carrière Roussel I).

On remarque ainsi que l'exploitation est mécanique et sans aucune utilisation de tir.

### II.4 Traitement de la bentonite de MEGHNIA

#### II.4.1 La chaîne de production de MEGHNIA

Actuellement l'unité de traitement de Maghnia ne produit que les bentonites, les équipements destinés au traitement de la bentonite se trouvent dans un état moyen. Leur acquisition date de 1982.

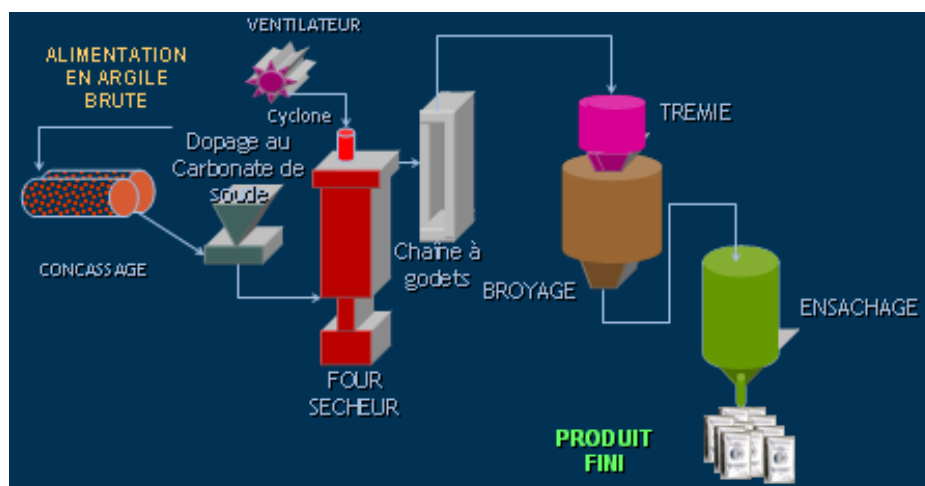


Figure .II. 7: flow sheet de production de l'usine de MEGHNIA.

- DESCRIPTION DE L'INSTALLATION :

Conçue en 1950, l'unité de production de bentonite est en un état moyen malgré les interventions fréquentes pour son amélioration.

Ce flow Sheet représenté est composé des éléments suivants :



Trémie d'alimentation avec alimentateur à vitesse variable

Caractéristiques moteurs	Capacité en T/h	Etat
P=1.5 KW N= 1340 t/min	5	Moyen





## Chapitre II : Gisement de MEGHNIA [2014/2015]

### Transporteur à bande

Caractéristiques moteur	Capacité en T/h	Etat
P= 7.5 KW N= 1435 t/min	5	Moyen

Concasseur à 02 cylindres de diamètres différents dont l'un est équipé de couteaux.

Caractéristiques moteurs	Capacité en T/h	Etat
P=18 KW N= 1500t t/min	5	Année 1983 (moyen)





Transporteur à bande permettant le transfert de l'argile concassé vers le malaxeur

Caractéristiques moteur	Capacité en T/h	Etat
P= 7.5 KW N= 1454t/min	5	Moyen



Un système de dosage de carbonate:

Caractéristiques moteurs	Capacité en T/h	Etat
P= 0.25 KW N= 1380 t/min	Non identifier	Moyen



Un malaxeur à vis

Caractéristiques de moteur	Capacité en T/h	Etat
P= 18.5 KW N= 1500 t/min	Non identifier	Moyen



Un convoyeur à bande permettant le transfert de la bentonite vers le séchoir

Caractéristiques moteurs	Capacité en T/h	Etat
P= 18.5 KW N= 1455 t/min	5	Moyen



Séchoir rotatif composé de trois parties : chambre de combustion, virole et décharge de minerais



Chambre de combustion



Virole



Décharge

### Caractéristiques

Capacité de traiter 5 T/h de bentonite brute ayant une teneur en eau de **20%** au maximum à ramener à **2%**.

Granulométrie : 0-15mm.

Débit : 5 T/h en produit humide.

Humidité initiale max : 20%

Humidité finale : 1% à 2%.

Température entrée des fumées = 700 à 720 °C.

Température sortie des gaz = 110 à 120 °C.

Température de sortie produit = 70 à 80 °C

Eau à évaporer par heure = 900kg

Durée de séjour : 10 à 12 min (vitesse rotation = 4 tr/min)

Système d'extraction des gaz humides et récupération des fines vers l'élévateur à godets :



Cyclone.  
Ventilateur et cyclone.

Ventilateur.



Caractéristiques	moteurs	Capacité en T/h	Etat
P= 7.5 KW	N = 1500 t/min	Non identifier	Année 1982 (moyen)



Silo tampon pour stockage de tout venant dopé et séché.



Distributeur asservi qui règle le débit d'alimentation de broyeur.



Broyeur pendulaire équipé de trois pendules avec socs et un système de lubrification.

## Chapitre II : Gisement de MEGHNIA [2014/2015]

Caractéristiques moteurs	Capacité en T/h	Etat
P= 90 KW N = 1500 t/min	Capacité de traiter 3T/h dont 10% de refus au tamis Module 20 (ouverture 80 microns) suivant la norme AFNOR XII-501	Année 1982



Un ventilateur principal de broyeur.





Un cyclone servant également de silo de récupération de matière première broyée.



Une ensacheuse directement connectée sous ce cyclone : L'écoulement de la poudre se fait par injection d'air produit par un compresseur gonfleur.

#### II.4.2 La méthode d'activation et de traitement adopté

Le principe de fonctionnement de l'installation est le suivant :

L'argile bentonitique après concassage dans le concasseur à cylindres est mélangée avec le carbonate de soude (3%) par l'intermédiaire du malaxeur à vis. Le mélange est introduit dans le séchoir qui a pour but de sécher le mélange mais également de permettre à la réaction entre la bentonite et le carbonate de soude d'être complètement réalisée.

A la sortie du séchoir, la bentonite est introduite dans la boucle de broyage qui va broyer le produit à une granulométrie  $97,5\% < 75\mu\text{m}$ , cette boucle doit être mise en dépression afin d'éviter toute fuite de produit. Une fraction fine du produit  $< 2\mu\text{m}$  est évacuée vers le cyclone des fines. La poudre sera ensachée dans des sacs ou big bags selon la commande du client.

Les mêmes étapes sont applicables pour toutes les catégories de bentonite sauf pour la bentonite de charge qui est **un produit non activé**.

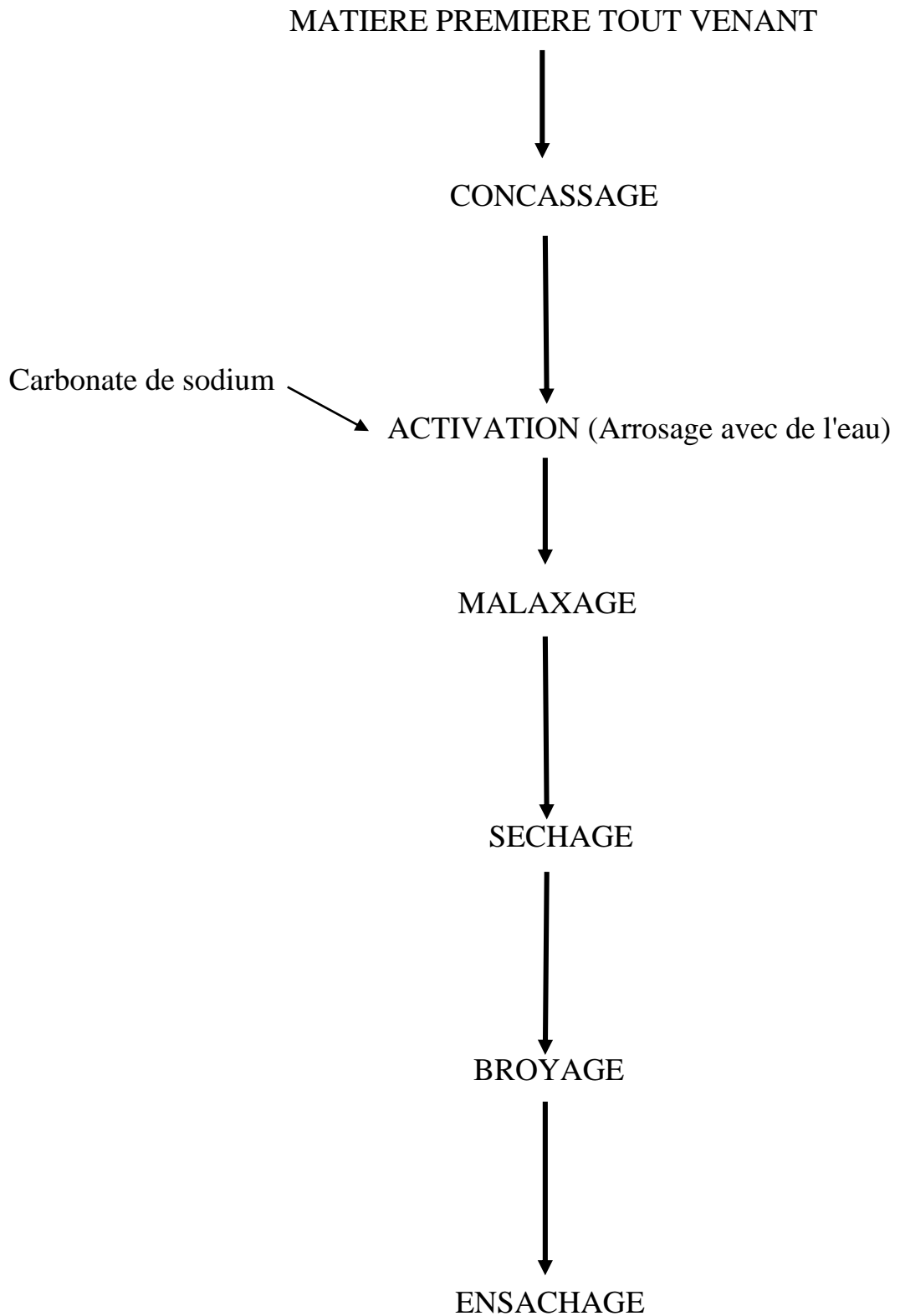


Figure .II. 8: Description du procédé du traitement.

Les stades de traitement des bentonites sont comme suit :

- Alimentation
- Concassage
- Activation au carbonate de soude
- Séchage.
- Broyage et conditionnement.

### STADE 1 Transport et stockage de matières premières

Le tout venant est transporté par camions de la carrière de hammam Bouhrara vers l'unité qui se situe à 10 Km environ.



Stockage de matière première



Gerbage de matière première

### STADE 2 Alimentation et concassage



Alimentation



Concassage

Une pelle chargeuse sur roues alimente la trémie et un alimentateur transfère le TV non pesé sur un transporteur à bande qui alimente le concasseur qui a pour rôle de réduire les dimensions des particules à une granulométrie moins de 50mm. Un deuxième convoyeur à bande transporte le TV vers le système d'activation.

### STADE 3 Activation



Doseur



Malaxeur

Il est composé d'un doseur de carbonate de soude avec vibreur pour faciliter l'écoulement de réactif. Le mélange de TV bentonite et carbonate de soude (2 à 3%) se fait par une vis sans fin en présence d'eau pour faciliter la dissolution de carbonate et augmenter la réactivité (accélérer l'activation). A la sortie de la vis sans fin la bentonite activée est déversée dans un transporteur à bande qui alimente le séchoir.

### STADE 4 Séchage

Il s'effectue dans un four sécheur rotatif à écoulement parallèle (le TV et l'air chaud ont même sens d'écoulement). Le séchoir est composé de trois parties : La chambre de combustion, virole et décharge de TV séché. Un ventilateur aspirant est installé à la sortie de séchoir pour aspirer les gaz chauds ensuite créer une dépression dans la virole (réaliser un séchage plus ou moins homogène). Les poussières sont captés par un cyclone et dirigés vers la trémie d'alimentation de broyeur par l'intermédiaire d'un élévateur à godets.



Séchoir

### STADE 5 Broyage

Le broyeur à pendules est composé d'un broyeur de marque SOUDRON SACRE type BP10 à trois pendules, cyclone et silo de récupération des particules fines. Le broyage a pour rôle de réduire les particules de bentonite selon la granulométrie désirée.



Broyeur

### STADE 6 Ensachage

La bentonite broyée est stockée dans un silo de stockage de produit fini. L'écoulement de la poudre se fait par injection d'air (compresseur gonfleur) L'ensachage se fait dans des sacs de 50Kg et dans des big bag de 1.250 T selon la commande des clients.



Ensachage



Stockage

### II.5 Les différents produits de l'unité de MEGHNIA :

Le gisement d'argile bentonitiques de Maghnia est en activité depuis plus de 50ans. Après traitement chimiques, les produits du gisement de Maghnia répondent à la production de :

- Bentonites de forage.
- Bentonite de charge industrielle.
- Terres décolorantes.
- Bentonite de fonderies.

Les autres utilisations, après traitement mécanique seulement, sont diverses, entre autre : engrais, pesticides, génie civil, céramique.

### II.6 Stock tout-venant bentonite :

Au niveau de la carrière en dispose d'un stock de tout-venant de 13 000 tonnes, qui est suffisant pour alimenter l'usine pour une durée de 6 mois (pour faire face aux intempéries).



**Figure .II. 9:** Stock tout venant bentonite u niveau de l'unité de production.

### II.7 Stock de produits finis



**Figure .II. 10:** Stock tout venant bentonite u niveau de l'unité de production.

# **Chapitre III**

## **Rhéologie des fluides**



## III.1 Rhéologie

La rhéologie est la science des déformations et écoulements de la matière, des contraintes qui en résultent et des efforts qu'il faut appliquer pour les obtenir [1]. L'objet de la rhéologie est de déterminer les contraintes et les déformations en chaque point d'un milieu [2].

Son domaine d'application couvre l'ensemble des fluides complexes, tels que les polymères, les suspensions colloïdales, les émulsions et les tensioactifs. Il est nécessaire de connaître le comportement de ces matières pour leur mise en œuvre.

Rhéologie (en grec  $\rho\epsilon\omega$ , signifiant écoulement), mot créé aux États-Unis en 1929 par Eugène Cook Bingham (1878-1945), qui désigne l'étude de l'écoulement et la déformation des matériaux (fluides) sous l'action des contraintes qui leurs sont appliquées.

La rhéologie regroupe l'étude d'une gamme non négligeable des matériaux et produits, à titre d'exemple, on cite les produits agro-alimentaire, cosmétiques et pharmaceutiques, boues de forage, pâtes de papier ...etc.

## III.2 But de la rhéologie

L'objet de la rhéologie est de déterminer l'équation rhéologique d'état d'un fluide par la mesure des paramètres rhéologique en effectuant des mesures relatives des forces et des déplacements et en exploitant ces résultats à l'aide des équations de mouvements.

L'équation rhéologique d'état est la relation entre la vitesse de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ) et la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ), qui représente,  $\tau = f(\dot{\gamma})$ . La connaissance de cette équation détermine les propriétés rhéologiques des matériaux qui sont déterminée expérimentalement à l'aide des viscosimètres ou des rhéomètres.

### III.2.1 Grandeurs fondamentales de la rhéologie [21]

#### III.2.1.1 Vitesse de cisaillement

La vitesse de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ) (appelée aussi gradient de vitesse) est le rapport entre la vitesse d'écoulement et l'épaisseur du fluide qui est donnée la relation suivante  $\dot{\gamma} = v/H$ , Unité de ( $\dot{\gamma}$ ) 1/seconde ( $s^{-1}$ ).

#### III.2.1.2 Contrainte de cisaillement ( $\tau$ )

La contrainte de cisaillement est la grandeur dynamique fondamentale de la rhéologie, considérons deux couches au contact l'une de l'autre, elles se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre, il en résulte l'apparition de forces de frottement qui s'exercent tangentiellement à la surface de la couche ce sont les forces de cisaillement.

Ces forces dépendent de la surface considérée, on est amené à définir la contrainte de cisaillement par :  $\tau = F/S$

Unité de ( $\tau$ ) : Newton/mètre carré ( $N/m^2$ ) ou bien le Pascal (Pa), d'où  $1N/m^2=1Pa$ .

La contrainte de cisaillement est une grandeur définie en tout point du matériau, elle varie en général d'une couche à l'autre mais est constante en tout point de la même couche.

## III.2.1.3 Viscosité

C'est une propriété physique des fluides, elle s'exprime par l'effet de retard entre deux couches adjacentes d'un même fluide pendant son écoulement, la viscosité représente donc la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle. La connaissance de cette grandeur physique est une chose primordiale dans l'étude rhéologique d'un fluide. Il existe différents types de viscosité, parmi lesquelles on cite :

### ➤ Viscosité dynamique (apparente) ( $\eta$ )

Elle est donnée par la relation suivante (cas des fluides Newtoniens)  $\eta = \tau / \dot{\gamma}$   
Unité de ( $\eta$ ) dans le :

- Système international Pa·s ou Poiseuille (Symbole ; Pl), où 1Pa·s = 1Pl.
- Système CGS Poise (Symbole ; Po), c'est l'unité usuelle, où 1Po = 10<sup>-1</sup> Pl.

**Remarque :** La viscosité apparente pour les fluides non-newtoniens, ils ne sont pas caractérisés par une seule viscosité pour n'importe quelle vitesse de cisaillement. C'est pourquoi on fait appel à la viscosité apparente, qui est défini comme étant la viscosité du fluide à un point de cisaillement donné.

### ➤ Viscosité cinématique ( $\nu$ )

La viscosité cinématique présente un intérêt dès que la viscosité dépend de la densité (telle que les huiles),  $\nu = \eta/\rho$ , où  $\rho$  est la masse volumique du fluide en kg/m<sup>3</sup>.  
Unité de ( $\nu$ ) :

- Système international m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup> (ou c'est Pa·s·kg<sup>-1</sup>·m<sup>3</sup>) ;
- Système CGS Stokes (Symbole Stokes), c'est l'unité usuelle, où 1stoke = 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>, dont son sous-multiple est le Centistokes, cette dernière unité est très pratique pour les fluides de viscosité proches de l'eau qui a une viscosité 1 centistoke.

## III.2.2 Rhéogramme

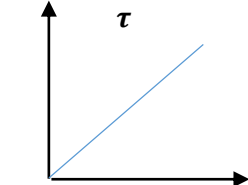
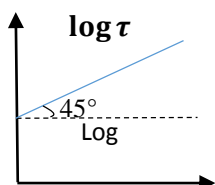
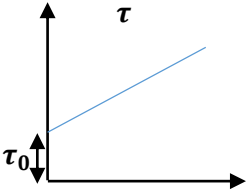
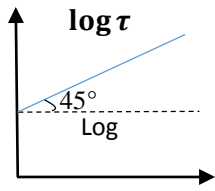
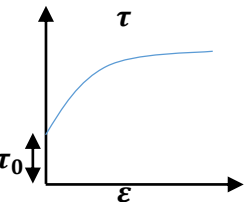
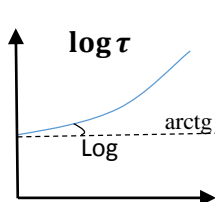
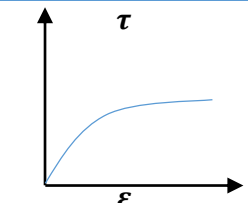
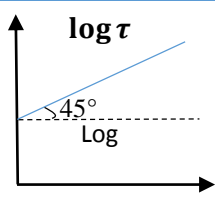
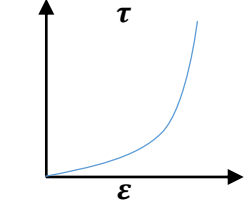
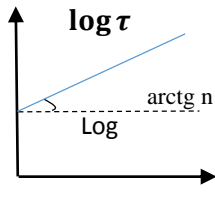
Pour visualiser graphiquement l'équation rhéologique d'état  $\tau = f(\dot{\gamma})$ , on trace son allure qu'on appelle 'Rhéogramme', qui sert à décrire les propriétés d'écoulement du matériau.

