



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا
Département Mines Et Géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : GENIE MINIER

Option : valorisation des ressources minérales

Elaboration d'un schéma de traitement du minerai de bentonite de Tlemcen

Par

.....RAHIM Taha.....etBOUZIANE Inas....

Devant le jury :

AOUATI Salim .M	Président	MAA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
KRIM Mansour	Encadreur	MAA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
AMIRECH Abdelkrim	Examineur	MCB	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En introduction à ce mémoire, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers nos chers parents. Leur patience, leur générosité et leur soutien inébranlable ont été une source constante de motivation et de bonheur, nous encourageant tout au long de ce parcours.

*Un grand merci à notre encadrant, Mr KRIM Mansour, pour sa patience
à
Notre égard et la confiance qu'il nous a accordée.*

*Un grand merci pour monsieurs AOUBATI Salim Mourad et AMIRECH
Abdelkrim d'avoir accepter juger ce modeste travail.*

Table des matières

	Page
Liste des tableaux	
Listes des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1
Chapitre I Contextes géographique et géologique de la zone d'étude	
I.1 Situation géographique	4
I.2 Topographie ,Climat et Réseau hydrographique	5
I.3 Cadre géologique locale de la région	6
I.4 Carte locale du gisement bentonitique Hammem Boughrara	7
I.5 Géologie de gisement	9
I.6 Historique des travaux géologiques et miniers	10
I.7 Méthode d'exploitation du gisement de bentonite de Hammem Boughrara	11
Chapitre II Généralités et domaines d'utilisation de la bentonite	
II.1.1 Définition des argiles	15
II .1.2 Structure des minéraux argileux	15
II 1.3 Classification des minéraux argileux	16
II.1.4 Principaux groupes de minéraux argileux	19
II.2 Propriétés des argiles	20
II.2.1 La capacité d'échange cationique (CEC)	20
II.2.2 La surface spécifique (SSE)	21
II.2.3 Capacité de gonflement	21
II.2.4 Colloïdale	22
II.2.5 La densité de charge spécifique	23
II.2.6 La capacité de fixation des éléments métalliques	23
II.3 Bentonite	23
II.3.1 Généralité sur la bentonite	23
II.3.2 Types de bentonites	23
II.3.3 Microstructure de la bentonite	24
II.3.3.1 Le feuillet	24
II.3.3.2 La particule primaire	25
II.3.3.3 L'agrégat	26
II.4 Le système bentonite-eau	27
II.4.1 Dispersion des feuillets	28
II.4.2 Rôle des cations compensateurs	29
II.4.3 Interactions dans une suspension aqueuse de bentonite	30
II.4.4 Double couche électrique	30
II.4.5 Bilan des forces d'interactions entre particules	33
II.4.6 Types d'associations des particules	33
II.5 La bentonite dans le monde	36
II.6 Les principaux usages industriels de la bentonite	37
II.6.1 La bentonite dans les boues de forage	37
II.6.2 La bentonite dans l'environnement	38
II.6.3 La bentonite en génie civil	38
II.6.4 La bentonite en fonderie	38
II.6.5 Industrie agro-alimentaire	38
II.6.6 La bentonite dans l'industrie de papier	38
II.6.7 La bentonite dans l'industrie de céramiques	38

II.6.8 La bentonite dans l'industrie des peintures	39
II.6.9 Autres utilisations de la bentonite	39
II.7 Les applications pharmaceutiques et cosmétiques	39
II.7.1 L'argile et la Bentonite dans la Pharmacie : une histoire	39
II.7.2 Utilisations modernes de la bentonite dans l'industrie pharmaceutique et cosmétique	39
II.7.2 utilisations modernes de la bentonite dans l'industrie pharmaceutique et cosmétique	39
II.7.2.1Excipients	39
II.7.2.2Utilisation des argiles en tant que substances active	40
II.7.2.3 Utilisation comme formes posologiques liquide et semi solides	41
II.7.2.4 Interactions médicamenteuses	41
II.7.2.5utilisations en cosmétique	41
Chapitre III Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé	
III.1 Processus de traitement de la bentonite de Hammam Boughrara -Maghnia	43
III.2 Valorisation des bentonites du gisement de hammam boughrara-maghnia	44
III.3 Mode opératoire	47
III.3.1Controle du tout venant	47
III.3.2 Procédure de mesure de la viscosité	47
III.3.3 Procédure de mesure de perte au filtrat	48
III.3.4 Procédure de mesure de l'humidité	48
III.3.5Indice de gonflement	49
III.3.6 les normes de bentonite de forage	
III.3.4 Résultats et discussion	51
III.3.4.1 'influence de PH sur le bentonite	51
III.3.4.21 'influence de la viscosité sur la bentonite	51
III.3.4.31 'influence de concassage	53
III.3.4.41 'influence de la teneur en carbonate	54
III.3.4.51 'influence de la température de séchage	56
Conclusion générale	63

Liste des tableaux

N° du tableau	Titre	Page
1	Les oueds de la région avec leurs superficies et leurs altitudes	5
2	Réserves des gisements bentonitiques de Hammam Boughrara, Maghnia	8
3	Evolution de la production de la bentonite de Hammam Boughrara	8
4	Classification des phyllosilicate 2 :1	20
5	Capacités d'échange des cations de quelques argiles	21
6	Surfaces spécifiques de quelques minéraux argileux	21
7	Production mondial de la bentonite : 2013-2017	37
8	Influence de concassage sur la qualité du produit final	53
9	Influence de la teneur en carbonate sur la qualité du produit final	54
10	Influence de la température de séchage sur la qualité du produit final	56
11	Critères requise des argiles bentonitiques brutes pour différentes applications industrielle	57