Les Rhéogrammes les plus fréquemment utilisés sont Les graphes ;  $\tau = f(\dot{\gamma})$ , à pression et température extérieures constantes, qui est la représentation la plus utilisée et même on peut trouver la représentation réciproque  $\dot{\gamma} = f(\tau)$ .

III.2.3 Modèles rhéologiques [23], [08]

Du point de vue rhéologique, les fluides se composent en deux grandes catégories. Les fluides Newtoniens dit aussi parfaitement visqueux et les fluides non-newtoniens.

Tableau. III. 1: Récapitulation des modèles rhéologiques.

Modèle Rhéologique		Equation Rhéologique	Rhéogramme en coordonnées cartésienne	Rhéogramme en coordonnées logarithmique
<b>FLUIDES NEWTONIENS</b>				
Newton		=		
<b>FLUIDES NON-NEWTONIENS</b>				
Bingham		$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$ 'si $\dot{\gamma} > 0$ '=0 <		
HERSCHELBULKLEY		$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n$		
Ostwald	Pseudo-Plastique	$\tau = k \dot{\gamma}^n$ $0 < n < 1$		
	Dilatants	$\tau = k \dot{\gamma}^n$ $n > 1$		

III.2.3.1. Fluides Newtoniens

Un fluide est dit Newtonien (ou fluide parfait), si sa viscosité ( $\eta$ ) est constante quel que soit le gradient de vitesse à T et P fixés, en plus de sa elle est indépendante du temps, dans ce cas on parle de la viscosité absolue.

Les fluides Newtoniens sont caractérisés par un modèle linéaire et leur comportement rhéologique est proportionnel à la viscosité absolue ( $\eta$ ), où la tension de cisaillement ( $\tau$ ) est directement proportionnelle à la vitesse de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ) si l'un double l'autre double également l'équation rhéologique d'état est donnée par la relation suivante :  $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$ .

### III.2.3.2 Fluides Non Newtoniens

Dans ce cas la viscosité ( $\eta$ ) n'est pas constante, à chaque valeur du couple vitesse et contrainte de cisaillement ( $\dot{\gamma}$ ,  $\tau$ ) correspond une valeur de la viscosité ( $\eta$ ), dès lors on parle de la viscosité apparente. Les fluides non-Newtoniens sont des fluides complexes comme les fluides, agro-alimentaires, les polymères, les boues de forage et les laitiers de ciment...etc. Pour ce type de comportement on distingue, les plus fréquents, les fluides à contraintes critiques avec fluides de type BINGHAM et fluides de type HERSCHEL-BULKLEY, et les fluides sans contraintes critiques avec fluides de type pseudo-plastiques D'OSTWALD-DE WAELE (loi de puissance).

Les modèles rhéologiques cités ci-dessus ne sont pas les seuls existant, on a aussi comme fluides à contrainte critique, indépendamment du temps, tels que les modèles de SKELLAND, CROWLEY KITZES...

#### a. Fluides à contraintes à seuil (fluides plastiques)

Ils sont caractérisés par une contrainte de cisaillement seuil ( $\tau_c$ ) en dessous de laquelle l'écoulement n'est pas possible, autrement dit lorsqu'ils sont soumis à une contrainte très faible, leur viscosité est tellement forte qu'il ne peut pas s'écouler, leur viscosité diminue ensuite si une contrainte supérieure au seuil est appliquée.

L'équation rhéologique qui correspond à ce type de fluides est donnée comme suite :

$$\tau = \tau_c + K \cdot \dot{\gamma}^n$$

Avec :

$\tau_c$  : Contrainte critique

K : Paramètre lié pour chaque type de fluide

n : Indice d'écoulement

Selon l'indice d'écoulement (n), on distingue les fluides suivants :

#### ➤ Fluides de BINGHAM

Pour les liquides du type BINGHAM autrement dit, liquides plastiques idéal, la tension de cisaillement varie linéairement avec la vitesse de cisaillement mais, à la différence des fluides newtoniens, il est nécessaire d'appliquer une force minimale pour mettre le fluide en mouvement, cette force correspond à la tension limite (critique) de cisaillement ( $\tau_c$ ).

L'équation rhéologique d'état de ce modèle est caractérisée par deux constantes ( $\tau_c$ ,  $\eta_p$ )

$$\tau = \tau_c + \eta_p \cdot \dot{\gamma}$$

Avec :

$\tau_c$ : Contrainte critique.

$\eta_p$ : Viscosité plastique déduite à partir de la pente de la courbe représentant ( $\tau$ ) en fonction de ( $\dot{\gamma}$ ).

Ce type de modèle suit un modèle linéaire c'est-à-dire que le fluide s'écoule au-delà d'une contrainte seuil ( $\tau_c$ ), en suite il suit l'allure de Newton.

### ➤ Fluides de **HERSCHEL-BULKLEY**

Les fluides où  $n > 1$  sont plus compliqués et peuvent être décrits à l'aide de trois paramètres rhéologiques, la contrainte seuil ( $\tau_c$ ), la consistance ( $K$ ) et l'indice d'écoulement ( $n$ ), leur fluage est représenté par l'équation rhéologique suivante :

$$\tau = \tau_c + K \cdot \dot{\gamma}^n$$

On constate que le Rhéogramme concernant ce modèle aura une allure parabolique.

La contrainte  $\tau_c$  est déterminée expérimentalement à partir de la courbe d'écoulement, tandis que les paramètres  $K$  et  $n$  ne sont pas vraiment constantes sur un très long intervalle de valeurs de  $\tau$  et  $\dot{\gamma}$

Les fluides plastiques sont les plus répandus dans l'industrie tels que : certaines boues (boues de forage), certaines pâtes (dentifrice, pain), matières grasses et peintures.

### **b. Fluides sans contraintes critiques [8]**

Ces substances ont un comportement rhéologique qui diffère essentiellement de celui des fluides plastiques car, ils n'ont pas de seuil d'écoulement, du fait que ces fluides se mettent en mouvement dès qu'on leur applique une force de cisaillement aussi faible soit-elle.

### ➤ **OSTWALD**

A proposé pour représenter les courbes d'écoulement de ces fluides, dont la contrainte de cisaillement est proportionnelle à la puissance nième de la vitesse de cisaillement, l'équation rhéologique d'état correspondante dite aussi la loi de puissance est décrite comme suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \\ 0 < n < 1 \end{array} \right.$$

La représentation de ces corps dans un Rhéogramme, est une courbe de fluage qui passe par l'origine, comme pour les fluides newtoniens.

$K$  : Coefficient de rigidité qui caractérise la consistance de la suspension ;

$n$  : Indice de comportement rhéologique (ou indice écoulement).

### ➤ **La loi de puissance**

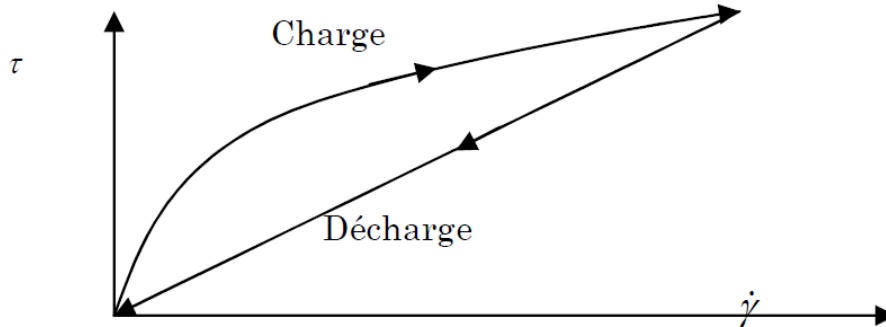
Est la plus utilisée, mais il existe d'autres modèles de fluides sans contraintes critiques et indépendants du temps, on peut citer: les **modèles d'ELLIS, PRANDTL-EYRING, SSKO, CROSS, WILLIAMS, CARREAU...**, qui sont des modèles très complexes de trois à quatre paramètres.

### **III.2.4 Thixotropie [08]**

Souvent le comportement des fluides non newtoniens dépend du temps car les modifications de structures microscopiques ne sont pas instantanées, on a ainsi des manifestations diverses de ces phénomènes dans les tracés de rhéogrammes.

Le terme « thixotropie fut introduit dans la littérature par FREUNDLICH, en 1928. Une solidification peut apparaître répétitivement à une température constante et à une vitesse de cisaillement constante. En pratique nous pouvons mettre en évidence la thixotropie du fluide par l'essai d'une boucle d'hystérésis.

On trace un Rhéogramme  $\tau=f(\dot{\gamma})$  en faisant croître puis décroître régulièrement  $\dot{\gamma}$ , afin de revenir à la valeur initiale, on réalise ce qu'on appelle une "charge" puis une "décharge". Si on applique des valeurs de vitesse de cisaillement assez fortes pendant assez longtemps, on obtient le diagramme suivant :

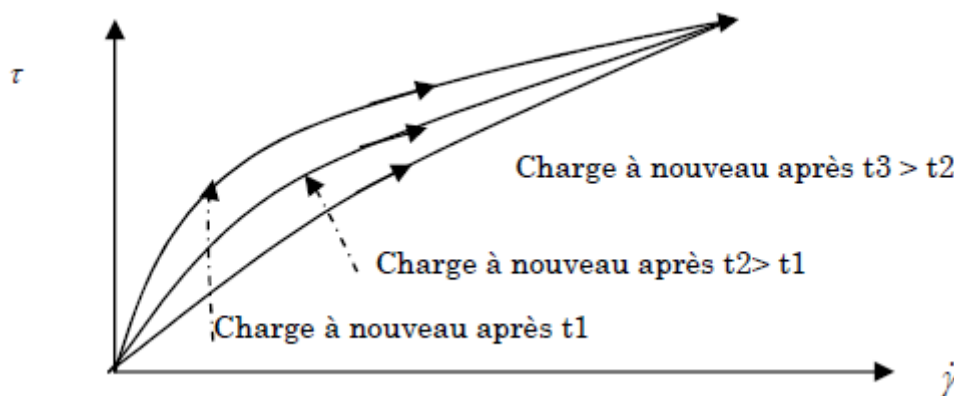


**Figure .III. 1:** Rhéogramme d'un fluide thixotrope.

La structure a été modifiée durablement lors de la charge et le comportement du produit est affecté (Rhéogramme de décharge différent, liquide globalement moins visqueux).

**Exemple :** Le phénomène d'hystérésis

Pour certains corps, si après ce cycle de charge et décharge, on laisse au repos pendant un temps assez long, la structure se réorganise et si on recommence une charge, on obtient le premier Rhéogramme à nouveau. Ainsi, sur les expériences suivantes, on voit que si le temps de repos est supérieur ou égal à  $t_3$  on a retrouvé le comportement rhéologique du produit avant toute charge. On dit alors que le fluide est thixotrope.



**Figure .III. 2:** Thixotropie en fonction de temps de repos.

Un fluide est thixotrope si sa viscosité à vitesse de cisaillement constante, diminue au cours du temps à condition que ce phénomène soit réversible, le comportement thixotrope concerne les corps fluidifiants et les corps plastiques (plus rarement les épaississants).

Pour les corps plastiques, on peut avoir au cours de la modification de structure, un changement de contrainte seuil ou pas.

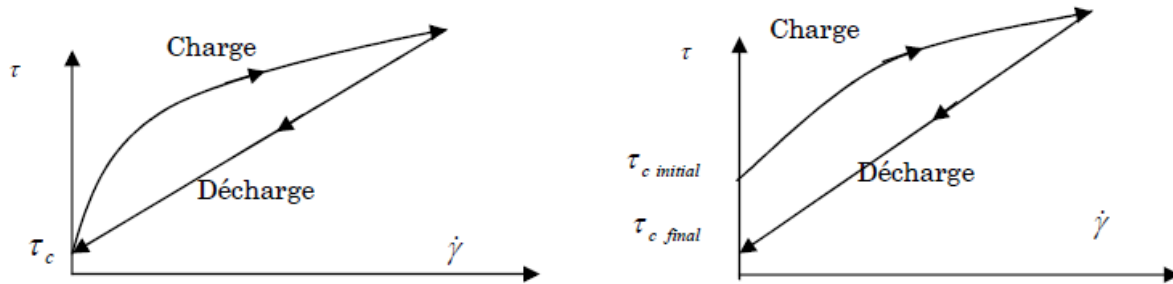


Figure .III. 3: Effet de la modification de structure.

### III.3 Caractérisation rhéologique du système eau-bentonite

De nombreux travaux ont été conduits sur le comportement de suspensions de bentonite lors de l'écoulement [Mollet (1996) ; Besq (2000) ; Leyama (2001) ; Corvisier (2001)]. Dans cette partie, on montre que le comportement rhéologique de ces fluides est très complexe. Nous présentons ici : une synthèse bibliographique du comportement d'écoulement, et thixotrope de bentonite, puis nous exposons les facteurs influençant la rhéologie de ces complexes. [01].

#### III.3.1 Comportement d'écoulement

La concentration en bentonite et les structures adoptées par les feuillets sont les paramètres influençant les propriétés rhéologiques des suspensions aqueuses de bentonite. Lorsque la concentration est faible, on parle d'un état dispersé. Dans ce cas, la suspension adopte un comportement rhéologique proche du milieu dispersant, c'est-à-dire un comportement de type newtonien [Luckham et Rossi (1999)]. Dans la littérature, et pour des suspensions très diluées, ou des fluides de forage qui contiennent des polymères, le comportement rhéologique peut aussi être décrit par une loi de puissance (fluide d'Ostwald-de Waele) [Metzner (1956)]. Lorsque l'on ajoute davantage d'argile à la suspension (généralement à des concentrations massique de bentonite dépassant 3%), on parle de suspensions fortement concentrées [Darley et Gray (1988)]. Dans ce cas, l'étude de la structure tridimensionnelle de type gel est la plus probable [Durán et al. (2000)]. Cela est vrai pour des pH élevés où la suspension est qualifiée à "seuil". Ce comportement se manifeste par le fait qu'il faille casser la structure gel avant de passer à l'étape d'écoulement [Luckham et Rossi (1999)]. Traditionnellement, on représente un tel comportement par le modèle de Bingham (1922). D'autres modèles ont été considérés pour la description du comportement des suspensions argileuses comme le modèle de Herschel-Bulkley (1926) ou celui de Casson (1959).

Speers et al. (1988) ont présenté une évaluation des propriétés rhéologiques d'un ensemble de suspensions commerciales de bentonite. Les essais rhéologiques ont été effectués pour des taux de cisaillement de 5,11 à 10,22 s<sup>-1</sup> à des concentrations massiques de 1,5 à 7% de bentonite. Les auteurs ont testé la loi de puissance d'Ostwald-de Waele, le modèle de Bingham et le modèle de Casson pour reproduire l'écoulement de leurs suspensions. Ces essais ont permis de classer les paramètres de ces trois modèles en deux groupes. Le premier groupe est propre aux petits cisaillements, les paramètres de base sont : la contrainte seuil (de Bingham ou de Casson) et la consistance de Casson. Le deuxième groupe est propre aux grands cisaillements où la viscosité plastique de Bingham, l'indice d'écoulement et la

viscosité de Casson reflètent plus le comportement d'écoulement. Récemment, Gareche et al. (2003) ont réalisé une étude comparative entre les modèles classiques et structuraux appliqués à une bentonite naturelle en suspension (fluide de forage).

Ces auteurs ont estimé que le fait de considérer la suspension de bentonite comme un fluide plastique n'est qu'une simplification qui, dans certains cas, entraîne des erreurs importantes. D'abord, ils utilisent les modèles de Herschel-Bulkley (1926) et de Casson (1959) pour représenter le comportement de leurs suspensions. Ils présentent par la suite la loi de Papanastasiou [Papanastasiou (1987)] ; comme un modèle classique plus général, puisqu'il est capable de reproduire les rhéogrammes sur une gamme de vitesse de cisaillement plus étendue.

On peut en conclure qu'avant d'atteindre la contrainte seuil, le comportement des suspensions de bentonite est considéré comme élastique. Dès que l'écoulement commence, on parle d'un fluide visqueux non-newtonien.

### III.3.2 Thixotropie

Lorsque l'on applique un taux de cisaillement constant ou une contrainte constante à un fluide, il peut arriver que sa viscosité ne soit pas constante au cours du temps. Si la viscosité diminue au cours du temps à taux de cisaillement constant, on dit que le fluide est thixotrope ; si elle augmente, le fluide est anti-thixotrope Mewis (1979) [Mewis (1979), Cheng (1987), Barnes (1997) ; Dullaert et Mewis (2005)]. D'après Mewis (1979), le terme de thixotropie a été initialement introduit par Schalek et Szegraný en 1923, alors qu'ils observaient des solutions d'oxydes de fer, pour caractériser les transitions solides-liquides induites par le cisaillement. Ce comportement s'explique par la rupture des liaisons entre les amas de particules lorsque les forces hydrodynamiques deviennent supérieures aux forces de cohésion des amas. Ces derniers, une fois rompus, "glissent" les uns contre les autres et induisent une baisse de viscosité.

En général, ce phénomène est mis en évidence par l'apparition d'une boucle d'hystérésis lors du tracé de la courbe d'écoulement en charge puis en décharge. On parle de comportement thixotrope lorsque la contrainte en décharge est plus faible que celle en charge pour un même taux de cisaillement. La courbe d'hystérésis a été tracée en suivant trois étapes : une montée, un palier et une descente de contrainte. Pour expliquer ce comportement dans les suspensions argileuses, il faut s'intéresser de près à la nature rhéofluidifiante du système. Généralement, ce comportement est attribué à la rupture progressive de la structure établie par les particules de bentonite aux taux de cisaillement croissants. La rupture d'un réseau physique tridimensionnel se fait en entités de plus en plus petites. Cette rupture diminue progressivement la quantité d'eau piégée par le réseau et, par conséquent, la viscosité apparente de la suspension diminue aussi. La reconstruction de ce réseau, c'est à dire le retour des particules à des positions de minimum d'énergie libre, se fait progressivement au cours du temps sous l'action du mouvement brownien. Lors de la décharge progressive, les contraintes mesurées sont plus faibles si les interactions détruites n'ont pas eu le temps de se rétablir [Callaghan et Ottewill (1974)]. [01]

D'autre part, Lagaly (1989) observe également un comportement antithixotrope à de faibles taux de cisaillement pour des suspensions de bentonite. D'après cet auteur, les faibles taux de cisaillement aident à la restructuration du réseau de charges sans toutefois présenter de mécanisme responsable de cette restructuration. Il est à noter que ce même comportement est, pratiquement, toujours vérifiable si on réalise des essais sur des suspensions déstructurées à faible taux de cisaillement.



### III.3.3 Contrainte seuil

Si la suspension colloïdale est concentrée, un réseau d'interaction fort peut alors exister à travers l'ensemble de la suspension et les forces électrostatiques peuvent devenir considérables. Pour provoquer l'écoulement de la suspension, il faut briser ce réseau : il y a existence d'un "seuil d'écoulement". Comme la suspension concentrée est le siège d'une compétition entre les mouvements browniens et les forces colloïdales, le seuil d'écoulement ne sera résistant que si les effets de l'agitation thermique deviennent négligeables [Leyama (2001)]. Pour quelques auteurs, le "vrai seuil d'écoulement" est très controversé [Barnes (1999)], même si cette notion est toujours utilisée et reste un élément de base pour les raisonnements concernant les matériaux dits "à seuil".

Dans le cas des suspensions argileuses, la contrainte seuil est toujours liée à la formation de l'état gel résultant des différents types d'associations entre particules [Khandal et Tadros (1988) ; Lagaly (1989) ; Tadros et Hopkinson (1990)]. Ramos-Tejada et al. (2001) ont étudié les propriétés rhéologiques de montmorillonite de sodium. Ils ont défini la contrainte seuil comme étant la contrainte minimale qu'il faut appliquer pour que la suspension commence à s'écouler d'une manière clairement observée. Leurs rhéogrammes, à différentes concentrations de montmorillonite sodique, ont été corrélés en utilisant le modèle de Bingham.

Dans ce cas, la contrainte seuil est la projection de la courbe d'écoulement sur l'axe des contraintes. Par ailleurs, ce minimum de contrainte, qu'on doit appliquer pour assurer l'écoulement, est attribué par Lagaly (1989) au passage d'une structure de type château de cartes à une structure de type modèle de bandes. Le gel dû aux interactions bord-face est renforcé par la diminution du pH qui accentue la différence de potentiel entre les bords et les faces des feuillettes [Khandal et Tadros (1988)]. De Kretser et al. (1998) qui réfutent l'existence d'organisations préférentielles bord-face, observent des variations de la contrainte seuil en faisant varier la force ionique de la solution. Ils attribuent l'augmentation progressive de la contrainte seuil à la force ionique croissante et à la diminution de l'épaisseur de la double couche électrique. Ceci entraîne la floculation de la suspension pour des distances interparticulaires de plus en plus faibles (correspondant au minimum secondaire du potentiel d'interaction décrit par la théorie DLVO).

Ces observations sont en accord avec les conclusions de Vali et Bachmann (1988) pour qui le gel dû aux interactions face-face est renforcé par tous les paramètres favorisant la contraction des doubles couches électriques, augmentant ainsi l'épaisseur des particules et ce, tant que le nombre d'unités structurales est suffisant pour obtenir un réseau tridimensionnel. Pour des forces ioniques plus importantes, De Kretser et al. (1998) observent une diminution de la contrainte seuil qu'ils attribuent à la coagulation de la suspension (due à la disparition du maximum primaire) qui entraîne une diminution du nombre de liens entre particules.

### III.3.4 Facteurs d'influençant sur la rhéologie des suspensions

Tous les paramètres clés permettant de définir le comportement rhéologique des suspensions de bentonite, à savoir la valeur de la contrainte seuil, l'amplitude de la thixotropie et la viscosité apparente, dépendent des interactions entre les particules d'argile aux différentes échelles dans la suspension.

Les propriétés rhéologiques seront donc affectées par tous les paramètres pouvant modifier cet équilibre. Nous pouvons les résumer en : pH de la suspension, concentration en électrolyte, concentration de bentonite, structure des particules argileuses (charge, surface spécifique, granulométrie, capacité d'échange cationique), nature des cations compensateurs, température, âge de la suspension, histoire mécanique... [Bonifas (1998) ; Besq (2000) ; Ramos-Tejada et al. (2001) ; Corvisier (2001) ; Leyama (2001)].

### III.4 Conclusion

Les suspensions aqueuses de bentonite présentent un comportement rhéologique très complexe. La bentonite forme des gels dans l'eau à de très faibles concentrations. La stabilité des gels dans l'eau et leur rigidité sont affectées par les facteurs cités plus haut. La forte sensibilité de ce type de suspensions au taux de cisaillement et la dépendance par rapport au temps de leurs propriétés rhéologiques demeurent des paramètres clés à respecter. Il faut donc préciser des protocoles minutieux de préparation, conservation et manipulation des échantillons et surtout bien choisir son protocole de caractérisation, si l'on veut pouvoir comparer le comportement rhéologique des suspensions [Lagaly (1989) ; Bonifas (1998) ; Leyama (2001)].

# **Chapitre IV**

## **Les essais effectués**

### IV.1 L'échantillonnage

#### IV.1.1 Principe de l'échantillonnage

Un échantillonnage ainsi qu'un transport de l'échantillon convenable et soigneux sont les conditions préalables et nécessaires d'une analyse donnant des résultats fiables. L'usage correct de l'appareillage spécifié empêche de fausser l'échantillonnage. On réduit à un niveau acceptable les écarts d'échantillonnage dus à l'hétérogénéité du lot si on procède à un nombre suffisant de prélèvements. Si le granulat est homogénéisé par des procédés de production, un seul prélèvement important peut être représentatif du lot.

Les prélèvements doivent être choisis au hasard dans toutes les parties du lot que l'échantillon globale est censé représenter. Des minerais sur lesquels on ne peut effectuer aucun prélèvement élémentaires (parce qu'il n'est pas accessible ou pour tout autre raison pratique) ne doivent pas être considérés comme appartenant au lot représenté par l'échantillon globale. Ainsi, si les prélèvements proviennent de minerais déchargés d'un silo, l'échantillon globale représente les granulats déchargés mais pas ceux qui restent dans le silo.

L'opérateur de l'échantillonnage doit être informé de l'objectif de l'échantillonnage.

La masse de l'échantillon globale doit être calculée en tenant compte de la nature et du nombre des essais, des dimensions des minerais et de leur masse volumique. Les nombres de prélèvement constituant l'échantillon global doit être choisi sur la base d'expériences passées d'échantillonnage de minerais similaires provenant de conditions de fabrications semblables.

#### IV.1.2 Procédures d'échantillonnages

L'échantillonnage peut se faire sur une bande transporteuse à l'arrêt, au point de déchargement des bandes transporteuses et des goulottes, sur silo ou sur stock.

#### IV.1.3 Echantillonnage sur stock

Des prélèvements de taille à peu près égale doivent être effectués en différents points, à différentes hauteurs ou profondeurs sur l'ensemble du stock. L'emplacement et le nombre de prélèvement doivent tenir compte de la manière dont le stock est construit, de sa forme et de la possibilité de ségrégation interne. Les prélèvements doivent être effectués à l'aide d'une pelle, une pelle à main ou d'une benne.

### IV.2 Réduction des échantillons

#### IV.2.1 Définitions et symboles

- Division par moitiés : division d'un échantillon en sous échantillons de masse à peu près égales.
- Division aux  $\frac{3}{4}$  : division d'un échantillon en deux sous échantillons de masses respectives approximativement égales à  $\frac{3}{4}$  et  $\frac{1}{4}$  de la masse de l'échantillon original.
- Division aux  $\frac{5}{8}$  : division d'un échantillon en deux échantillons dont les masses sont approximativement égales à  $\frac{5}{8}$  et  $\frac{3}{8}$  de la masse de l'échantillon original.
- $M_L$  masse de l'échantillon de laboratoire.
- $M_s$  masse du sous échantillon.
- $M_i$  masse de la prise d'essai spécifiée.

**IV.2.2 Réduction de l'échantillon à l'aide d'un diviseur rotatif**

Placer l'échantillon dans la trémie et mettre le rotor en marche. Lorsque le rotor tourne à la vitesse de régime, mettre le distributeur vibrant en marche.

S'assurer que la machine a fait au moins 35 tours avant l'épuisement de l'échantillon de laboratoire. Si ce n'est pas le cas, recombinaison des sous-échantillons et répéter la réduction de l'échantillon à une vitesse de distribution plus faible.

**IV.2.3 Réduction de l'échantillon à l'aide d'un diviseur à couloir**

Placer l'échantillon dans l'un des réceptacles du diviseur à couloirs et étaler régulièrement le matériau sur toute la longueur du réceptacle. Mettre en place les deux autres réceptacles. Verser l'échantillon depuis le grand coté du diviseur à couloirs le long de la ligne médiane du diviseur à couloirs.

**IV.2.4 Réduction par quartage**

Il s'agit d'une méthode manuelle, ne nécessitant que très peu de matériel. La figure détaille cette opération : étaler l'échantillon selon une forme circulaire régulière sur une feuille, et à l'aide d'une petite pelle ou d'une lame de papier rigide, séparer l'échantillon verticalement en deux moitiés symétriques et écarter l'une des deux moitiés de quelques centimètres, en prenant garde à ce qu'un minimum de poudre demeure sur la feuille de base. Scinder ensuite les deux moitiés par un nouveau plan vertical perpendiculaire au premier, puis séparer l'échantillon de sorte que l'on obtienne quatre quarts identiques. Prélever et rassembler les quarts 1 et 3 avec lesquels l'opération est répétée jusqu'à l'obtention de la quantité désirée. Quant aux quarts 2 et 4, ils serviront de témoins.

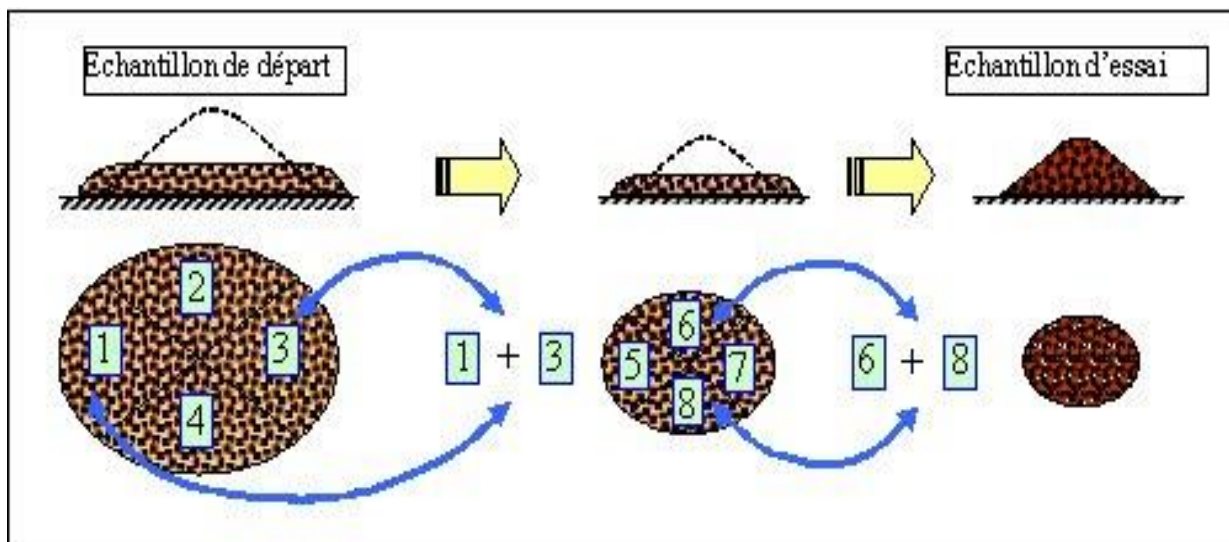


Figure .IV. 1: Opération de quartage.

### IV.3 Activation a la soude – phase préparation -

#### IV.3.1 But de l'essai

Le but de cet essai est d'améliorer la bentonite et ses propriétés rhéologiques avec l'augmentation de la teneur du dopant, ici choisi comme étant le  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

#### IV.3.2 Principe de l'essai

L'activation a la soude produit un échange cationiques entre le  $\text{Ca}^{2+}$  du tout-venant et les  $\text{Na}^+$  de carbonate de sodium,  $\text{Ca}^{2+}$  a une affinité d'adsorbé l'eau qui se trouve dans la solution et par la suite augmenter la viscosité.

#### IV.3.3 Matériel utilisé

- Balance de précision à 0,01 g
- Eau distillé
- Carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – la soude –
- Etuve  $105^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$
- Broyeur planétaire , Retsch PM 100 (voir annexe 4) permettant l'obtention d'un échantillon de fines
- Tamis de 150 microns

#### IV.3.4 Préparation de l'échantillon

On réduit de l'échantillon global avec un diviseur ou par quartage, jusqu'à avoir des échantillons égale à 100 g.

#### IV.3.5 Mode opératoire

- Prendre 100 g du tout-venant
- Ajouter 2 g de carbonate de sodium
- Mélanger le tout avec un peu d'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte
- Former de petites billes et les mettre à l'étuve jusqu'à séchage complet
- Broyer le produit après suscité
- Faire passer le produit dans un tamis 150 microns

On considère que la fraction broyé avec une granulométrie inférieur a  $150 \mu\text{m}$  une fraction activé conforme pour les essaie qui suit.

L'activation peut être faite à plusieurs degrés d'activation : 2 g, 4 g, 8 g, ... selon le degré d'activation nécessaire.

### IV.4 Mesure de viscosité

#### IV.4.1 But de l'essai

Cet essai est appliqué pour déterminer la viscosité significative d'un fluide.

#### IV.4.2 Principe de l'essai

L'essai consiste a mesuré la viscosité d'un fluide, qui se traduit par la résistance d'écoulement du fluide.

La viscosité de la boue détermine l'efficacité et même la capacité de lever des boutures sur le puits de forage. L'addition de différents types d'argile aura une incidence sur la viscosité, ainsi que l'utilisation de l'eau de mer comme opposer à l'eau claire.

Une lecture sur le viscosimètre est obtenu on changeant la vitesse de rotation de l'appareil et on changeant l'outil de mesure jusqu'à obtention de la valeur la plus approprié.

### IV.4.3 Matériels utilisés

- Balance de précision à 0,01 g
- Agitateur 11000 ± 300 rpm
- Becher
- Eau distillé
- Epruvette graduée de 500 ± 5 cm<sup>3</sup>
- Minuterie mécanique à 0,1 mn de précision
- Viscosimètre : BROOKFIELD DIGITAL VISCOMETER model LVE

### IV.4.4 Préparation de l'échantillon

On utilise dans cet essai une pesé de l'échantillon activé et réduit auparavant pour avoir un petit échantillon significatif du lot étudiant.

### IV.4.5 Mode opératoire

- Calibré le viscosimètre en utilisant l'eau distillé, viscosité de l'eau dans les conditions normal = 1 Cp.
- Préparé 350 ml d'eau distillé dans le bécher et commencer l'agitation à l'aide du mélangeur.
- Peser une quantité de 10,5 ± 0,1 g de bentonite.  
à l'aide de la spatule, ajouter lentement et soigneusement et par quantité minime la totale quantité suscite de la bentonite dans le mélangeur, en marche, pour éviter la création de la poussière et grumeaux.
- Après agitation de 5 ± 0,5 min, enlever le contenair de l'agitateur et gratter les grains de bentonite adhérente à la paroi du contenair.
- Remettre en agitation et répéter la même opération que précédemment après 5 - 10 mn d'agitation, le temps total est de 20 ± 1 mn.
- Placer le mélange dans le viscosimètre et mesurer la viscosité instantanée.
- Après vieillissement de 16 h, versez la suspension dans le container de l'agitateur et agiter pendant 5 ± 0,5 mn.
- Placer le mélange dans le viscosimètre et mesurer la viscosité instantanée

Le mélange pourra être préparé a plusieurs degré de saturation de bentonite (3% = 10,5 g, 6% = 21g, 9% = 31,5 g ou autre).

L'eau utilisée pourra être remplacé par de l'eau salée à plusieurs degrés de salinité ou autre liquide faisant partie de l'étude.

## IV.5 Résidus 75 µm

### IV.5.1 But de l'essai

Cet essai est appliqué essentiellement pour déterminé le pourcentage de la fraction des particules dépassant 75 µm dans l'échantillon.

### IV.5.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à séparer, au moyen d'un tamis 75 µm, un matériau a plusieurs classes granulométriques en deux partie.

Le procédé adapté est le tamisage à voie humide.

La masse de grains retenus sur le tamis est rapportée à la masse initiale du matériau, on considérant que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibration de la tamiseuse.

### IV.5.3 Matériels utilisés

- Etuve  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$
- Hexaméthaphosphate de sodium ( $40 \pm 0,1$  g Hexaméthaphosphate de sodium et 3,60 g de carbonate de sodium dans  $1000 \text{ cm}^3$  d'eau)
- Balance de précision à 0,01g
- Mélangeur  $11000 \pm 300$  rpm
- Bécher
- Tamis 15 microns.

### IV.5.4 Préparation de l'échantillon

On réduit de l'échantillon global avec un diviseur ou par quartage, jusqu'à avoir un échantillon égale à 10 g.

### IV.5.5 Mode opératoire

- prendre  $10 \pm 0,01$  g de bentonite
- mettre en suspension avec  $350 \text{ cm}^3$  d'eau et additionner 0,2 g d' Hexaméthaphosphate de sodium
- agiter pendant 30 mn
- transférer l'échantillon dans le tamis, laver sur ce tamis avec de l'eau
- sécher jusqu'à poids constant

### Calcul

Résidus  $75\mu\text{m}$  (%) = (poids du résidu en g / poids de l'échantillon) X 100

## IV.6 Humidité

### IV.6.1 But de l'essai

L'essai a pour but de déterminer l'humidité d'un échantillon donc sa teneur en eau par rapport à son poids.

### IV.6.2 Principe de l'essai

La différence en poids entre l'échantillon brut et l'échantillon sécher représente la masse d'eau contenu dans l'échantillon. Par un simple calcul on détermine sa teneur en eau en %.

Le séchage doit continuer jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

### IV.6.3 Matériels utilisés

- Etuve  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$
- Balance de précision à 0,01g
- Spatule

### IV.6.4 Préparation de l'échantillon

On doit procéder à cet essai pour chaque échantillon voulant mesurer sa viscosité.

### IV.6.5 Mode opératoire

- peser  $10 \pm 0,01$  g de bentonite.
- Sécher à l'étuve jusqu'à poids constant (2 heures)
- Peser l'échantillon séché.

### Calcul



Humidité (% du poids) = (perte en poids/poids de l'échantillon) / 100

### IV.7 Indice de gonflement : but de l'essai

#### IV.7.1 But de l'essai

Cet essai a pour but de mesurer l'indice de gonflement qui représente l'habilité du matériau à se gonfler dans un fluide.

#### IV.7.2 Principe de l'essai

A l'état anhydre, les feuillets argileux sont accordés les uns aux autres, mais ils s'écartent en présence d'eau, ce qui constitue l'une des propriétés caractéristiques des montmorillonites.

Des études ont montré que l'intensité du gonflement dépend de la nature du cation compensateur, de la force ionique du milieu environnant et de la quantité d'eau totale.

#### IV.7.3 Matériels utilisés

- Burette de 50 ml  $\pm$  0,1 ml
- Eau distillé
- Balance de précision à 0,01g
- Etuve 105°C  $\pm$  3°C
- Minuterie mécanique à 0,1 mn de précision
- Spatule

#### IV.7.4 Préparation de l'échantillon

On doit procéder à cet essai pour chaque échantillon voulant mesurer sa viscosité.