Listes des figures

N° de la figure	Titre	Page
1	Situation géographique de la zone d'étude.	4
2	Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Mouilah.	5
3	Localisation de la zone d'étude (Hammam bouhrara, Maghnia –Tlemcen).	7
4	Réserves des gisements d'argiles bentonitiques de Hammam Bouhrara, Maghnia.	8
5	Evolution de la Production de la bentonite de Hammam Bouhrar.	9
6	Figure 6 Dépôt Bentonitique de Hammam Bouhrara, Maghnia (Algérie).	10
7	Extraction bentonite et transport de tout-venant (carrière Roussel I).	13
8	Echantillons d'argile.	15
9	Couches tétraédriques et octaédriques.	16
10	Représentation schématique d'un feuillet de phyllo-silicate 2 :1.	16
11	Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux (cas de la kaolinite).	17
12	Classification des minéraux argileux T-O.	17
13	Classification des minéraux argileux T-O-T.	18
14.a	Capacité d'adsorption d'eau par les particules argileuses.	22
14.b	Localisation de l'eau dans les particules argileuses.	22
15	Structure multi-échelle de la montmorillonite.	24
16	Différents modes de succession des feuillets au sein d'une unité inter-stratifiée.	26
17	Les différents types d'espaces poreux.	27
18	Représentation schématique de l'état gel.	28
19	Représentation de l'espace inter-foliaire (distance basale) entre deux feuillets de montmorillonite.	30
20	Représentation schématique de la chute du potentiel de surface ψ_x et de la contraction de la double couche électrique, dues à une augmentation de la force ionique.	31
21	Sémantisation de la structure multicouches de l'interface eau-argile. La double couche électrique et l'évolution du potentiel électrique en Fonction de la distance à la particule.	32
22	Modes d'associations supposés des feuillets de montmorillonite en suspension .	34
23	Représentation schématique a) de l'organisation proposée par m'Ewen et Pratt (1957) ; b) en deux dimensions du « modèle de Bandes » proposé par Weiss et Frank (1961)	35
24	Représentation schématique multi-échelle de la structure fractale des gels de kaolinite, d'après [Pignon et al. (1998)].	36
25	Domaines industriels d'utilisation des bentonites.	37
26	Schéma de traitement (organigramme).	43
27	Flux issus de la séparation minéralurgique d'un minerai.	45
28	Influence de la teneur en carbonate de sodium sur la viscosité	55
29	Influence de la teneur en carbonate de sodium sur le PH	56
30	Influence de la température de séchage sur viscosité	57
31	Schéma de traitement proposé	59
32	Schéma de fabrication de la bentonite	60

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
E.N.O.F	Entreprise Nationale Des Produits Miniers Non Ferreux et Substances Utiles
BENTAL	Société Algérienne d'exploitation des bentonites
MEB	Microscope électronique à balayage
Bnt-brute	Bentonite brute
Mo	Montmorillonite
Al	Albite
Qz	Quartz
Il	Illite
Ca	Calcite
Or	Orthoclase
CEC	La capacité d'échange cationique
SSA	La surface spécifique
pH PZC	Point de charge nulle
SC	Capacité de gonflement
VS	Volumes de sédimentation

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

L'argile est connue comme une ressource naturelle largement répandue et peu coûteuse, utilisée dans de nombreux domaines tels que la construction, la santé, l'environnement, l'industrie du papier et la céramique, entre autres. D'un point de vue géologique, l'argile est une roche sédimentaire composée en grande partie de minéraux spécifiques, les aluminosilicates, partiellement hydratés, appelés eux-mêmes argiles. L'utilisation des matériaux argileux remonte à plusieurs siècles et leurs domaines d'utilisation sont variés et vastes. De nombreux secteurs de l'industrie utilisent l'argile, notamment la poterie, les habitations, l'agriculture, les cosmétiques et les divers traitements thérapeutiques. De nos jours, ces utilisations sont en augmentation constante grâce aux nombreuses découvertes issues des recherches récentes.

L'argile objet de cette étude est connue sous le nom de « bentonite ». Ce terme a été mentionné pour la première fois en 1898 pour décrire une argile plastique fortement colloïdale et très gonflante provenant de la région de Fort Benton dans le Wyoming, aux États-Unis d'Amérique. La bentonite peut être définie comme une poudre minérale, généralement gris-blanc, composée principalement de montmorillonite (famille des smectites) avec la présence d'illite et de kaolinite. Elle résulte de l'altération des cendres volcaniques. Les impuretés de la bentonite incluent le quartz, les feldspaths, la calcite et d'autres minéraux argileux.

La bentonite, comme la plupart des minéraux industriels, est extraite des carrières et utilisée sous diverses formes, allant de simples opérations de fragmentation (concassage) à son extraction par des méthodes physiques, chimiques ou physico-chimiques. En raison de ses multiples propriétés intéressantes, notamment la taille et la forme de ses particules, la haute capacité d'échange cationique, la grande surface spécifique, sa capacité exceptionnelle de gonflement et ses caractéristiques rhéologiques, la bentonite est aujourd'hui largement utilisée dans plusieurs domaines industriels : forage pétrolier, peintures, céramique, terres décolorantes, génie civil, agriculture, fonderie, agroalimentaire, pharmacie et cosmétique, entre autres.

L'Algérie est parmi les principaux pays producteurs de bentonite. Les plus grands gisements se trouvent dans la région ouest du pays (Maghnia et Mostaganem). Ces gisements bentoniques sont exploités depuis plus d'un demi-siècle. Chaque année, plus de 30 000 tonnes de bentonite sont extraites, dont une majeure partie est destinée à l'industrie de la fonderie et également à l'utilisation dans les boues de forage.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce projet de thèse, qui se concentre sur l'évaluation des ressources naturelles locales, en particulier la recherche d'une méthode et d'une température appropriées pour faciliter le traitement et la valorisation de la bentonite, qui est abondante dans la région de Maghnia (ouest algérien).

Ce manuscrit est composé de trois chapitres principaux.