#### IV.7.5 Mode opératoire

- remplir une burette de 50 ml de volume avec de l'eau distillée
- peser 0,5  $\pm$  0,01 g de bentonite et verser la dans la burette
- laisser pendant 45 mn et rajouter une autre quantité similaire de bentonite
- laisser le tout au repos pendant 2h
- noter le volume du gonflement.

### Calcul

Indice de gonflement (%) = (volume du gonflement X 50) / (50 – humidité)

# **Chapitre V**

## **Partie expérimentale**

### V.1 Introduction

Le présent chapitre consiste à étudier expérimentalement la rhéologie des suspensions de bentonite en fonction des paramètres suivants :

- concentrations volumiques de la bentonite dans le fluide : pour cela on propose trois concentrations volumiques de 3%, 6% et 9% de la masse du fluide utilisé.
- On propose de faire l'étude sur la bentonite non activé et à différents degrés d'activation : 2%, 4% et 8% de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .
- Cette étude, comme son nom l'indique, se focalise sur l'effet du vieillissement, de ce fait, le temps étant la troisième variable. Les différentes mesures qui ont permis de tracer les graphes ont été pris à intervalle de temps constant de 3 jours.

Deux autres variables ont fait objet d'une pré-étude pour démontrer leurs effets apparents, il s'agit de l'effet de la température et de degré de salinité. Ces deux derniers nécessitent une étude plus approfondie.

### V.2 Analyse minéralogiques

Cette analyse permet d'identifier les types et les nombres des minéraux présents dans l'argile en utilisant la diffraction des rayons X.

La montmorillonite était identifiée comme étant le principal minéral présent dans les échantillons. La présence du quartz était également identifiée d'une façon positive dans tous les échantillons analysés. Les diffractogrammes révèlent la présence de plusieurs autres pics de faible intensité.

Cependant, ces pics de faible intensité peuvent être groupé pour coïncider avec les diffractogrammes standard de plusieurs autres minéraux qui sont normalement rencontrés dans la bentonite tels que : chlorite, illite,... etc.

**Tableau .V. 1:** Répartition des minéraux contenus dans les bentonites de MEGHNIA

Minéraux	Pourcentage de présence %
Montmorillonite	75 – 80
Quartz	05 – 10
Feldspaths	3 – 5
Gypse	Traces
Anhydrite	Traces
Illite	1 – 2
Carbonates	1 – 2

<b>Biotite</b>	1 – 2
<b>Verre volcanique</b>	< 1
<b>Zircon</b>	Traces
<b>Zéolite</b>	Traces

D'après ces résultats on note que la bentonite de MEGHNIA renferme un taux élevé de montmorillonite, indice de pureté des bentonites, et une faible teneur en quartz libre et verre volcanique qui nuit aux propriétés rhéologique de la bentonite tel que la plasticité et par la suite la viscosité.

### V.3 Analyse chimiques

Elle permet de déterminer les types d'oxydes présents dans la matière ainsi que leurs teneurs. Les tableaux ci-dessous montrent l'analyse chimique des échantillons de bentonite de MEGHNIA à l'état brut.

**Tableau .V. 2:** Analyse chimique de la bentonite de MEGHNIA - oxydes -

<b>Oxydes</b>	<b>Pourcentages de présence %</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	61,00
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	16,10
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2,80
<b>MgO</b>	3,53
<b>CaO</b>	3,15
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,50
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,60
<b>MnO</b>	0,04
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,22
<b>PAF</b>	10,16
<b>Total</b>	100,1

**Tableau .V. 3:** Analyse chimique de la bentonite de MEGNNIA - éléments en traces –

Eléments en trace	Présence en PPM
<b>Ba</b>	210
<b>Sr</b>	160
<b>Cu</b>	20
<b>Pb</b>	35
<b>Zn</b>	70
<b>S</b>	270
<b>SO<sub>4</sub></b>	810

Le rapport molaire de la silice sur alumine de la bentonite de MEGHNIA est de 5,40.

En se référant à l'analyse minéralogique et chimique on peut dire qu'une partie de Na<sub>2</sub>O présente est liée au feldspath (albite) présente en grande quantité dans le gisement.

La présence du soufre, S, indique la présence des sels solubles qui gênent l'échange cationique.

Pour la montmorillonite pure, le rapport molaire silice sur alumine varie entre 2 – 3 pour une substitution maximale de Si<sup>4+</sup> par Al<sup>3+</sup> et 4 – 8 pour une substitution maximale d'Al<sup>3+</sup> par Mg<sup>3+</sup>.

Dans une tentative d'évaluer le degré de pureté d'une bentonite en son contenu de montmorillonite à partir de sa composition chimique seulement, le rapport molaire silice sur alumine peut être utile en tant qu'indicatif qualitatif.

#### **V.4 Préparation des échantillons**

Les échantillons de la bentonite de MEGHNIA sont de deux types de produits : bentonite de charges industrielle (bentonite non activé) et bentonite de forage (produit finis destiné aux forages). Les échantillons ont été prélevés selon la norme et les procédures cités dans le chapitre. IV (IV.1 l'échantillonnage).

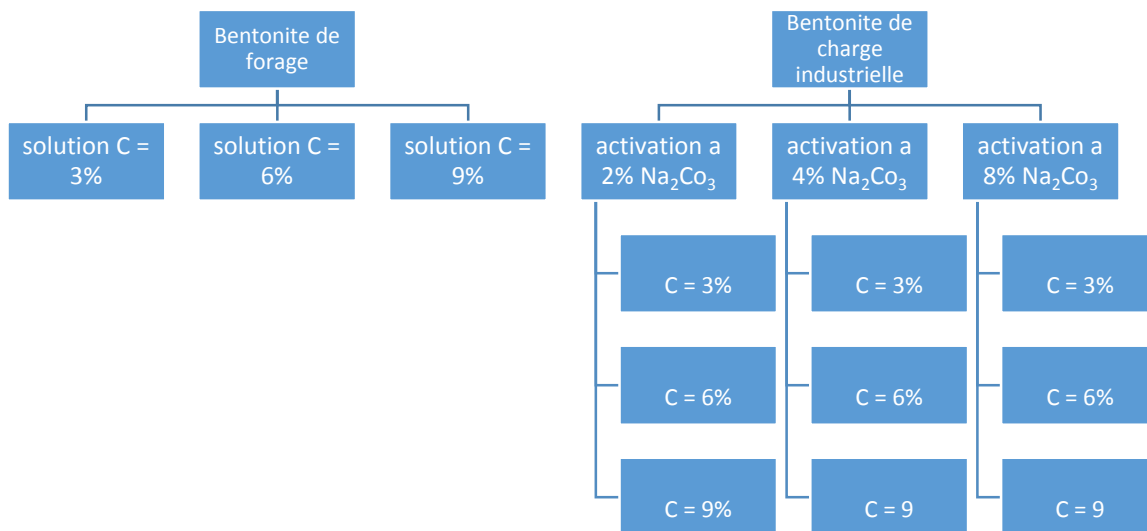
Les échantillons transporté et reçu au sein du laboratoire du Génie Minier de l'Ecole Nationale Polytechnique, ont un poids de 32 Kg chacun ; une réduction de ses échantillons s'impose.

La réduction a eu lieu, au sein du laboratoire, par quartage dans un premier lieu pour permettre d'avoir des échantillons de taille moindre de 8 Kg, et elle était suivie par une

division à l'aide du diviseur rotatif (voir annexes) pour enfin avoir des échantillons de taille de 100 Gr.

Pour la **bentonite de forage**, activé au niveau d'usine de MEGHNIA, on prépare à partir de ses derniers échantillons les solutions servant aux mesures de viscosité selon la procédure décrite dans le chapitre. IV (IV.4. Mesure de viscosité). On aura ainsi des solutions de bentonite de forage-eau douce à 3%, 6% et 9% de concentrations massiques.

Pour la **bentonite de charge industrielle**, on procède à l'activation des échantillons selon trois degrés différents : 2%, 4% et 8% selon le mode opératoire décrit dans le chapitre. IV (IV.3. Activation à la soude - phase préparation -). Par la suite et pour chaque degré d'activation, on prépare les solutions servant à la mesure de viscosité. On aura ainsi des solutions de bentonite-eau douce à 3%, 6% et 9% de concentrations massiques, et pour chaque concentrations trois degrés d'activation.



**Figure .V. 1:** Echantillons utilisé pour l'étude de la bentonite de MEGHNIA.

### V.5 Résidu 75 µm

**Tableau .V. 4:** Mesure du résidu 75 µm.

	Bentonite de forage	BCI Activé 2%	BCI Activé 4%	BCI Activé 8%
<b>Volume initial</b>	10,012	10,098	10,005	10,074
<b>Volume du résidu</b>	0,165	0,098	0,128	0,197
<b>Résidu 75 µm</b>	1,6%	1,0%	1,3%	2,0%

On suivant la procédure décrite dans le chapitre. IV (4.5. Résidu 75 µm) on obtient les valeurs résidu 75 µm du tableau .V. 5.

## V.6 Humidité

**Tableau .V. 6:** Mesure de l'humidité des différents échantillons.

	Bentonite de forage	BCI Activé 2%	BCI Activé 4%	BCI Activé 8%
<b>Poids initial (Gr)</b>	10,010	10,212	10,003	10,018
<b>poids final (Gr)</b>	8,897	9,582	9,078	9,699
<b>différence de poids</b>	1,113	0,630	0,925	0,319
<b>W%</b>	11%	6%	9%	3%

On suivant la procédure décrite dans le chapitre. IV (IV.6 Humidité) on obtient les valeurs W% du tableau .V. 7.

## V.7 Indice de gonflement

**Tableau .V. 8:** Mesure de l'indice de gonflement des différents échantillons.

	Bentonite de forage	BCI Activé 2%	BCI Activé 4%	BCI Activé 8%
<b>Volume initial</b>	50,00	50,00	50,00	50,00
<b>Volume final</b>	51,50	51,00	51,00	51,50
<b>Indice de gonflement</b>	11,63	11,07	13,63	11,54

On suivant la procédure décrite dans le chapitre. IV (IV.7. Indice de gonflement) on obtient les résultats du tableau .V. 9.

Pour avoir une boue de forage de bonne qualité, d'après la norme API 13 section 6 (voir annexes), les paramètres contrôlés sont :

- Lecture 600 rpm  $\geq$  30 Cps (viscosité)
- Ratio  $\leq$  6
- Perte au filtrat  $\leq$  16 Cm<sup>3</sup>
- Résidu 75  $\mu$ m  $\leq$  2,5 %
- Humidité  $\leq$  13%

Le but de notre étude est l'étude rhéologique, essentiellement la viscosité, qui consiste a comparé la variation de la viscosité des différents solutions préparés. De ce fait, pour avoir une comparaison significative il faut suivre la même procédure pour tous les essaie et en utilisant la même vitesse de cisaillement et le même matériel.

On confirme par les essaie de mesures du résidu 75  $\mu$ m, l'humidité et l'indice de gonflement que nos échantillons répondent parfaitement aux exigences de la norme API 13 section6.

**V.8 Mesures de viscosité**

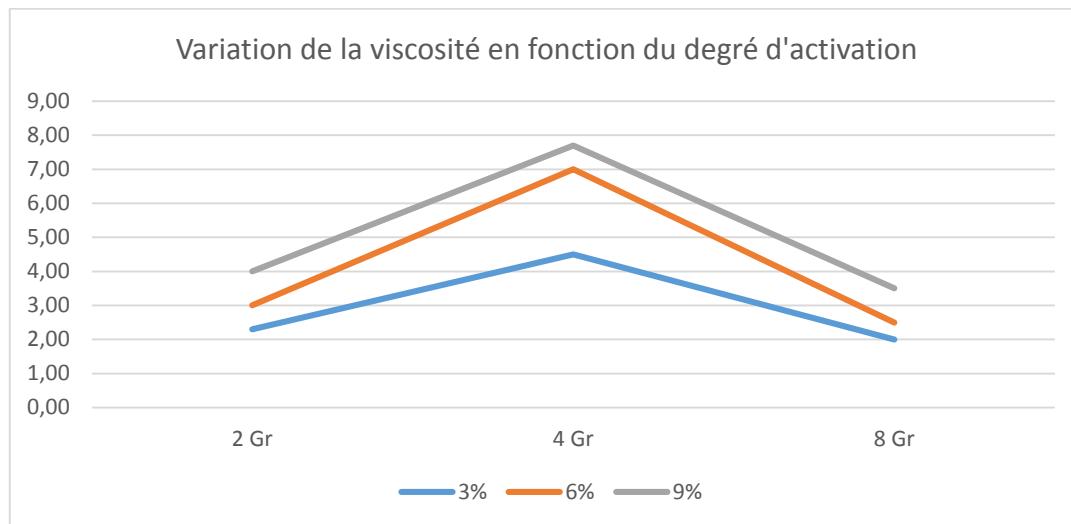
**V.8.1 Influence de l'activation avec le Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sur la viscosité**

Le but l'activation a la soude, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, est d'améliorer la bentonite et ses propriétés rhéologiques avec l'augmentation de la teneur du dopant, pour cela on mesure la viscosité pour les trois degrés d'activation proposé. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau V. 10** : viscosité des échantillons a différents degrés d'activation.

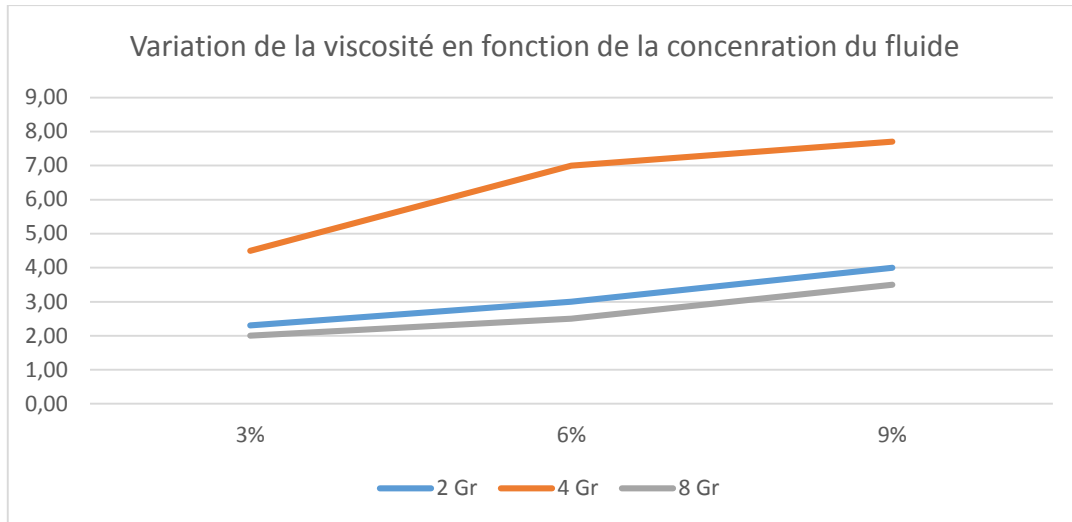
C%	D° d'activation %	Température C°	PH	Viscosité Cp	Mesure
<b>3%</b>	2%	26,60	9,60	<b>2,30</b>	Mes 1
	4%	24,90	7,30	<b>4,50</b>	Mes 1
	8%	25,20	7,80	<b>2,00</b>	Mes 1
<b>6%</b>	2%	27,10	10,55	<b>3,00</b>	Mes 1
	4%	23,60	10,00	<b>7,00</b>	Mes 1
	8%	25,30	7,60	<b>2,50</b>	Mes 1
<b>9%</b>	2%	27,80	10,42	<b>4,00</b>	Mes 1
	4%	24,00	7,10	<b>7,70</b>	Mes 1
	8%	24,90	8,00	<b>3,50</b>	Mes 1

On trace à partir de ces résultats les graphes suivants :



**Figure .V. 2:** Variation de la viscosité en fonction du degré d'activation.





**Figure .V. 3:**Variation de la viscosité en fonction de la concentration du fluide.

### Interprétation

On observe, dans le graphe de la figure .V. 4, clairement l’augmentation de la viscosité avec l’augmentation du pourcentage d’activation a la soude, pour toute les concentrations, jusqu’à atteindre un optimum de 4%. Au-delà de cette valeur on observe une diminution importante de la viscosité.

Du graphe de la figure .V. 3, on remarque que la courbe de la solution activé à 4% présente les plus grands mesures de viscosité, et aussi que la courbe de la solution activé a 8% présente les plus faible mesures de viscosités.

L’ajout du carbonate de sodium produit un échange cationique entre  $Ca^{2+}$  du tout-venant et  $Na^+$  de carbonate.  $Ca^{2+}$  a une affinité d’adsorbé l’eau qui se trouve dans la solution et par la suite il augmente la viscosité de la solution.

Une fois la solution est saturée en  $Ca^{2+}$ , on aura un excès de  $Na^+$  (>4%) et par la suite provocation de la réaction entre  $Na^+$  et  $OH^-$  est libération ‘une quantité de  $H_2O$  ce qui provoque la diminution de la viscosité.

De cela, on déduit que l’optimum des degrés d’activation de la bentonite de MEGHNIA par  $Na_2CO_3$  est de 4%.

D’après les graphes des deux figure .V. 5 et figure .V. 3, on déduit clairement que la valeur de la viscosité est directement proportionnelle à la concentration de la bentonite dans la solution.

### V.8.2 Variation de la viscosité à un degré d’activation

Les résultats pour chaque degré d’activation sont présentés dans les tableaux suivants :

**Tableau V. 11:**Variation de la viscosité des échantillons de bentonite de forage.

C%	D° d'activation (Gr)	Température	PH	Viscosité Cp	Mesure
3%	4%	27,70	10,66	5,40	Mes 1
		27,90	9,20	6,60	Mes 2
		27,80	7,30	9,64	Mes 3
6%	4%	27,70	10,49	9,24	Mes 1
		27,80	9,30	9,90	Mes 2
		27,50	7,20	10,50	Mes 3
9%	4%	26,50	10,66	10,02	Mes 1
		27,90	10,16	11,96	Mes 2
		25,70	7,40	13,75	Mes 3

**Tableau V. 12:** Variation de la viscosité des échantillons activé à 2%.

C%	D° d'activation %	Température C°	PH	Viscosité Cp	Mesure
3%	2%	26,60	9,60	2,30	Mes 1
		28,90	7,20	3,30	Mes 2
		25,60	7,00	4,00	Mes 3
6%	2%	27,10	10,55	3,00	Mes 1
		27,80	8,40	6,30	Mes 2
		25,60	7,30	7,00	Mes 3
9%	2%	27,80	10,42	4,00	Mes 1
		27,80	8,30	7,60	Mes 2
		26,00	7,40	8,50	Mes 3

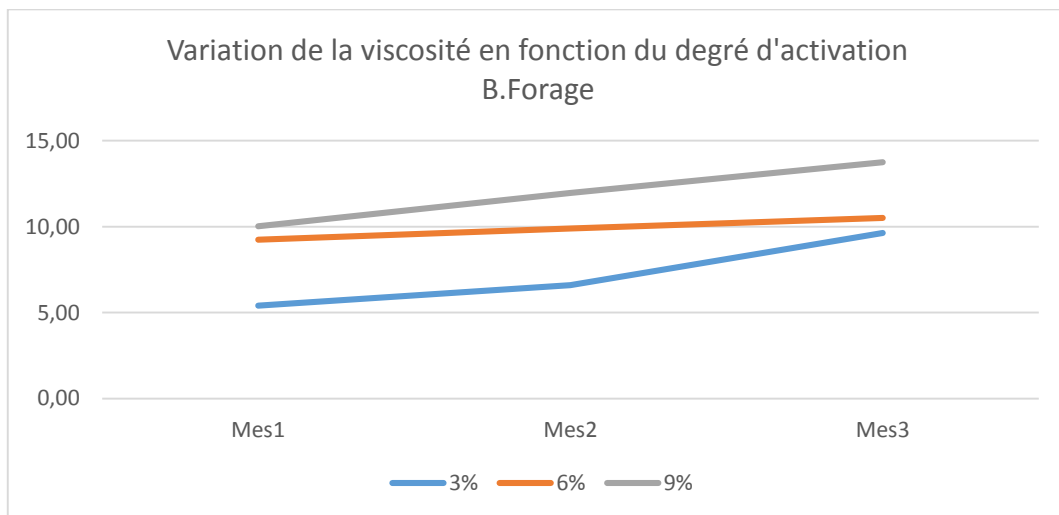
**Tableau V. 13:** Variation de la viscosité des échantillons activé à 4%.

C%	D° d'activation %	Température C°	PH	Viscosité Cp	Mesure
3%	4%	24,90	7,30	4,50	Mes 1
		23,90	7,00	5,50	Mes 2
		24,80	6,90	7,00	Mes 3
6%	4%	23,60	10,00	7,00	Mes 1
		26,00	7,00	7,50	Mes 2
		24,70	6,96	8,07	Mes 3
9%	4%	24,00	7,10	7,70	Mes 1
		24,00	7,05	8,94	Mes 2
		25,90	6,72	10,53	Mes 3

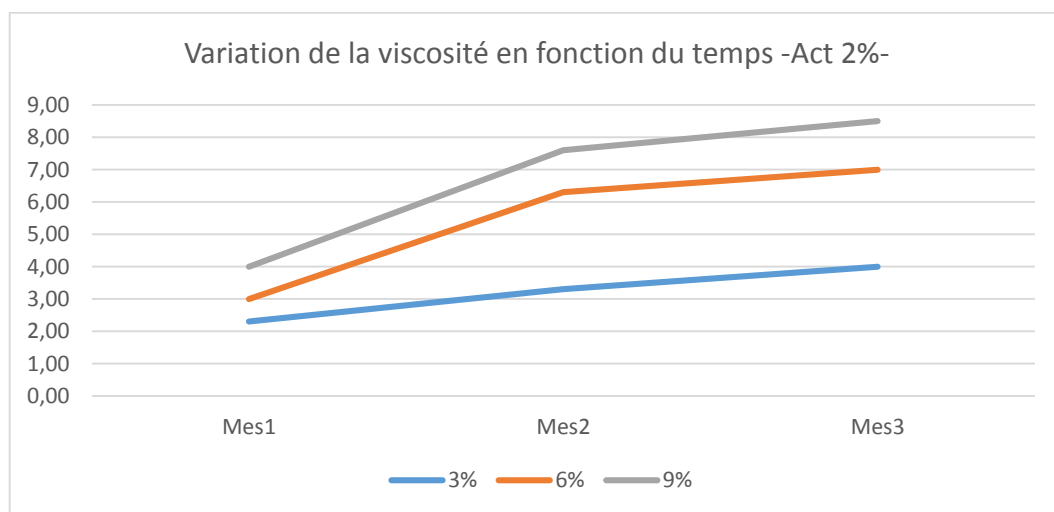
**Tableau V. 14:** Variation de la viscosité des échantillons activé à 8%.

C%	D° d'activation %	Température C°	PH	Viscosité Cp	Mesure
<b>3%</b>	8%	25,20	7,80	<b>2,00</b>	Mes 1
		24,10	7,11	<b>2,60</b>	Mes 2
		25,70	7,02	<b>3,70</b>	Mes 3
<b>6%</b>	8%	25,30	7,60	<b>2,50</b>	Mes 1
		23,60	6,90	<b>4,53</b>	Mes 2
		25,70	6,85	<b>6,00</b>	Mes 3
<b>9%</b>	8%	24,90	8,00	<b>3,50</b>	Mes 1
		24,10	7,11	<b>5,08</b>	Mes 2
		25,40	6,69	<b>7,05</b>	Mes 3

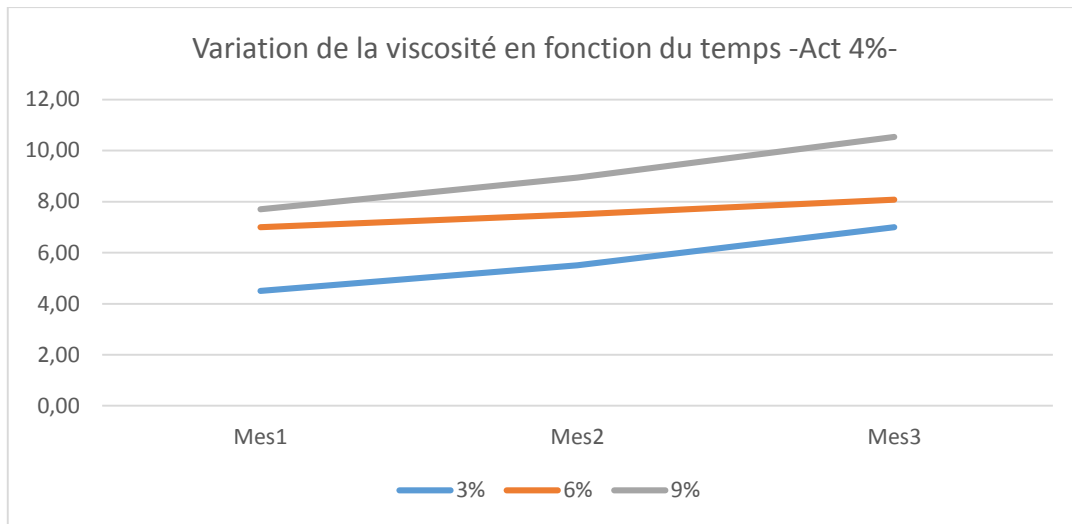
A partir de ces données on trace les graphes suivants :



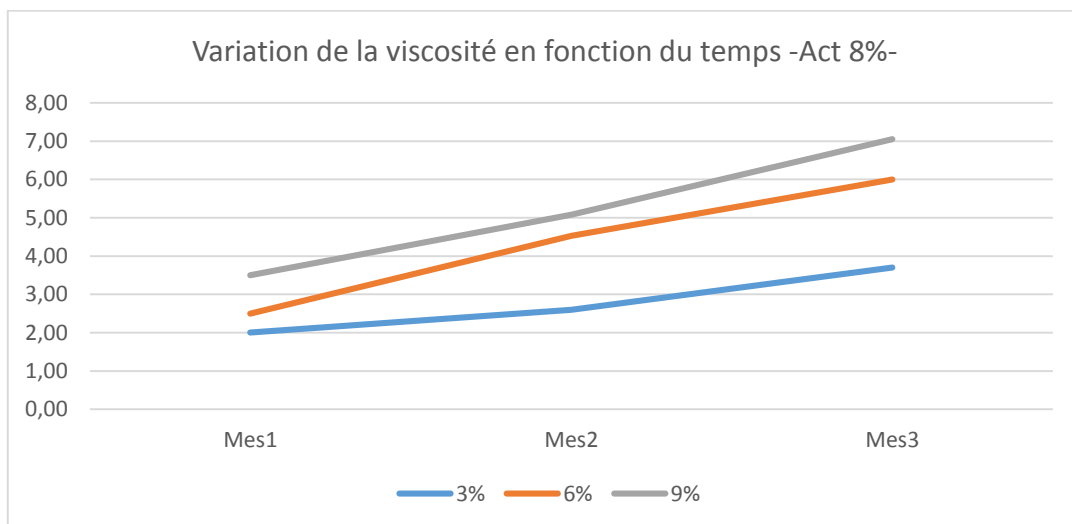
**Figure .V. 6:** Variation de la viscosité en fonction du temps –bentonite de forage-.



**Figure .V. 7:** Variation de la viscosité en fonction du temps -Act 2%-.



**Figure .V. 8:**Variation de la viscosité en fonction du temps -Act 4%-.



**Figure .V. 9:**Variation de la viscosité en fonction du temps -Act 8%-.

### Interprétation

Pour les trois graphes, et pour chaque courbe de concentration de bentonite, on observe une augmentation de la viscosité à un taux de cisaillement constant sous une vitesse de rotation constante du viscosimètre : 100 RPM. Tous les essais ont été réalisés dans les mêmes conditions expérimentales.

Le graphe représentant le degré d'activation 4% présente les plus grandes mesures de viscosité, ceci est due au fait que 4% de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  représente l'optimum des degrés d'activations.

De là, on peut dire que la solution eau – bentonite présente une solution anti-thixotrope. On parle d'un phénomène d'anti-thixotropie si on observe une augmentation de viscosité en fonction du temps sous l'action d'une contrainte de cisaillement constante.

Pour expliquer ce phénomène dans nos solutions argileuses, il faut s'intéresser de près à la nature rhéofluidifiante du système. Il est généralement dû à la reconstruction du réseau physique tridimensionnelle de la structure établie par les particules de bentonite. Cette reconstruction, c'est-à-dire le retour des particules à des positions de minimum d'énergie, est progressif en cours du temps sous l'action du mouvement brownien.

D'autre part, on observe habituellement un comportement antithixotrope à de faibles taux de cisaillement pour des suspensions de bentonite. Ces faibles taux de cisaillement aident à la restructuration du réseau de charges.

# **Conclusion Générale**

L'objectif principal de ce travail était de caractériser les propriétés rhéologiques, essentiellement la viscosité, de la bentonite de MEGHNIA en se basant sur des solutions d'eau-bentonite. Ceci est pour mettre en évidence la problématique du changement de viscosité de cette bentonite.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la bentonite en détaillant la cristallographie et la microstructure des argiles, essentiellement les montmorillonites, sa classification, son usage et son interaction avec l'eau. On surligne aussi l'usage de la bentonite dans les différentes boues de forages.

Par la suite dans le second chapitre, on expose d'une manière générale les spécificités de l'unité de MEGHNIA : sa situation géographique, sa géologie et son potentiel en terme de réserve et on explique en détails sa chaîne de production et les méthodes de traitement et d'activations adoptées.

On ne peut pas entamer une étude rhéologique sans détailler la rhéologie des suspensions. Dans le troisième chapitre, on expose la rhéologie des fluides et celle du mélange eau – bentonite.

Dans la partie expérimentale, nous nous sommes intéressés au comportement des solutions aqueuses de bentonites dans l'eau à différentes concentrations massiques et différents degrés d'activations.

Afin d'assurer la reproductibilité de nos résultats expérimentaux, nous avons mis au point de bons protocoles, et de préparation des échantillons et de mesure. Nous avons également mis au point différentes techniques afin d'éviter les problèmes qui peuvent dégrader nos résultats et par la suite nos interprétations.

Pour cela nous avons opté pour des essais de mesure de résidu 75  $\mu\text{m}$ , d'humidité et d'indice de gonflement. Une fois la bentonite est conforme à ses trois essais, nous entamons les mesures de la viscosité des différentes solutions à l'aide du viscosimètre en utilisant une seule vitesse et des conditions expérimentales permettant une bonne comparaison de résultats.

Dans l'eau, l'amélioration du comportement rhéologique de la bentonite de MEGHNIA suite à l'activation à l'aide de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , montre qu'un optimum de teneur du dopant se situe à 4%, puisque ce pourcentage donne le meilleur comportement rhéologique de la bentonite.

Globalement, on observe que la viscosité croît en fonction du temps, il s'agit d'un phénomène d'anti-thixotropie.

Nous avons pu effectuer une comparaison des propriétés rhéologiques de suspensions de particules solides dans l'eau. Les particules d'argiles ont une structure particulière puisqu'elles sont constituées de feuillets (épaisseur de l'ordre du nm) superposés pour constituer des particules primaires (épaisseur de l'ordre de 10 nm) elles-mêmes regroupées sous forme d'agrégats dont la taille est de l'ordre de 0.1 à 100  $\mu\text{m}$ .

Dans l'eau, l'augmentation du seuil d'écoulement observée au cours du vieillissement est probablement due à une exfoliation partielle conduisant à la formation d'un réseau élastique par des (agrégats de) particules connectées entre elles.

Ce travail pourrait être approfondi et complété par l'exploitation de l'effet d'un PH acide sur le comportement rhéologique des systèmes eau/Bentonite. Une étude plus approfondie sur l'effet de la température serait également intéressante, notamment en faisant des balayages en température. Aussi une étude microscopique des caractères physico chimique des interactions existantes dans le mélange eau – bentonites pourrais nous révéler les principaux causes de cette variation de viscosité.



# **Références bibliographique**

- [1] Parker S.P ed., (1988). *"McGraw-Hill encyclopedia of the geological sciences"*, 2nd ed. New York, McGraw-Hill, pp 32–33, 69–72, 400–401.
- [2] Bailey S.W., (1980), *"Summary of recommendations of AIPEA [Association Internationale Pour l'Étude des Argiles] nomenclature committee on clay"*. Am Mineral, 65: 1– 7. Available at:  
[http://www.minsocam.org/msa/collectors\\_corner/arc/nomenclaturecl1.htm](http://www.minsocam.org/msa/collectors_corner/arc/nomenclaturecl1.htm).
- [3] Rieder M & al., (1998). *"Nomenclature of micas. Clays"* Clay Miner, 46: 586–595.
- [4] Baravian C., (2006). *"effets inertiels en rhéométrie instationnaire"*, GFR vol. 9, pp. 11-21
- [5] Brindley G.W & Brown G ed., (1980). *"Crystal structures of clay minerals and their Xray identification"*. London, Mineralogical Society, 495 pp (Monograph No. 5).
- [6] Paumier S., (2006). *"Facteurs déterminant l'organisation et la rhéologie du système argile-eau pour des suspensions de smectites"*, thèse de doctorat de l'université de Poitiers.
- [7] Viallis-Terrisse H., (2000). *"Interaction des Silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment, avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles"* Thèse de doctorat de l'Université de Bourgogne.
- [8] Le Pluart L., (2002). *"Nanocomposites Epoxyde/amine/montmorillonite : Rôle des interactions sur la formation, la morphologie aux différents niveaux d'échelle et les propriétés mécaniques des réseaux»*, Thèse de doctorat de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [9] Benchabane A., (2006). *"Etude du comportement rhéologique de mélanges argilepolymères, Effets de l'ajout de polymères"*. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur.
- [10] Ebagninin K.W., (2009). *"Relation structure microscopique – comportement microscopique de suspensions de bentonite en présence de polymères»*. thèse de doctorat de l'université de Strasbourg.
- [11] Moreira E., (2008). *"Etude du comportement thixotropique de suspensions de bentonite en conduite »*. thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur.
- [12] Luckham, P.F. & Rossi S., (1999). *"Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions"* Adv. Colloid Interface Sci. 82, 43-92.
- [13] Heimenz P.C, Rajagopalan R., (1977). *"Principles of Colloids and Surface Chemistry"* CRC Press.
- [14] Van Olphen H., (1977). *"An Introduction to Clay Colloid Chemistry"*. Wiley, New York.
- [15] Weiss A., and Franck.R., (1961). *"Uber den bau des gerüst en thixotropen gelen"*. Naturforsch, 10: 141-143.
- [16] Kenen R., (1988). *"Rheology of aqueous suspension of sodium/calcium montmorillonite"*. Soil Science Society of America Journal, 52: 924-928.
- [17] Touret O., Pons C.H., Tessier D., and Tardy Y., (1990). *"Etude de la répartition de l'eau dans des argiles structurées Mg 2+ aux fortes teneurs en eau"*. Clay Minerals, 25: tel-00673467, version 1 - 23 Feb 2012
- Références chapitre 3  
217-233.
- [18] Hoffmann U., (1961). *"Geheimnisse des tons"* Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft, 38:201-207.
- [19] M'Ewen M.B. and Pratt M.I., (1957). *"The gelation of montmorillonite"*. Transactions of the Faraday Society, 53: 535-547.
- [20] Tombácz E. & Szekeres M., (2004). *"Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: The specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes"*, Applied

Clay Science, 27, 75-94.

[21] Ben Azouz K., Dupuis D., and Bekkour K., (2010). "*Rheological characterizations of dispersions of clay particles in viscoelastic polymer solutions*", Applied Rheology. 20, 13041, 1-9.

[22] Chen S., Low. P.F., Cushman J.H., Roth C.B., (1987). "*Organic compound effects on swelling and flocculation of Upton montmorillonite*", Soil Sci. Soc. Am. J. 51\_1987.1444.

[23] Casson C., in: C.C. Mills\_Ed., (1959). "*Rheology of Disperse Systems*", Pergam, 1959, p. 84.

[24] Ben chaabane A., Bekkour K., (2004). "*Etude de l'effet d'un polymère anionique sur le comportement rhéologique de suspensions de bentonite*" 39ème Colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie, Mulhouse, France.

[25] Ewoldt Randy H., McKinley Gareth H., (2007). "*Creep Ringing in Rheometry or How to Deal with Oft-discarded Data in Step Stress Tests*". Rheology Bulletin; 76 (1):4–6. 22–24.

[26] Bonn D., Coussot p., Huynh H. T., Bertrand F. and Debrégeas G., (2002). "*Rheology of soft glassy materials*" Europhys. Lett. 59, 786-792.

[27] Coussot.P., ((2006). 41ème colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie, 5-9.

[28] Adel BENCHABANE, Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles-polymères.

Effets de l'ajout de polymères. Thèse de Doctorat.

[29] BELHALFAOUI Belkacem Fayçal, Etude de l'élimination des métaux lourds en solution aqueuse par une bentonite et une cellulose modifiées, thèse doctorat 2010.

[30] Mourad GARECHE « Caractérisation mécanique d'un fluide complexes » Thèse de magister I.N.H 1997.

[31] K.BEKKOUR « Caractérisation rhéologique et en écoulement d'émulsion d'huile de vaseline et d'eau et d'émulsion chargé en solide » thèse de doctorat à l'université de louis Pasteur strasbourg 1991.

[32] NICOLAS Tixier, approche des propriétés rhéologiques de suspensions biologiques floculées. Thèse de Doctorat.

# **Annexe 1**

## Annexes 1 : Matériels utilisé



Diviseur rotatif



Tamiseuse



Broyeur planétaire



Broyeur planétaire



Agitateur



Viscosimètre



Etuve



PH mètre



# **Annexe 2**

API Specification 13A 18th Edition, August 2010

Specification for Drilling Fluids – Specifications and Testing

**2.3 BENTONITE**

**Product:** Bentonite  
**Grade:** Drilling Grade  
**Product Description:** API Specification 13A – 9.1.1

Drilling-grade bentonite is a naturally occurring clay containing the clay minerals of smectite. It can also contain accessory minerals, such as quartz, mica, feldspar and calcite.