Le premier chapitre présente le contexte géologique et géographique de la région d'étude (la région de Maghnia). La genèse de la formation des gisements de bentonite à Hammam Bouhrara a été expliquée.

Le deuxième chapitre de cette recherche, intitulé « utilisation de bentonite », est consacré à « la recherche bibliographique sur le bentonite ». Il s'agit d'une synthèse des connaissances spécifiques sur les minéraux argileux, en particulier la bentonite, y compris : les propriétés, les structures, les types de bentonites, leurs classifications, leur importance et leurs utilisations. Les

Introduction générale

différents critères fondamentaux et les exigences nécessaires à l'utilisation des argiles dans le domaine de la production des matériaux pharmaceutiques sont discutés.

Le troisième chapitre concerne la préparation et la purification de la bentonite naturelle en utilisant différentes méthodes de valorisation qui nous permettent d'éliminer un maximum d'impuretés.

À la fin de ce manuscrit, nous trouvons les résultats expérimentaux sur des échantillons de bentonite brute.

Nous concluons cette recherche par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus, les orientations et les perspectives de recherche future.

Chapitre I

Géologie et exploitation de la bentonite Hammam Bougherara

I.1 Situation géographique

Notre zone d'étude est située dans le Nord-Ouest de la République Algérienne, entre 1°36' et 1°42' de longitude Ouest, et 34°52' et 34°55' de latitude Nord. Elle se trouve à environ 30 km de la ville de Tlemcen et à 14 km de la frontière entre l'Algérie et le Maroc. Avec une superficie de 555 km², elle est délimitée au Nord et à l'Ouest par la chaîne de Fillaoussène, et au Sud par la plaine de Maghnia et les monts de Tlemcen (Figure 01) [1].

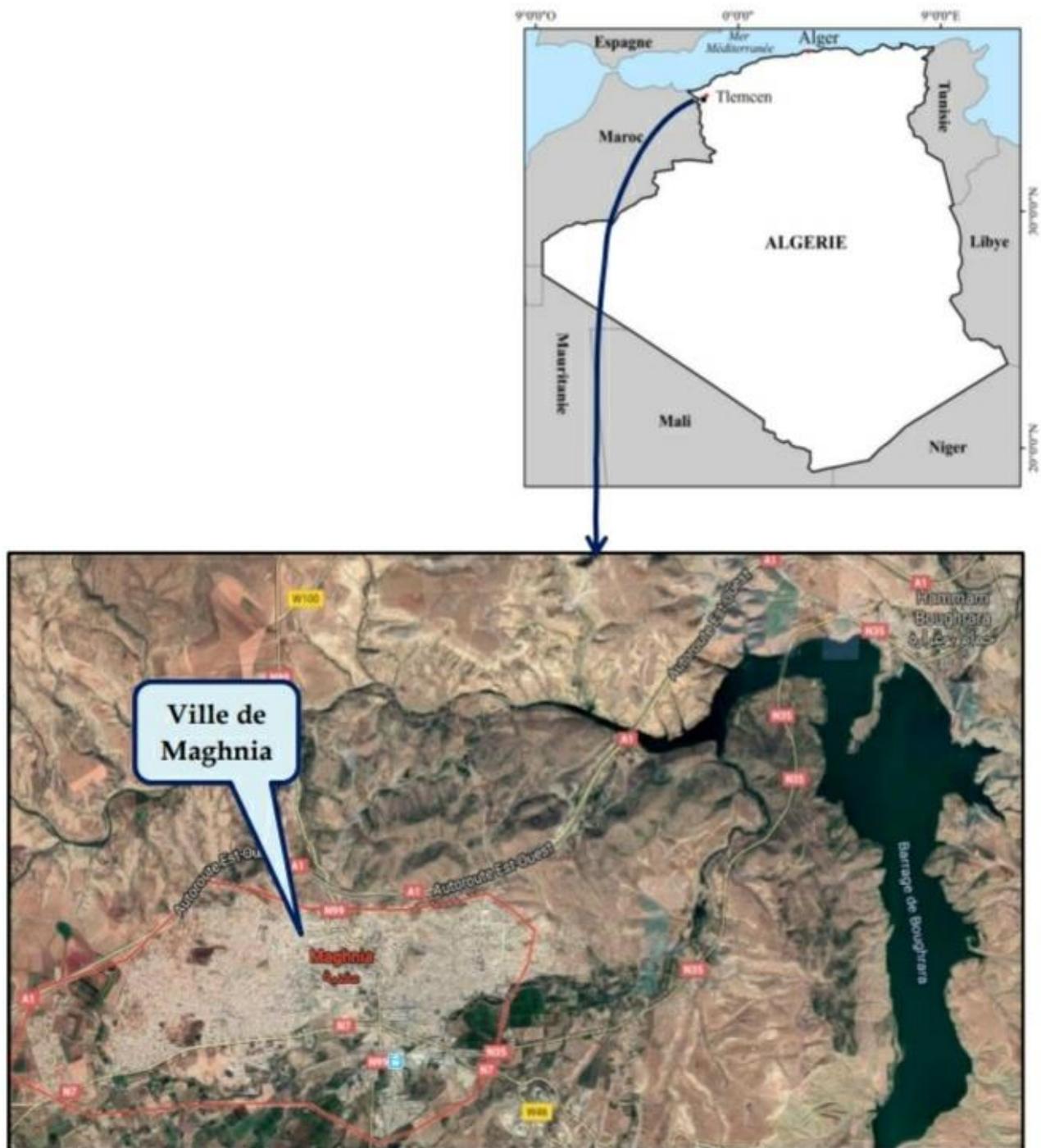


Figure 01 : Situation géographique de la zone d'étude.

I.2 Topographie, Climat et Réseau hydrographique

La plaine de Maghnia se trouve entre deux massifs atlasiques : le massif hercynien des Traras, avec son prolongement méridional, la chaîne du Fillaoussène au nord, et les monts de Tlemcen au sud. Ces massifs montagneux atteignent souvent une altitude dépassant les 1000 mètres. La plaine s'étend le long de la bordure nord du domaine des hauts plateaux, avec une altitude généralement inférieure à 500 mètres au-dessus du niveau de la mer [1].