**Product Physical Requirements:** API Specification 13A – 9.1.2

Drilling-grade bentonite shall be deemed to meet the requirements of this International Standard if a composite sample representing no more than one day's production conforms to the physical specifications of Table 8, represents the product produced and is controlled by the manufacturer.

**Table 8 – Bentonite physical specifications**

Requirement	Standard
Suspension properties:	
Viscometer dial reading at 600 r/min	Minimum 30
Yield point/plastic viscosity ratio	Maximum 3
Filtrate volume	Maximum 15,0 ml
Residue of diameter greater than 75 µm	Maximum mass fraction 4,0 %

**Note:** General Shipping & Marking Requirements are listed in the General Requirements Section of this Purchasing Guideline

API Specification 13A 18th Edition, August 2010

Specification for Drilling Fluids – Specifications and Testing

<b>Product:</b>	Bentonite
<b>Grade:</b>	OCMA
<b>Product Description:</b>	API Specification 13A – 11.1.1 OCMA-grade bentonite is a montmorillonite-based clay which, by nature of its source, cannot meet all aspects of Clause 9. This bentonite may have been treated with soda ash, polymer or other chemicals to improve suspension property performance.
<b>Product Physical Requirements:</b>	API Specification 13A – 11.1.2 OCMA-grade bentonite shall be deemed to meet the requirements of this International Standard if a composite sample representing no more than one day's production conforms to the physical specifications of Table 10, represents the product produced and is controlled by the manufacturer.
<b>Product Specific Marking Requirements:</b>	API Specification 13A – 11.1.3 Manufacturers and licensees shall provide appropriate markings on the container in block letters at least 6 mm (0,25 in) high below the name of the material, the type of treatment of the bentonite with polymer, soda ash or other material.

Table 10 – OCMA grade bentonite physical specifications

Requirement	Standard
Suspension properties:	
Viscometer dial reading at 600 r/min	Minimum 30
Yield point/plastic viscosity ratio	Maximum 6
Filtrate volume, millilitres	Maximum 16,0
Residue of diameter greater than 75 µm	Maximum 2,5 % mass fraction

**Note:** General Shipping & Marking Requirements are listed in the General Requirements Section of this Purchasing Guideline

**Testing Product:** Test calibration bentonite

**Grade:** Test calibration

**Product Information:** API Specification 13A – Annex B.1.2

Calibration barite and test calibration bentonite are available through the API offices (see 4.2.1) for use by laboratories to determine their test precision.

**Note:** Test calibration barite can also be found in the Additional Requirements Section of this Purchasing Guideline

API Specification 13A 18th Edition, August 2010  
 Specification for Drilling Fluids – Specifications and Testing

**2.4 NON-TREATED BENTONITE**

- Product:** Non-treated Bentonite
- Grade:** Drilling Grade
- Product Description:** API Specification 13A – 10.1.1  
 Drilling-grade non-treated bentonite clay, composed principally of the mineral smectite, is dried and ground, but not chemically treated. It can also contain accessory minerals, such as quartz, mica, feldspar and calcite.
- Product Physical Requirements:** API Specification 13A – 10.1.2  
 Drilling-grade non-treated bentonite shall be deemed to meet the requirements of this International Standard if a composite sample representing no more than one day's production conforms to the physical specifications of Table 9, represents the product produced and is controlled by the manufacturer.

**Table 9 – Non-treated bentonite physical specifications**

Requirement	Standard
Suspension properties:	
Yield point/plastic viscosity ratio	Maximum 1,5
Dispersed plastic viscosity, millipascal-seconds	Minimum 10
Dispersed filtrate volume, millilitres	Maximum 12,5

**Note:** General Shipping & Marking Requirements are listed in the General Requirements Section of this Purchasing Guideline

# **Annexe 3**

# VISCOSIMÈTRE DV-E

COMMUTEZ SUR « SPEED »  
TOURNEZ LE BOUTON  
SÉLECTIONNEZ LA VITESSE  
C'EST FAIT !

BOUTON DE SÉLECTION  
MOBILE / VITESSE

**DONNÉES AFFICHÉES :**  
- VISCOSITÉ (CP OU MPa.s)  
- % DE TORSION  
- VITESSE / MOBILE

COMMUTEZ SUR « SPINDLE »  
TOURNEZ LE BOUTON  
SÉLECTIONNEZ LE MOBILE

TOUCHE « AUTO RANGE »  
INDIQUANT  
LES LIMITES DE MESURES



LAGE DE  
VICOSITÉ  
p R (mPa.s)  
c

MODÈLE	LAGE DE VICOSITÉ		VITESSES	
	Mini.	Maxi.	tr/min	Nombre d'incrèments
LV DV-E	1 <sup>†</sup>	2 M	0,3-100	18
RVDV-E	100 <sup>††</sup>	13 M	0,3-100	18
HADV-E	200 <sup>††</sup>	26 M	0,3-100	18
HBDV-E	800 <sup>††</sup>	104 M	0,3-100	18

† 1 cP avec l'adaptateur ULA. 15 cP avec les mobiles standard sur LV.  
†† La viscosité maximale est obtenue avec un mobile optionnel RV/HA/HB-1



## CARACTÉRISTIQUES ET AVANTAGES

Viscosimètre numérique économique

Facilité d'utilisation :

- Positionnez le commutateur
- Tournez le bouton

Aucun calcul requis - affichage direct de la viscosité en cP ou en mPa·s

18 vitesses pour une grande capacité de plages de mesure

Précision :  $\pm 1,0$  % de la plage de mesure

Reproductibilité :  $\pm 0,2$  %



## APPLICATIONS

Prendre en compte l'application et la plage de viscosité pour choisir un modèle (LV, RV, HA, HB)

### MODÈLE LV - FAIBLE VISCOSITÉ

Adhésifs (à base de solvant)	Latex
Fluides biologiques	Huiles
Produits chimiques	Peintures et revêtements
Cosmétiques	Produits pharmaceutiques
Produits laitiers	Photorésistant
Cires chaudes	Solutions de polymères
Encres	Solutions de caoutchouc
Jus	Solvants

### MODÈLE RV - VISCOSITÉ MOYENNE

Adhésifs (bain de fusion)	Peintures
Asphalte (SHRP)	Revêtements papier
Boues céramiques	Pâte à papier
Crèmes	Plastisols
Produits laitiers	Amidons
Produits alimentaires	Revêtements de surface
Gommes	Dentifrice
Encres (sérigraphie)	Vernis
Organisols	

### MODÈLE HA/HB - VISCOSITÉ ÉLEVÉE

Asphalte	Pâtes
Matériaux de calfeutrage	Beurre de cacahuètes
Chocolat	Mastic
Époxys	Matériaux de couverture
Gels	Matériaux d'étanchéité
Encres	Préimprégné
(pour stylos à bille, offset, lithographie)	
Mélasses	Goudrons



## QUE COMPREND-IL ?

1 instrument

6 mobiles (RV/HA/HB) (p50)

ou 4 mobiles (LV) (p50)

1 étrier\*

Pied de laboratoire (Modèle A)

Mallette de transport

\*Non disponible avec les versions HA ou HB



## ACCESSOIRES OPTIONNELS

Étalons de viscosité (p48)

Mobile RV/HA/HB-1 (p50)

Bain thermostatique (p29)

Adaptateur SSA(p34)

Adaptateur faible viscosité ULA (p36)

Système Thermosel (p32)

Adaptateur Spiral (p40)

Adaptateur DIN (p40)

Raccords Quick Connect et Extension (p55)

Mobile à ailettes (p39 et 53)

Affichage

DONNÉES AFFICHÉES

Sortie

PROGRAMMES INTÉGRÉS

Numérique

Numérique

Numérique

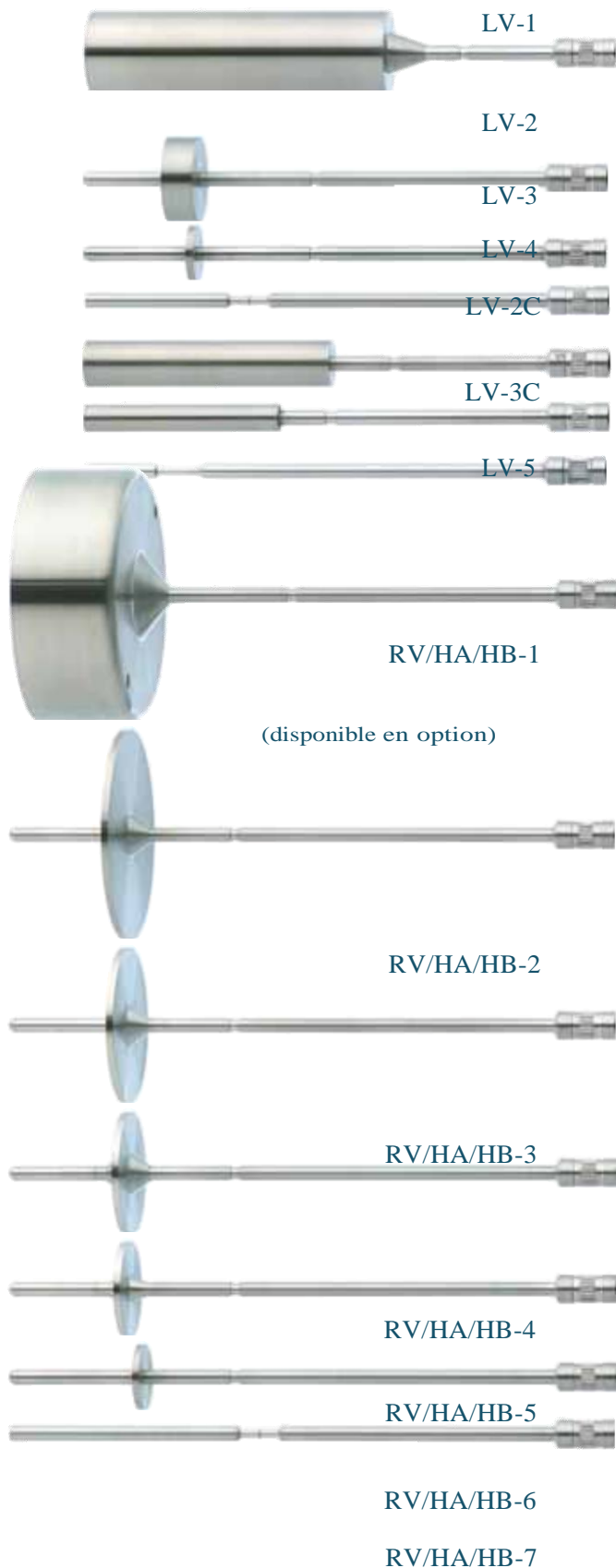
Numérique

M = 1 million K = 1 millier V = variable O = optionnel P = poises  
cP = Centipoises mPa·s = milliPascals/seconde AS = Spécifique à l'application N/A = non applicable

Remarque : 1. Spécifier la tension et la fréquence à la commande.

2. L'étrier n'est pas fourni avec les modèles HA/HB. 3. Les modèles RV/HA/HB sont fournis avec les mobiles #2 à #7.

# MOBILES



## Mobiles LV cP(mPa·s)

MOBILE	PLAGE*
LV-1	15 - 20 K
LV-2	50 - 100 K
LV-3	200 - 400 K
LV-4	1 K - 2 M
LV-5	2 K - 4 M
LV-2C	50 - 100 K
LV-3C	200 - 400 K

\* Basée sur les vitesses des modèles LV standard 0,3 - 60 tr/min M = 1 million K = 1 millier  
 Remarque : Modèles LV-1 à LV-4 fournis avec les instruments LV.  
 Mobile optionnel LV-5 conçu pour élargir la plage de mesure.

Mobiles optionnels LV-2C et LV-3C « cylindriques » permettant le calcul du gradient de vitesses  
 Mobiles LV et RV/HA/HB fournis en acier inoxydable 302.  
 Mobiles optionnels en inox 316 ou avec revêtement Téflon disponibles pour les applications  
 en milieu corrosif ou présentant une incompatibilité matérielle.

## Mobiles RV/HA/HB cP(mPa·s)

MOBILE	PLAGE*		
	MODÈLE RV	MODÈLE HA	MODÈLE HB
RV/HA/HB-1**	100 - 20 K	200 - 40 K	800 - 160 K
RV/HA/HB-2	100 - 80 K	200 - 160 K	800 - 640 K
RV/HA/HB-3	100 - 200 K	200 - 400 K	800 - 1,6 M
RV/HA/HB-4	200 - 400 K	400 - 80 K	1,6 K - 3,2 M
RV/HA/HB-5	400 - 800 K	800 - 1,6 M	3,2 K - 6,4 M
RV/HA/HB-6	1 K - 2 M	2 K - 4 M	8 K - 16 M

RV/HA/HB-7 4 K - 8 M 8 K - 16 M 32 K - 64 M

\* Basée sur les vitesses standard des modèles RV/HA/HB : 0,5 - 100 tr/min M = 1 million K = 1 millier

Remarque : les modèles LV et RV/HA/HB sont fournis en acier inoxydable 306  
 Des mobiles en acier inoxydable 316 ou avec revêtement Téflon sont disponibles en option  
 pour les fluides corrosifs et les situations d'incompatibilité matérielle  
 \*\* Ce mobile est proposé en option



Le jeu de mobiles RV/HA/HB contient les mobiles #2 à #7 et est fourni avec les viscosimètres et rhéomètres Brookfield standard.

Le mobile #1 est disponible en option.

Un support de rangement pour mobiles est également disponible en option avec les jeux de mobiles LV et RV/HA/HB.



**TÉL. +33 (0) 1 48 09 66 11**  
**FAX. +33 (0) 1 48 09 98 65** [WWW.LABOMAT.COM](http://WWW.LABOMAT.COM)

# **Annexe 4**

# Broyeurs planétaires à billes PM 100, PM 200

*Nouveauté!*

Grandes finesses en un minimum de temps

Les nouveaux broyeurs planétaires à billes RETSCH sont utilisés partout où les finesses doivent répondre aux exigences les plus sévères. Outre les procédés de mélange et opérations de broyage classiques, les broyeurs planétaires à billes PM 100 et PM 200 remplissent également toutes les exigences techniques d'un broyage colloïdal et disposent du niveau d'énergie nécessaire pour effectuer par exemple une opération d'alliage mécanique.

Associés au bol de broyage « confort », les nouveaux broyeurs planétaires à billes RETSCH offrent un maximum de rendement, de sécurité et de fiabilité.

## Supériorité technique – des avantages convaincants

- Finesse très élevée allant jusqu'au domaine du sous-micron
- Niveau d'énergie supérieur de 50 % maximum au broyeur planétaire comparable pour un broyage optimal même des produits les plus difficiles
- Même les grands bols sont utilisables, 1 x 500 ml (PM 100), 2 x 125 ml (PM 200)
- Quantité élevée d'échantillons traités grâce à des volumes de matière importants et des temps de broyage courts
- Egalement adaptés à des essais d'endurance et à une marche continue
- Résultats reproductibles par régulation de la vitesse de rotation
- Paramétrage confortable par afficheur graphique et commande ergonomique à bouton unique
- 10 combinaisons de paramètres mémorisables dans l'appareil
- Broyage sans contamination grâce à des bols réalisés en 6 matériaux différents
- Appareil de table au fonctionnement silencieux grâce à l'équilibrage optimal et au centrage précis des bols de broyage
- Boîtier de sécurité en matière plastique avec fermeture automatique du couvercle
- Dispositif de serrage de sécurité breveté avec blocage automatique pour un serrage simple et sûr du bol
- Ventilation forcée de la chambre de broyage, convient par conséquent également aux broyages avec des solvants

**labo and Co**  
www.laboandco.com

N° indigo : 08 20 20 16 16

**tsch**<sup>®</sup>  
illing & Steiving

# Broyeurs planétaires à billes

## PM 100, PM 200

Les broyeurs planétaires à billes RETSCH broient et mélangent des matériaux mous, de dureté moyenne à extrêmement élevée, cassants et fibreux. Ils permettent également d'effectuer des broyages à sec ou humides. Les minéraux, minerais, alliages, produits chimiques, le verre, la céramique, les morceaux de plantes, les sols, les boues de curage, les déchets ménagers et industriels de nombreux autres substances peuvent être broyés facilement, rapidement et sans pertes. Les broyeurs planétaires à billes sont utilisés avec succès dans presque tous les domaines de l'industrie et de la recherche, notamment là où les exigences de pureté, de

rapidité, de finesse et de reproductibilité sont particulièrement élevées.

Les forces centrifuges extrêmement élevées des broyeurs planétaires engendrent une énergie de broyage particulièrement puissante qui se traduit par des temps de broyage courts.



Broyeur planétaire à billes PM 100



Broyeur planétaire à billes PM 200

Les nouveaux broyeurs planétaires à billes existent en deux variantes:

- Le PM 100 – le modèle de table pratique avec un point de broyage pour bols de 50 à 500 ml.
- Le modèle de table PM 200 avec deux points de broyage pour bols d'un volume nominal de 50 ou de 125 ml.

Le moteur performant, qui ne nécessite aucun entretien des broyeurs, garantit une vitesse de rotation au réglage constant, même en marche continue, avec des essais d'endurance et une charge maximale.

### Nouvelle technique pour un maximum de confort d'utilisation

Les broyeurs offrent un nouveau système de guidage de l'utilisateur très confortable qui lui permet d'entrer et de consulter tous les paramètres intéressants sur un afficheur graphique à commande avec bouton unique:



- Vitesse de rotation
- Temps de broyage
- Inversion de marche avec indication du temps de marche et de repos
- Heure de départ
- Temps de marche restant
- Indication du coefficient d'utilisation du moteur
- Heures de service
- Messages d'erreurs en texte clair
- Intervalles de maintenance

10 combinaisons de paramètres de vitesse de rotation, de temps de broyage et d'intervalles peuvent être mémorisées pour les opérations de broyage récurrentes.

Le système de guidage graphique est multilingue.

Caractéristiques de performance	PM 100	PM 200
Domaine d'application	Broyage, mélange, homogénéisation, broyages colloïdaux, alliage mécanique	
Matériaux	Mou, dur, cassant, fibreux, sec ou humide	
Taille initiale	<10 mm	<4 mm
Finesse finale*	<1 µm	<1 µm
pour des broyages colloïdaux	<0,1 µm	<0,1 µm
Volume du bol	« confort »	« confort »
	50 / 125 / 250 / 500 ml	50 / 125 ml
Volume utile (mouture et billes) avec des bols empilés	1 x 300 ml maxi 2 x 30 ml maxi	2 x 80 ml maxi -
Nombre de points de broyage	1	2
Rapport de la vitesse de rotation réglé	1 : -2	1 : -2
Vitesse de rotation maxi de la roue solaire	100 - 650 t/min	100 - 650 t/min
Diamètre efficace de la roue solaire	141 mm	141 mm
*selon le matériau utilisé		
Données techniques		
Puissance absorbée	env. 1250 W (VA)	env. 1250 W (VA)
L x H x P	630 x 468 x 415 mm	630 x 468 x 415 mm
Poids net	env. 80 kg	env. 72 kg
Valeurs des émissions sonores (mesure du niveau sonore DIN 45635-31-01-KL3)		
Émission au poste de travail	L <sub>PAeq</sub> jusqu'à 85 dB(A)	L <sub>PAeq</sub> jusqu'à 80 dB(A)
selon le matériau, le volume du bol, le remplissage de billes et la vitesse de rotation choisie		

# Les bols de broyage Retsch garantissent des résultats de broyage optimaux

Le choix des bols et leur remplissage de billes déterminent le rendement et le résultat du traitement. Les bols sont sélectionnés en fonction du volume d'alimentation et des exigences à remplir par la finesse finale à atteindre et par la pureté de la mouture destinée aux analyses ultérieures.

Pour le broyage grossier, on utilisera principalement de grosses billes et pour des finesses finales élevées de petites billes. Plus la densité du matériau des billes est élevée, plus l'énergie de broyage est forte. Etant donné que l'abrasion lors du broyage est souvent difficile à éviter, le matériau pour les bols et les billes doit être choisi de manière à ne pas perturber l'analyse

ultérieure. Des garnitures de broyage, réalisées avec des céramiques haute performance comme le corindon fritté et l'oxyde de zirconium à résistance élevée à l'usure par abrasion, ont une durée de vie élevée pour une abrasion minimale.



## Matériaux

Les bols « confort » sont livrables dans les 6 matériaux suivants:

- Agate
- Corindon fritté
- Oxyde de zirconium
- Acier inoxydable
- Acier spécial
- Carbure de tungstène

## Les avantages uniques des bols de broyage « confort »

- Maniement extrêmement simple et sûr
- Ajustement sans glissement grâce à une protection antitorsion intégrée et un cintrage conique du fond
- Version étanche aux gaz et à la poussière par un anneau torique
- Bords de saisie sur le bol et le couvercle faciles à utiliser
- Ouverture simple grâce à l'écartement entre le bol et le bord du couvercle
- Enveloppe de protection en acier inoxydable (pour les bols en agate, corindon fritté, oxyde de zirconium et carbure de tungstène)
- Repérage du bol (référence, matériau et volume)
- Surface libre pour l'inscription (par ex. indications relatives à la mouture)

La gamme de bols « confort » a été conçue spécialement pour des conditions d'essai extrêmes telles qu'essais d'endurance, charges mécaniques élevées et vitesses de rotation maximales, ainsi que pour l'alliage mécanique.

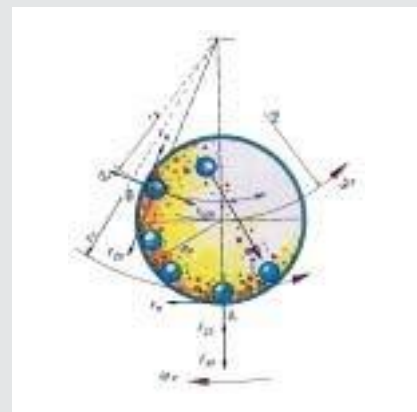
Degré de remplissage des bols – valeurs indicatives pour la quantité de matière et les billes

Bols « confort »	Volume utile (mouture et billes)	Taille initiale maxi		Remplissage de billes recommandé			
				Ø 40 mm	Ø 30 mm	Ø 20 mm	Ø 10 mm
50 ml	5 - 30 ml	<3 mm	■ ■	-	-	3 pcs.	10 pcs.
125 ml	15 - 80 ml	<4 mm	■ ■	-	-	6 pcs.	25 pcs.
250 ml	25 - 150 ml	<6 mm	■ -	-	5 pcs.	12 pcs.	50 pcs.
500 ml	75 - 300 ml	<10 mm	■ -	4 pcs.	8 pcs.	20 pcs.	100 pcs.

## Technique des broyeurs planétaires à billes

Les mouvements de rotation superposés (en sens contraire) effectués par rapport à la roue solaire engendrent des mouvements des billes de broyage qui libèrent des énergies de broyage élevées. Les billes de broyage sont d'abord entraînées dans le sens du bol et se détachent de la paroi de celui-ci sous l'effet des forces centrifuges. Ceci entraîne des différences de vitesse entre les billes

les billes lors de la progression du mouvement rotatif, celles-ci se détachent de la paroi du bol. Elles décrivent une trajectoire à travers le bol et viennent frapper la mouture de la paroi opposée du bol en libérant des forces d'impact extrêmement dynamiques. L'interaction des forces d'impact et de friction se traduit par le degré de broyage élevé des broyeurs planétaires à



## Données de commande

Broyeurs planétaires à billes PM 100, PM 200				Réf.
PM 100 (bols et billes sont à commander séparément)				
PM 100	pour 230 V, 50/60 Hz	avec 1 point de broyage	rapport de vitesse de rotation réglé 1 : -2	20.540.0001
PM 100	pour 110 V, 50/60 Hz	avec 1 point de broyage	rapport de vitesse de rotation réglé 1 : -2	20.540.0002
PM 100	pour 120 V, 50/60 Hz	avec 1 point de broyage	rapport de vitesse de rotation réglé 1 : -2	20.540.0003
PM 200 (bols et billes sont à commander séparément)				
PM 200	pour 230 V, 50/60 Hz	avec 2 points de broyage	rapport de vitesse de rotation réglé 1 : -2	20.640.0001
PM 200	pour 110 V, 50/60 Hz	avec 2 points de broyage	rapport de vitesse de rotation réglé 1 : -2	20.640.0002
PM 200	pour 120 V, 50/60 Hz	avec 2 points de broyage	rapport de vitesse de rotation réglé 1 : -2	20.640.0003

Bols « confort » pour PM 100 et PM 200					Réf.
Bols « confort »	50 ml	125 ml	250 ml*	500 ml*	
Agate	01.462.0139	01.462.0136	01.462.0220	01.462.0225	
Corindon fritté	01.462.0153	01.462.0152	01.462.0221	01.462.0226	
Oxyde de zirconium	01.462.0188	01.462.0187	01.462.0219	01.462.0227	
Acier inoxydable	01.462.0149	01.462.0148	01.462.0223	01.462.0228	
Acier spécial	01.462.0145	01.462.0144	01.462.0224	01.462.0229	
Carbure de tungstène	01.462.0156	01.462.0155	01.462.0222	-	

\*non disponible pour PM 200

Accessoires et pièces de rechange pour bols « confort »					Réf.
Adaptateur pour l'empilage de bol « confort », 50 ml*					
Pour bols « confort », 50 ml en acier inoxydable ou spécial				03.025.0002	
Pour bols « confort », 50 ml en agate, corindon fritté, oxyde de zirconium ou carbure de tungstène				03.025.0003	
Couvercle de bol pour le gazage					
Pour bols « confort », 250 ml en acier inoxydable				22.107.0005	
Pour bols « confort », 250 ml en carbure de tungstène				22.107.0006	
Pour bols « confort », 500 ml en acier inoxydable				22.107.0007	
Système de verrouillage de sécurité pour bols « confort »					
Pour opérations de remplissage et de vidange sous atmosphère inerte dans une « confort » ou broyages avec des solvants					
Pour bols « confort », 50 ml				22.867.0002	
Pour bols « confort », 125 ml				22.867.0003	
Pour bols « confort », 250 ml				22.867.0004	
Pour bols « confort », 500 ml				22.867.0005	
Pièces de rechange pour bols « confort »					
Anneau torique de rechange, Viton				05.114.0057 05.114.0056 05.114.0055 05.114.0054	
Étiquettes de rechange, 25 étiquettes				22.148.0002 22.148.0002 22.148.0001 22.148.0001	

\*non disponible pour PM 200

Billes de broyage					Réf.
Billes de broyage	10 mm Ø	20 mm Ø	30 mm Ø	40 mm Ø	
Agate, polie	05.368.0067	05.368.0028	05.368.0065	05.368.0064	
Corindon fritté	05.368.0021	05.368.0054	05.368.0053	05.368.0052	
Oxyde de zirconium	05.368.0094	05.368.0093	05.368.0092	05.368.0091	
Acier inoxydable	05.368.0063	05.368.0062	05.368.0061	05.368.0060	
Acier spécial	05.368.0059	05.368.0033	05.368.0057	05.368.0056	
Carbure de tungstène	05.368.0071	05.368.0070	05.368.0069	05.368.0068	
Billes de broyage pour broyage colloïdal			2 mm Ø	3 mm Ø	
Oxyde de zirconium, stabilisé à l'yttrium, fût = 500 g			05.368.0089	05.368.0090	

**labo and Co**

[www.laboandco.com](http://www.laboandco.com)

N° indigo : 08 20 20 16 16

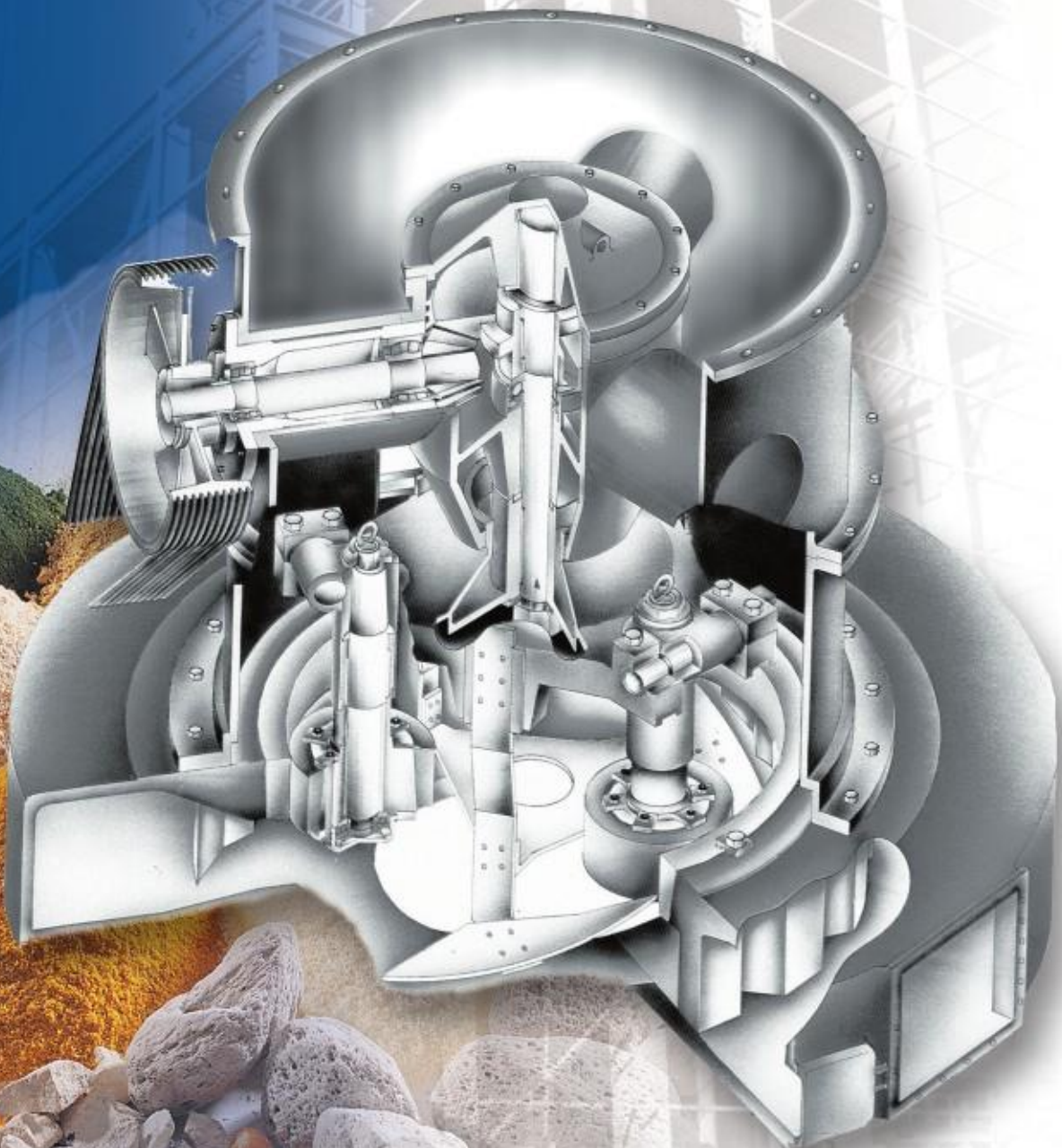
© 2001-2004 laboandco.com - Tous droits réservés

# **Annexe 5**



*Broyeurs*  
**POITTEMILL**

# **BROYEUR PENDULAIRE ROLLER MILL**



**POITTEMILL / FORPLEX**  
G R O U P E  
POITTEMILL INGENIERIE





## BROYEUR

## PENDULAIRE

Le broyeur pendulaire POITTEMILL est constitué par un arbre vertical sur lequel est fixée une étoile supportant un certain nombre de pendules. Sur ces pendules, sont montés, à la partie basse, des galets libres tournant autour de leur axe.

- Sur le broyeur à commande par le haut, l'arbre vertical est entraîné par l'intermédiaire d'un couple d'engrenage conique commandé par un arbre horizontal moteur et une transmission poulie courroies.

- Sur le broyeur à commande par le bas, l'arbre vertical est entraîné par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse avec coupleur hydraulique classique ou à vitesse variable.

Par suite de la rotation de l'ensemble, les galets montés sur les arbres pendulaires sont appliqués par la force centrifuge sur une couronne de roulement fixe. Les broyeurs pendulaires peuvent être équipés de 2 à 6 pendules. Le nombre d'organes broyants est défini en fonction de la quantité de production (T/h), de la dureté des produits et surtout de la forme de la courbe granulométrique recherchée.

La matière à pulvériser, dont la granulométrie peut atteindre 50 mm, est introduite dans l'appareil par l'intermédiaire d'un alimentateur alvéolaire. Tombant dans le fond du broyeur, celle-ci est reprise par des socs qui, tournant avec les pendulaires, projettent la matière entre les galets et le chemin de roulement fixe, pour être finement écrasée. Une alimentation suffisante assure la présence d'une couche continue de matière entre les galets et la couronne de roulement.

La base du broyeur est aménagée pour recevoir un certain volume d'air provenant d'un ventilateur. La distribution de cet air est assurée par des aubes orientées provoquant un tourbillon qui, traversant de bas en haut la chambre de broyage, entraîne les grains broyés. La chambre de broyage dont les dimensions sont relativement importantes constitue un premier sélecteur.

Le courant d'air chargé des grains broyés arrive dans un sélecteur ou séparateur réglé de manière à ne laisser passer que les particules ayant atteint la finesse demandée, les autres particules retombant par gravité dans le broyeur. Les grains pulvérisés à la finesse requise, sélectionnés par le séparateur et entraînés par le circuit d'air, sont transportés ensuite dans un cyclone ou un filtre à la base duquel ils sont recueillis.

Un ensemble de tuyauteries dont les sections sont calculées pour limiter au maximum les pertes de charge, et tracé pour éviter tout dépôt de matière, relie les différents appareils de l'installation. L'ensemble de l'installation du circuit de broyage fonctionne en dépression.

Lorsqu'il est utilisé dans le broyage des produits convenant à sa fonction spécifique, le broyeur pendulaire possède sur les autres broyeurs les avantages suivants :

- ⊕ Faible temps de séjour du produit dans les organes broyants.
- ⊕ Ventilation intérieure plus importante que dans les autres types de broyeur.

Ces deux points se traduisent par les avantages suivants :

- ⊕ Broyage ménagé permettant d'aboutir à la finesse voulue avec le minimum de création d'extra-fins.
- ⊕ Consommation d'énergie plus faible.
- ⊕ Ajustements et réglages plus faciles et efficaces.

En ce qui concerne les extra-fins, il est important de signaler tout ce qu'implique dans un broyeur leur création excessive.

Il est recommandé dans toute opération de broyage, d'éviter la réduction des grains ayant atteint la finesse prévue : aller au-delà, serait accroître inutilement le prix de revient de l'opération. On peut dire qu'un surbroyage de fines, consomme relativement plus d'énergie que le broyage lui-même à la maille désirée, et ceci par la baisse de rendement mécanique des organes broyants. On a constaté en effet, que les particules impalpables font obstacles à l'action de broyage elle-même en recouvrant, sous l'effet de charges électrostatiques, les corps broyants d'une pellicule, qui douée d'une certaine élasticité, amortit l'action du corps broyant.

Il est donc très important dans toute action de réduction, de pouvoir enlever les particules aussitôt la taille désirée atteinte, même avant qu'elle soit atteinte, un deuxième passage dans les organes broyants étant toujours possible par l'action du séparateur.

Dans le cas du broyage à sec pendulaire, cet enlèvement précoce des particules est obtenu par un balayage d'air énergétique, que permet la conception de ce broyeur ne comportant pas de charge intérieure. Il est à noter d'autre part que le phénomène de charge électrostatique des impalpables est un phénomène constaté seulement dans les broyeurs à boulets, travaillant par voie sèche. Il prend son origine dans la zone finale du tube, là où se trouve la plus grande quantité d'impalpables à rapport surface/masse élevée.

Dans le broyeur pendulaire, le temps de séjour est trop court pour permettre de tels phénomènes, et la quantité d'extrafins engendrée est en fait beaucoup plus faible. Ceci explique donc le meilleur rendement et le meilleur aspect des courbes granulométriques obtenues.

Nous pensons que, face à la diversité des problèmes de broyage, il est possible, pour un certain nombre d'entre eux, de réaliser des solutions adaptées, permettant des économies sérieuses d'investissement, d'énergie absorbée, de prix de revient d'exploitation.

Chaque fois que ces solutions sont possibles, il est de l'intérêt, donc du devoir de l'exploitant ou du concepteur d'installation de les promouvoir et d'écarter des solutions rigides souvent appliquées uniquement du fait de leur "traditionnalité".

## ROLLER

## MILL

The POITTEMILL roller mill is made up of a vertical shaft on which a star wheel, bearing a number of pendulums is keyed. On the pendulums are mounted the grinding rollers.

- On the mill, driving by the upper, the main vertical shaft is driven by a conical gearset which is in turn commanded by a horizontal drive shaft with V. Belts transmission.

- On the mill, driving by the lower, the main vertical shaft is driven by intermediary of speed-reducer and hydraulic coupling classic or speed-variable.

The grinding action results of the centrifugal force applying rollers to the inside of a static ring. The roller mill can be fitted with 2 up to 6 pendulums. The number of grinding rollers depends on the output (T/h), products hardness and mainly the shape of the required mesh size distribution.

The raw material, size of which may reach 50 mm, is put into the machine at the proper rate, through the feeder and falls to the mill bottom. There it is scooped up by rotating plows set at an angle in front of each roller and is thrown in the form of a continuous stream between the roller and the ring where grinding actually takes place.

Air enters the mill through a number of tangential ports located in the base under the grinding ring and sweeps the fines and medium fines upward. The grinding chamber, dimensions of which are relatively important, constitutes a first classifier.

Then the mixture air-particles enters the classifier which is set above the grinding chamber and which classifies the ground material and continuously returns the oversize to the grinding chamber for further reduction. Fine material which has been reduced to specification is carried to the cyclone collector or the air-filter where air and product are separated and the material discharged.

A set of pipes, designed to eliminate loss of pressure and to avoid any deposit of material, connects the different parts of the plant (cyclone, mill, fan...).

The whole plant is operating under negative pressure.

When used for grinding of products for specific purposes the roller mill has the following advantages over other grinders:

- ⊕ Low residence time of the product in the crushing section.
- ⊕ Internal ventilation greater than in other types of grinder.