Le réseau hydrographique de la région suit étroitement le découpage tectonostructural, formant des vallées souvent courtes et étroites. Deux principaux oueds traversent la plaine de Maghnia (Figure 02) [2]:

- L'Oued Mouilah, un important affluent rive gauche de la Tafna, prend sa source dans la région d'El Abed en Algérie à une altitude de 1250 mètres. Il traverse ensuite le Maroc sous le nom d'oued Isly, devenant intermittent, puis redevient permanent en aval de la ville d'Oujda, au Maroc, à une altitude de 490 mètres, sous le nom d'oued Bou Naïm. Il entre à nouveau en Algérie près de Maghnia, reprenant le nom d'oued Mouilah.

- L'Oued Ouardefou, qui draine les oueds El Abbès, Fouina et Mehaguène.

Ces deux oueds délimitent deux zones de drainage, l'une au nord de la ville de Maghnia comprenant la plaine des Angads dans son ensemble (Oued Mouilah), et l'autre correspondant à la plaine de Maghnia proprement dite (Ouardefou). Entre les deux, le bombement des Béni-Ouassine forme un seuil peu élevé qui empêche toute communication naturelle.

Tableau 01 : Les oueds de la région avec leurs superficies et leurs altitudes

Oueds	Mouilah	Ouardefou
Superficie du bassin versant (Km ²)	1827	612
Altitude moyen (m)	854	676

L'Oued Mouilah et l'Oued Ouardefou se rejoignent en aval de Maghnia pour former le déversoir naturel du bassin fermé de la plaine d'effondrement de Maghnia.

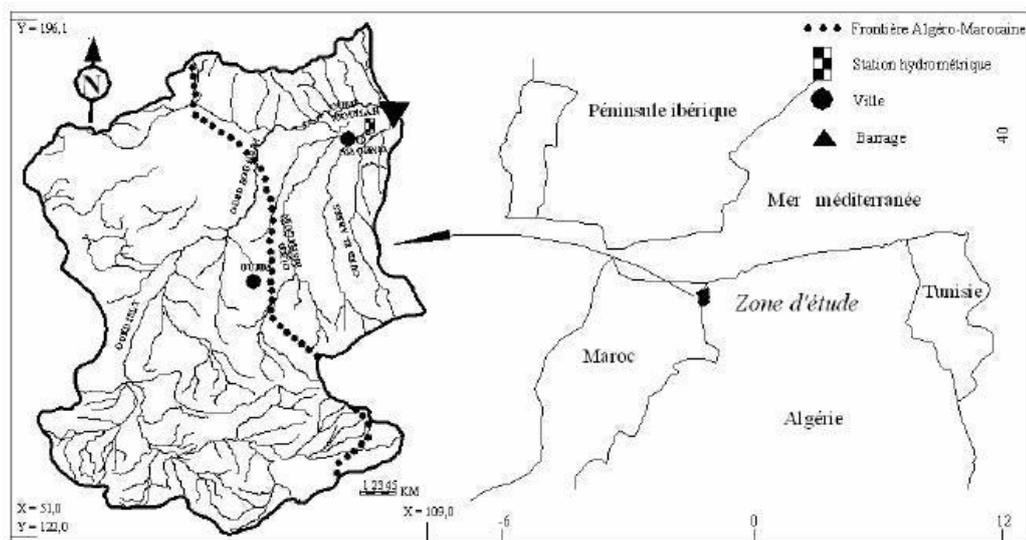


Figure 02 : Réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Mouilah

La région étudiée présente un climat méditerranéen, avec des étés chauds et secs ainsi que des hivers doux et pluvieux. Elle compte parmi les zones les plus humides d'Algérie, avec des précipitations annuelles variant entre 400 et 1000 mm. Les températures moyennes estivales et hivernales sont respectivement de 25 °C et de 11 °C. En été, le sirocco, un vent sec et très chaud appelé localement le Chehili, souffle depuis le Sahara vers le nord[6].

I.3 Cadre géologique locale de la région

La région d'étude se situe dans le nord-ouest de l'Algérie, caractérisée par des terrains néogènes formant de vastes unités géologiques comprenant deux principaux bassins : le bassin du Chéelif et celui de la Tafna. Le bassin de la Tafna, intégré à l'Oranie, s'étend le long de la bordure nord des hauts plateaux et est subdivisé en trois parties : haute, moyenne et basse Tafna. Le secteur d'étude se trouve dans le bassin de la moyenne Tafna, une dépression tertiaire ressemblant à un fossé intramontagneux, bordée par les monts de Tlemcen au sud et les Traras, le Fillaoussene (1136 m) et la partie occidentale de la chaîne de Tessala au nord. [1]

Stratigraphie

Les principaux affleurements dans cette région datent du Miocène et du Pliocène, formant un pli synclinal où les flancs exposent les grès du Jurassique supérieur, également connus sous le nom de Lusitanien. [1]

Le Miocène

Les formations miocènes affleurent le long de l'Oued Tafna, se superposant en discordance aux formations du Jurassique supérieur. Cette série miocène commence par des calcaires massifs, des marnes finement stratifiées de couleur grise, des lentilles et des couches de tufs basaltiques et de basalte. Ces formations sont surmontées par des calcaires et des filons carbonatés gris avec des intercalations de grès brun, suivis de marnes grises avec des couches gréseuses. Des argiles carbonatées de couleur gris-vert sont également présentes. Les dépôts semblent être principalement horizontaux. La séquence se termine par une couche volcano-détritique composée de rhyolites, de perlites, d'obsidiennes, de tufs pyroclastiques consolidés par endroits et de niveaux conglomératiques. Ces roches volcaniques peuvent localement se transformer en argile bentonitique.