These two points are reflected in the following advantages:

- ⊕ Controlled crushing, making it possible to reach at the required fineness with a minimum production of extra-fines.
- ⊕ Lower energy consumption.
- ⊕ Adjustments and control easier and more effective.

As far as the extra-fines are concerned it is important to point out what their production in a grinder involves.

It is recommended that, in all grinding operations, care be taken to avoid the reduction of those particles which have already reached the required fineness: to go beyond this point is to increase the cost of the operation unnecessarily. It can be said that overgrinding of fines consumes relatively more energy than grinding to the required mesh size, and this is shown in the reduction of the mechanical yield of the grinding components. It is found in practice that these very small particles inhibit the grinding action by coating the grinding units, by electrostatic attraction, giving them a degree of elasticity which damps the grinding action.

It is therefore very important in every reduction activity to be able to remove the particles as soon as the required size is reached, or even before it is reached, a second passage through the grinding components always being possible by using a classifier.

In the case of dry grinding in a roller mill this early removal of the particles is obtained by a flow of air which allows the design of a crusher which does not have an internal load. It should also be noted that the phenomenon of electrostatic attraction of the fine particles is a phenomenon which is noted only in ball mills operating dry. It originates in the final zone of the tube where the largest quantity of ultra-fines are found with a high surface area/volume ratio.

In a roller mill the residence time is too short to allow such phenomena to build up, and the quantity of extra-fine particles produced is therefore much lower. This therefore explains the better efficiency and the better appearance of the particle size distribution curves obtained.

We feel that, faced with the diversity of grinding problems, it is possible in a certain number of them to produce solutions which make it possible to effect major economies in investment costs, in the energy consumed and in the operating costs.

Whenever such solutions are possible it is to the operator or designer of the installation to use them, and to avoid the more rigid solutions which are often applied solely because they are the traditional ones.

## CLASSIFICATION GRANULOMÉTRIQUE

Dans toute opération de broyage il est nécessaire de procéder à une opération qui consiste à séparer les grains trop gros des particules ayant atteint le degré de finesse désiré. Cette opération entre les particules suffisamment et insuffisamment broyées s'appelle "la classification granulométrique".

Si la finesse demandée est relativement peu poussée, grains de l'ordre de 0,3 mm à 5 mm, la séparation pourra être effectuée par criblage ou tamisage. Pour des finesses plus grandes, il sera nécessaire d'utiliser notre système de séparation par l'air, utilisant soit les séparateurs pneumatiques statiques du type cône inverse ou du type double cône, soit les séparateurs pneumatiques dynamiques du type dynair ou de 3<sup>ème</sup> génération. Quels que soient les produits broyés, POITTEMILL choisira et dimensionnera l'appareil de classification en fonction des paramètres définis par le client : débit, finesse, humidité.

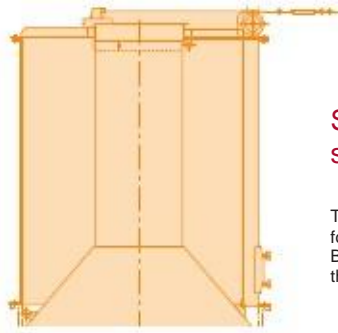
## CLASSIFYING

In every process of grinding it is necessary to proceed to an operation which consists in separating coarse particles from particles having reached the desired fineness. This operation is called "classifying".

If the particle size required is relatively large, particles from about 0,3 mm to 5 mm, classifying can be carried out by screening or sieving. If a smaller particle size is required, then an air classifying device is necessary, either the static air-classifier single cone type or double cone type, or the dynamic air classifier dynair type or the High Efficiency classifier type (Third generation classifier).

### Classificateur granulométrique type cône inverse

Le séparateur type cône inverse convient pour la sélection des grains de l'ordre de 800 à 120 microns. Basé sur l'utilisation de la détente, ils sont alimentés en air par le ventilateur du circuit principal.

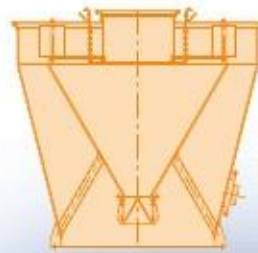


### Static air classifier single cone type

The static air classifier single cone type is suitable for finesses ranging from 800 to 120 microns. Based on the use of expansion of air, they are fed by the fan of main circuit.

### Classificateur granulométrique type double cône

Le séparateur type double cône convient pour la sélection des grains de l'ordre de 600 à 40 microns. Basé sur l'utilisation de la détente et la centrifugation.



### Static air classifier double cone type

The static air classifier double cone type is suitable for finesses ranging from 600 to 40 microns. Based on the use of expansion of air and centrifugation.

### Classificateur granulométrique dynamique type Dynair (double whizzer)

Le séparateur type Dynair convient pour la sélection des grains de l'ordre de 600 à 30 microns. Basé sur l'utilisation de la détente et la centrifugation.



### Dynamic air classifier Dynair type (double whizzer)

The classifier Dynair type is suitable for finesses ranging from 600 to 30 microns. Based on the use of expansion of air and centrifugation.

### Classificateur haut rendement de 3<sup>ème</sup> génération

Classificateur à haut rendement de séparation destiné à des produits à classer entre 800 et 20 microns. Basé sur la combinaison détente-centrifugation-densimétrie. Rendement de sélection jusqu'à 95%. Possibilité d'extraire les refus du classificateur vers l'extérieur du broyeur. Possibilité d'enrichir le produit par élimination des imbroyés ou imbroyables.



### High efficiency classifier (third generation)

Classifier with high efficiency suitable for finesses ranging from 800 to 20 microns. Based on the use of expansion of air centrifugation and density. Classifying yield up to 95%. Possibility to pull out oversized particles outside the grinding chamber. Possibility to enrich the ground product by elimination of unground or ungroundable particles.

# BROYAGE ET SIMULTANÉS

# SECHAGE

L'humidité naturelle des carrières ou l'humidité résultant d'un traitement industriel fait qu'il est fréquent d'avoir à broyer des produits humides.

La séparation par l'air permet de broyer ou de pulvériser des matières premières contenant un petit pourcentage d'eau sans séchage préalable. Néanmoins, et au-delà d'une certaine teneur en eau, variable suivant les produits, il faut procéder à un séchage. Un générateur à air chaud est alors nécessaire pour fournir et amener, en un point du circuit placé en dépression, l'air chaud indispensable au séchage.

Grâce à son circuit de ventilation, le broyeur pendulaire POITTEMILL à séparation par l'air permet d'effectuer simultanément, et dans les meilleures conditions possibles, le séchage pendant l'opération de broyage. En effet, le séchage pratiqué dans ces conditions est accéléré par la ventilation dans le broyeur et le séparateur, et par le broyage lui-même qui, réduisant la dimension des grains, permet d'en atteindre plus facilement l'humidité interne.

Dans le cas du broyage avec séchage simultané, il sera nécessaire de prévoir également l'évacuation des vapeurs d'eau et de l'air en excès.

# SIMULTANEOUS GRINDING AND

# DRYING

Natural moisture of materials originated, from quarries or from a preliminary industrial treatment, made it very frequent to have to grind wet materials.

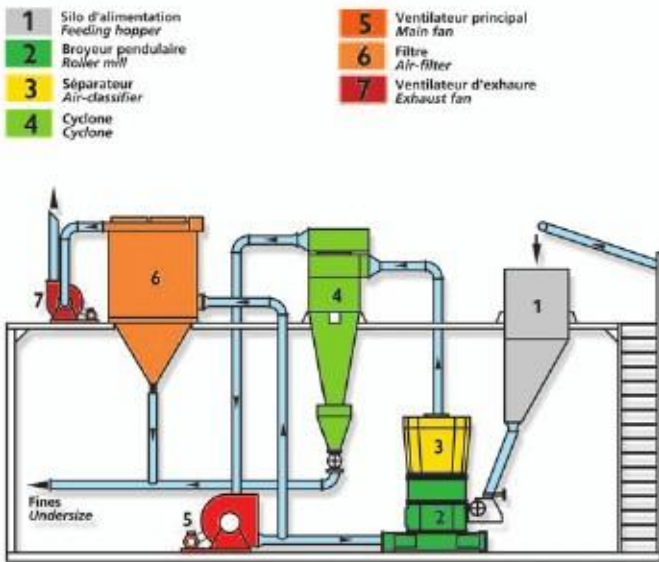
Usually due to the air classifying and lift system and to its large volumes of air, some loss of moisture occurs during the grinding operation, even though external heat is not applied to the mill. This fact enables the grinding without the application of external heat of low moisture content material.

Above a certain percent of moisture, variable with materials, an air heater becomes necessary to supply hot gas or warm air in the circuit, for more efficient drying.

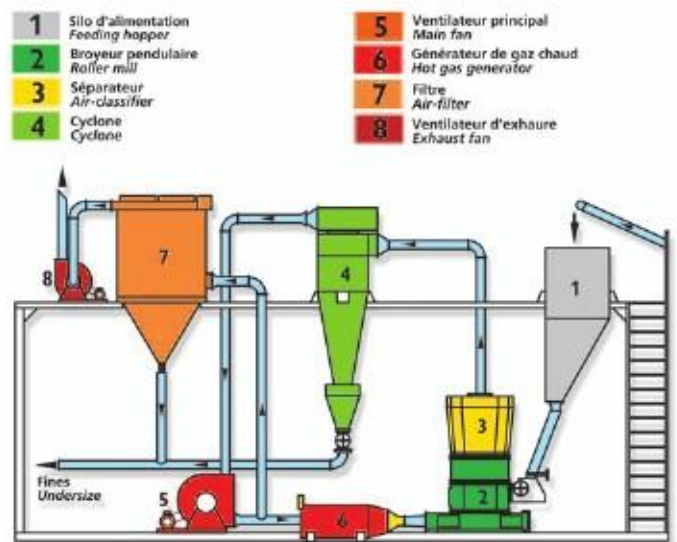
This process creates conditions for the most rapid and efficient removal of moisture. That is to say :

- 1) Moist surface exposure is maximum by the dispersion of material.
- 2) Agitation: due to the important volume of air and to high gas velocities, the vapor film is continuously swept away from moist particles.
- 3) Particle size: it is obvious that the smaller the particle, the more rapid the moisture removal. Thus the grinding occurring in the same time as the drying is particularly favourable.

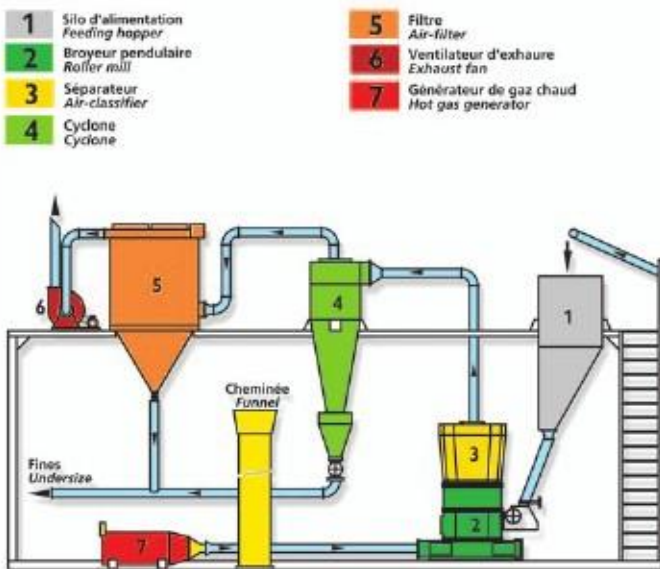
In this case, the evacuation of the water vapor and of the excess of air should also be provided for, either by a secondary cyclone or by a filter with a recovery of the dust.



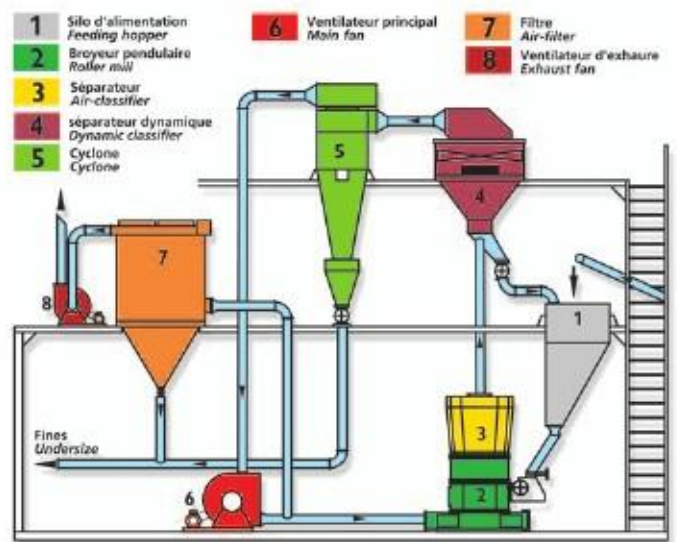
Circuit fermé standard  
Standard closed circuit



Circuit fermé avec séchage  
Closed circuit with drying



Circuit ouvert avec séchage  
Open circuit with drying



Circuit fermé à 2 étages de séparation  
Closed circuit with 2 levels of classifying

## LES BROYEURS POITTEMILL DANS L'INDUSTRIE

Argiles  
Amiante  
Anthracite  
Ardoise  
Asphalte  
Barytes  
Bauxite  
Barium  
Bentonites  
Bicarbonat de soude  
Borax  
Blanc de plomb  
Calcite  
Calcium  
Carbone  
Cendres  
Ciment  
Chaux éteinte  
Chaux vive  
Carbonates  
Charbon  
Coke  
Cobalt

Chromite  
Couleurs  
Engrais  
Email  
Feldspath  
Graphite  
Gypse  
Kaolins  
Lignites  
Magnésie  
Magnésium  
Magnétite  
Manganèse  
Marbre  
Marme  
Minerais  
Minerai de manganèse  
Minerai de fer  
Minerai de plomb  
Ocre  
Oxydes de calcium  
Oxydes de cuivre  
Oxydes de fer

Oxydes de magnésium  
Oxydes de manganèse  
Oxydes de plomb  
Oxydes de zinc  
Pierre à chaux  
Phosphates  
Phosphate de calcium  
Plomb  
Rutile  
Scorie  
Sel  
Sulfate de calcium  
Silicate d'aluminium  
Silice  
Nitrate de sodium  
Soufre  
Talc  
Terres  
Zinc  
Zircon  
...etc

## TYPICAL APPLICATIONS OF POITTEMILL ROLLER-MILL

Clays  
Asbestos  
Anthracite  
Slate  
Asphalt  
Baryta  
Bauxite  
Barium oxide  
Bentonites  
Bicarbonat of soda  
Borax  
White lead  
Calcite  
Calcium  
Carbon  
Ashes  
Cement  
Slake lime  
Quick lime  
Carbonates  
Coal  
Coke  
Cobalt

Chromite  
Colours  
Fertilizers  
Enamel  
feldspar  
Graphite  
Gypsum  
Kaolins  
Lignite  
Magnesia  
Magnesium  
Magnetite  
Manganese  
Marble  
Marl  
Ores  
Manganese ore  
Iron ore  
Lead ore  
Ochre  
Calcium oxides  
Copper oxides  
Iron oxides

Magnesium oxides  
Manganese oxides  
Lead oxides  
Zinc oxides  
Limestone  
Phosphates  
Calcium phosphate  
Lead  
Titanium oxide  
Slags  
Salt  
Calcium sulphate  
Aluminium silicate  
Silica  
Sodium nitrate  
Sulpher  
Talcum  
Earths  
Zinc  
Zircon  
...etc



## TYPESET SPECIFICATIONS

## TYPESET SPECIFICATIONS

Broyeur Type of mill	Nombre de galets Number of Roll head	Puissance installée nécessaire Kw Required installed power		Production horaire en kg approximative suivant fiabilité Hardgrove 70 - 90 à 95% de passant à la maille Hourly capacity in kg approximate in accordance with Hardgrove fiability 70 - 90 to 95% passing on sieve			
		Broyeur / mill	Ventilateur / Fan	160 microns	80 microns	50 microns	40 microns
PM.00	1	7,5	4	450	275	175	150
PM.1	2	15	7,5	1.000	550	400	300
PM.2	2	18,5	15	2.000	1.200	800	650
PM.2 R	3	22	18,5	2.500	1.500	1.000	750
PM.3	3	30	25	3.000	1.800	1.200	1.000
PM.4	3	37	30	4.000	2.400	1.600	1.300
PM.5	3	45	37	5.000	3.000	2.000	1.600
PM.8	3	75	55	8.000	5.000	3.500	2.700
PM.12	3	110	75	12.000	7.200	4.800	4.000
PM.16	3	150	110	16.000	9.500	6.500	5.300
PM.20	3	185	132	20.000	12.000	8.000	6.600
PM.25	3	220	160	23.000	14.000	9.300	7.600
PM.30	3	300	250	30.000	18.750	13.000	10.000
PM.30 R1	4	315	250	33.000	20.000	14.000	11.000
PM.30 R2	5	315	280	37.000	22.500	15.700	12.300
PM.40	3	400	315	40.000	24.000	17.000	13.000
PM.40 R1	4	400	315	43.000	26.000	18.500	14.500
PM.40 R2	5	400	355	47.000	28.000	19.500	15.500
PM.60	3	450	355	60.000	37.500	26.400	20.000
PM.60 R1	4	450	400	66.000	41.000	28.800	22.000
PM.60 R2	5	450	400	70.000	42.200	29.700	23.000
PM.80	3	560	400	80.000	48.000	33.800	26.000
PM.80 R1	4	560	450	85.000	51.000	36.000	28.000
PM.80 R2	5	560	450	90.000	54.200	38.000	30.000
PM.100	3	700	500	100.000	60.000	42.200	33.000
PM.100 R1	4	700	560	110.000	66.000	46.500	36.000
PM.100 R2	5	700	560	120.000	72.000	50.700	40.000



PM 16 - Argiles / Clays



PM 25 - Coke de pétrole / Pet coke



Dynair PM 25 - Classificateur dynamique  
Dynair PM 25 - Dynamic air classifier



PM 50



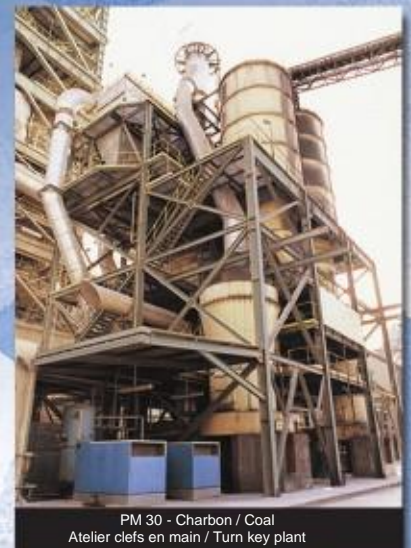
PM 30 - Phosphate / Phosphate



Service après vente / After sale service



Technoparc Futura - BP 145 - 62403 Béthune Cedex - FRANCE  
Tél. : 33 (0)3 21 57 29 87 - Fax : 33 (0)3 21 57 28 20  
<http://www.poittemill.com>  
E-mail : [poittemill@poittemill.com](mailto:poittemill@poittemill.com)



PM 30 - Charbon / Coal  
Atelier clefs en main / Turn key plant