Le Pliocène

Les formations pliocènes sont dominées par des dépôts continentaux s'étendant sur une vaste surface. Elles sont constituées de limons, de limons sableux, de sables meubles, de silstones, de grès et d'argiles sableuses avec des intercalations de calcaires. Ces formations reposent en discordance sur les terrains volcano-sédimentaires du Miocène supérieur. L'épaisseur totale des dépôts pliocènes varie de 40 à 100 mètres.

Le Quaternaire

Il s'agit de formations alluvionnaires comprenant des dépôts de gros galets et de blocs provenant des anciennes terrasses de l'Oued Tafna, avec quelques niveaux basaltiques visibles par endroits.

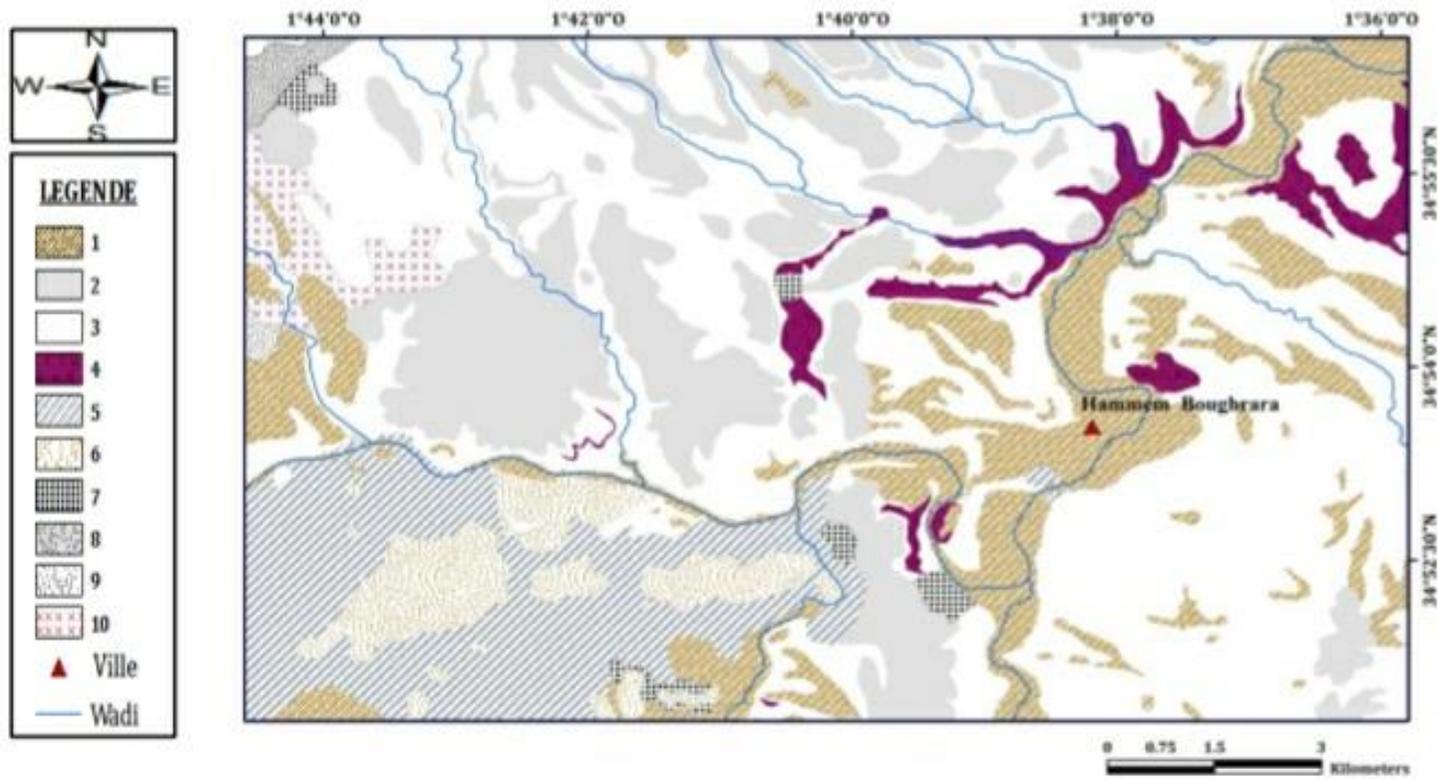


Figure 03 : Localisation de la zone d'étude (Hammam bouhrara, Maghnia - Tlemcen).

Légende :

1. Quaternaire
2. Pliocène
3. Miocène
4. Miocène supérieur
5. Oxfordien supérieur
6. Kimméridgien
- 7.Éboulis
8. Dolomite

9. Jurassique
10. Colluvion.

I.4. Carte locale du gisement bentonitique Hammem Bouhrara

Les gisements d'argiles bentonitiques brutes de Hammam Bouhrara, situés à 15 km de la ville de Maghnia, se trouvent autour d'un dôme hypovolcanique de rhyolite orienté NO-SE, formé au Miocène. Les réserves géologiques de Hammam Bouhrara sont estimées à 10,903 millions de tonnes [3].

Tableau 02 : Réserves des gisements bentonitiques de Hammam Bouhrara, Maghnia [3]

Gisements	Probable (en 10 ³ Tonnes)	Possible (en 10 ³ Tonnes)	Total (en 10 ³ Tonnes)
Dar Embarek I	1860	2860	4720
Dar Embark II	----	663	663
Roussel I*	1635	1510	3140
Roussel II	1640	740	2380
Total des réserves géologiques			10903

*Gisement en exploitation

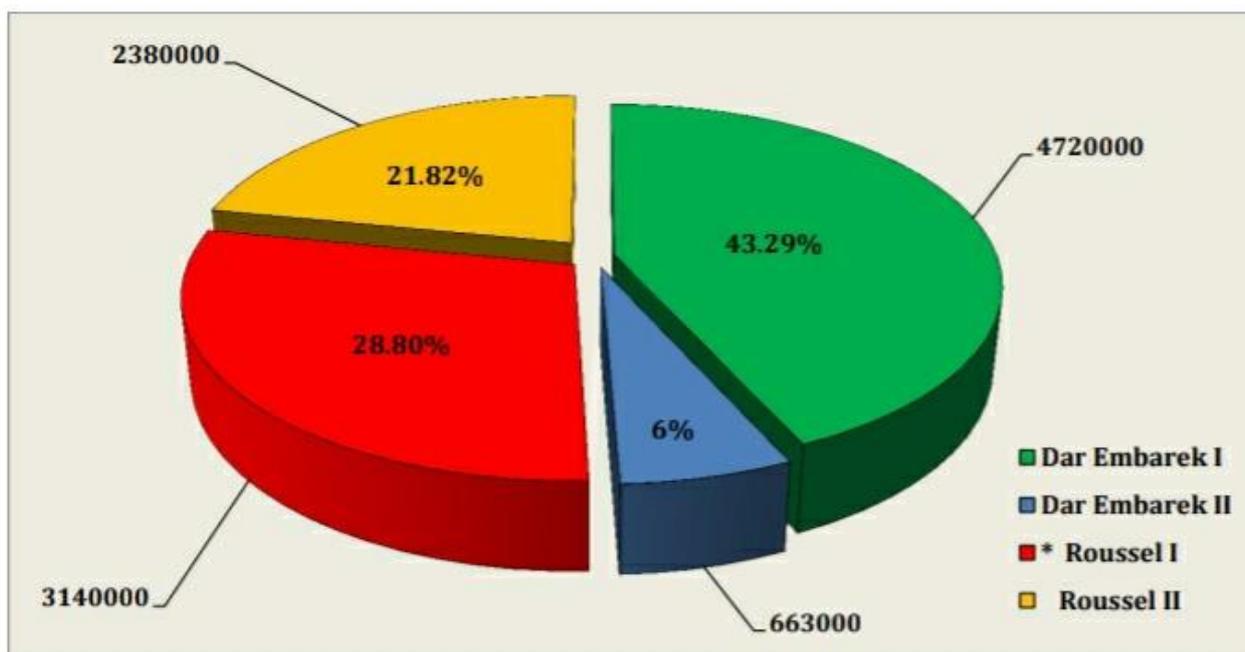


Figure 04 : Réserves des gisements d'argiles bentonitiques de Hammam Bouhrara, Maghnia

Production annuelle de bentonite

Tableau 03 : l'évolution annuelle de la production nationale de bentonite au cours des dernières années [3]

Année	2008	2009	2010	2011	2012
Production m ³	30595	31612	34126	29000	26000

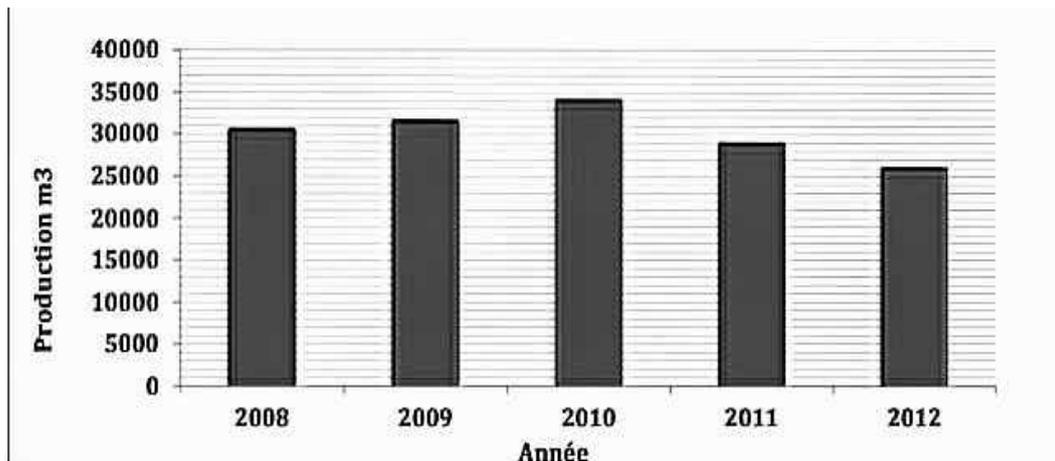


Figure 05 : Evolution de la Production de la bentonite de Hammam Boughrara.

I.5.Géologie de gisement

Les minéraux argileux se forment de trois manières principales : par la désagrégation physique d'une roche argileuse préexistante, appelée roche primaire, par l'altération chimique d'un minéral existant, créant ainsi des minéraux secondaires, ou par la précipitation à partir d'une solution (minéraux néoformés) [4].

Chacun de ces modes de formation offre des indications sur :

Les conditions d'altération dans la région source

Les conditions de transport des particules

Les conditions géochimiques environnementales lors de la formation des minéraux.

De nombreuses bentonites sont le résultat de l'altération in situ des cendres volcaniques, et les premières définitions du terme bentonite étaient liées à cette origine. Cependant, des recherches ultérieures ont montré que des argiles classées comme bentonites en raison de leur composition et de leurs propriétés peuvent avoir d'autres origines.

Dans la région de Hammam Boughrara, les argiles bentonitiques sont connues depuis le début du 20^e siècle [4]. Sadran (1958) a mentionné que les bentonites de Maghnia proviennent de l'altération hydrothermale de la rhyolite qui s'est produite au cours de la séquence marine tertiaire [4].



Figure 06 : Dépôt Bentonitique de Hammam Bouhrara, Maghnia (Algérie).

I.6. Historique des travaux géologiques et miniers [5]

Les premiers renseignements sur la présence des argiles bentonitiques dans la région de Maghnia ont été fournis par L. Gentil en 1903. Plus tard, Millot (1958), Bouiface (1959) et Sadran (1964) ont étudié la géologie de cette région.

En **1971**, une estimation économique des bentonites de Hammam Bouhrara a été réalisée, permettant d'étudier quatre gisements de bentonite : Rousel I, Rousel II, Dar Embarak I et Dar Embarak II. Ces bentonites ont été envisagées pour être utilisées comme boue de forage et matière première pour le raffinage des huiles végétales et minérales.

En **1979**, la société industrielle canadienne SIDAM a réévalué les réserves de bentonite de la région de Maghnia. Les conclusions principales de l'étude de SIDAM (**1979, 1981**) étaient les suivantes :

- Les propriétés physiques et chimiques de la bentonite de Maghnia ne permettent pas son utilisation dans les boues de forage.
- La bentonite de la carrière Roussel est de bonne qualité pour le boulettage du minerai de fer, les moules de fonderie et la décoloration des huiles (minérales et végétales).
- La bentonite de la carrière Dar El Hamra est de bonne qualité comme terre décolorante.
- La bentonite de la carrière Dar Embarek est de qualité médiocre et son exploitation n'est pas recommandée sans un traitement préalable coûteux.

SIDAM a établi cinq catégories de bentonite (Q1 à Q5) au niveau du gisement de Maghnia, basées sur divers paramètres chimiques et physiques, déterminant les applications industrielles de chaque catégorie.

Entre **1991** et **1992**, EREM (Algérie) a évalué les réserves de Dar Embarek I pour une utilisation en fonderie. En **1994**, SIDAM a réévalué les réserves de Roussel I dans le cadre d'une étude de faisabilité préliminaire et a réalisé des cartes de distribution des paramètres chimiques et physiques des bentonites de Maghnia.

De **2000** à **2001**, une carte de qualité pour la partie en exploitation de la carrière Roussel I a été réalisée, servant d'outil principal pour la gestion des réserves, orientant l'utilisation vers la terre décolorante ou la bentonite de forage. En janvier **2005**, BENTAL a réalisé un projet de forage par tarière de la carrière Roussel I, et la même année, un projet de découverte de cette carrière.

1.7. Méthode d'exploitation du gisement de bentonite de Hammem Boughrara

L'exploitation minière est une opération technologique visant à extraire des substances utiles du sol et des sous-sols, provenant de l'écorce terrestre et même des fonds marins, en quantité industrielle à des fins de commercialisation. Selon la profondeur du gisement et le coût d'extraction du minerai, ce secteur se divise en deux types : l'exploitation à ciel ouvert et l'exploitation souterraine.

Une mine à ciel ouvert consiste en un ensemble d'ouvrages réalisés pour l'exploitation de minéraux utiles à ciel ouvert. L'extraction se fait à l'air libre, soit à flanc de colline, soit dans une fosse qui s'approfondit et s'élargit progressivement. Cette exploitation se fait sur des gradins à front vertical. Une mine à ciel ouvert est mise en place lorsque le minerai se trouve relativement proche de la surface.

Lors de l'exploitation des gisements à ciel ouvert, les principaux processus distincts sont :

- Préparation des roches.
- Travaux d'extraction et de chargement.
- Transport des minéraux utiles et des roches stériles.
- Déchargement ou bien stockage des minéraux utiles.

Selon les propriétés physiques des matériaux bruts (dureté, densité, consolidation, etc.) et les contraintes imposées par la nature du site, différents modes d'extraction sont utilisés :

- Extraction à sec : pour les substances dures ou tendres.
 - Si le matériau est trop dur pour être excavé directement, il doit d'abord être abattu à l'explosif. Il est ensuite chargé mécaniquement et transporté vers les ateliers de préparation mécanique (traitement).
 - Pour les roches tendres, elles sont directement chargées dans les engins de transport.
- Extraction à l'eau :
 - Généralement utilisée pour les gisements alluvionnaires, cette méthode consiste à extraire les matériaux par dragage. Les matériaux non consolidés sont récupérés par voie mécanique ou hydraulique, puis transportés vers les postes de préparation mécanique.

Le choix de l'implantation d'une mine à ciel ouvert dépend de plusieurs critères :

- Critères géologiques :

- La structure du massif ;
- La profondeur, la puissance et le pendage du gisement ;
- L'importance et la qualité des réserves ;
- Tectonique locale et régionale (failles, plis...)
- Hydrogéologie locale et régionale.

- Critères techniques :

Cela concerne principalement :

- Le choix du personnel d'exploitation ;
- Le choix du matériel d'exploitation ;
- Le mode d'attaque du gisement ;
- Les stades successifs de l'exploitation ;
- L'aménagement des pistes et infrastructures d'exhaure de la mine ;
- L'emplacement de l'aire de stockage du minerai et des terrils ;

- Critères économiques :

Telles quelles seront les considérations économiques, elles doivent s'appuyer sur les conditions naturelles données et sur les moyens techniques choisis.

En général, on distingue les méthodes d'exploitation suivantes :

I.7.1.Méthode d'exploitation sans transport :

Cette méthode est divisée en deux types :

a) Simple : Les déblais sont rejetés dans des terrils intérieurs directement par les excavateurs.

b) Remaniement des déblais au terril : les déblais peuvent ensuite être redistribués dans les terrains.

I.7.2.Méthode avec emploi d'engins de transfert :

Les excavateurs rejettent directement les déblais dans des terrils intérieurs.

I.7.3.Méthode spéciale :

Les déblais sont transportés à l'aide des équipements suivants : excavateurs à tourelle, scrapers à roues, appareils hydromécaniques et grues.

I.7.4.Méthode avec transport des déblais :

Les déblais sont acheminés soit par des locomotives et des wagons, soit par des camions vers des terrils externes ou internes.

I.7.5.Méthodes mixtes : Les déblais des gradins supérieurs sont déplacés vers les terrils intérieurs ou extérieurs à l'aide d'excavateurs ou d'engins de transfert, ou par d'autres combinaisons des quatre méthodes précédentes.

Chapitre I : Géologie et exploitation de la bentonite Hammam Boughrara

La mine de Roussel 1 est configurée comme une fosse en cuvette, exploitée par des gradins atteignant parfois une hauteur de 10 mètres ou plus, avec un angle de talus d'environ 40° à 60°. Les pistes permettent un accès direct aux gradins, facilitant ainsi l'exploitation minière.

La bentonite est extraite par excavation à l'aide d'une pelle chargeuse. Le conducteur de l'engin procède à l'extraction du minerai en raclant le front de taille de bas en haut ou de haut en bas avec le godet de la pelle.

Le transport vers l'usine est effectué par trois camions ayant une capacité de charge utile de 12 tonnes et 19 tonnes. Chaque camion effectue trois rotations par poste de travail.



Figure 07 : Extraction bentonite et transport de tout-venant (carrière Roussel I).

Chapitre II

Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

II.1 Généralités sur les argiles

II.1.1. Définition des argiles

Les argiles, largement répandues sur tous les continents, notamment en Afrique du Nord,[7] sont des matériaux naturels dotés d'une diversité de propriétés et d'applications. Leur nom dérive du grec « ARGOS », signifiant matière blanche, et en termes minéralogiques, ce sont des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés, microcristallins, qui appartiennent à une classe de minéraux ayant un diamètre inférieur à deux micromètres ($< 2 \mu\text{m}$) et capables de former une pâte en présence d'eau.[8]



Figure 8 : Echantillons d'argile

L'argile est un mélange de minéraux et d'impuretés cristallines résultant de la dégradation physique et chimique des roches, comprenant des éléments comme la silice, les carbonates, les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, ainsi que des matières organiques [9]. Sa formation, due à l'altération des roches par les variations de température et l'eau, produit des particules très fines [10]. Les argiles présentent une structure feuilletée ou fibreuse et possèdent diverses propriétés physico-chimiques telles qu'une grande surface spécifique, une plasticité, une capacité d'adsorption d'eau et de gonflement, et une faible perméabilité. Ces propriétés rendent l'argile utile dans de nombreux domaines comme la construction, l'industrie pétrolière, la cosmétique, la fabrication de papier, le traitement des eaux et la gestion des déchets[11].

II.1.2. Structure des minéraux argileux

Les argiles se composent de phyllosilicates, où les tétraèdres de SiO_4 forment des feuilles bidimensionnelles infinies. Ces feuilles tétraédriques sont combinées avec des octaèdres d'oxydes métalliques dans un rapport de 2 : 1 ou 1 : 1. On les appelle également silicates lamellaires[12]. Les groupes différents de minéraux argileux se distinguent par la manière dont leurs couches tétraédriques et octaédriques sont agencées.

La structure des phyllosilicates repose sur une trame d'ions O_2^- et OH^- [10]. Ces anions occupent les extrémités des agencements octaédriques (O_2^- et OH^-) et tétraédriques O_2^- . Des cations de différentes tailles (Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+}) se logent dans les cavités de ces unités structurales de manière tétraédrique ou octaédrique.

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

Ces éléments s'agencent selon un schéma pour former des couches octaédriques et tétraédriques, dont le nombre détermine l'épaisseur du feuillet. L'espace entre deux feuillets parallèles est appelé espace inter-foliaire. Lorsque deux tiers des cavités de la couche octaédrique sont occupés par Al^{3+} (ou un autre ion métallique trivalent), la structure est appelée dioctaédrique. Si toutes les cavités octaédriques sont occupées par des ions métalliques divalents, la structure est dite trioctaédrique. De plus, il peut y avoir des substitutions isomorphiques dans les couches tétraédriques ($Si^{4+} \rightarrow Al^{3+}$, Fe^{3+}) et/ou dans les couches octaédriques ($Al^{3+} \rightarrow Mg^{2+}$, Fe^{2+} , ou $Mg^{2+} \rightarrow Li^{+}$). Ces substitutions entraînent un déficit de charge, qui est compensé à l'extérieur du feuillet par des cations compensateurs.

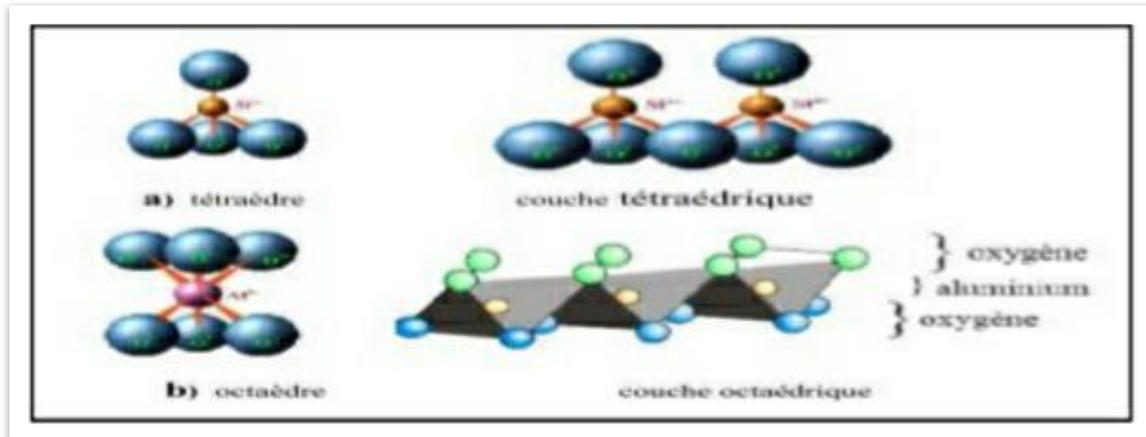


Figure 9 : Couches tétraédriques et octaédriques

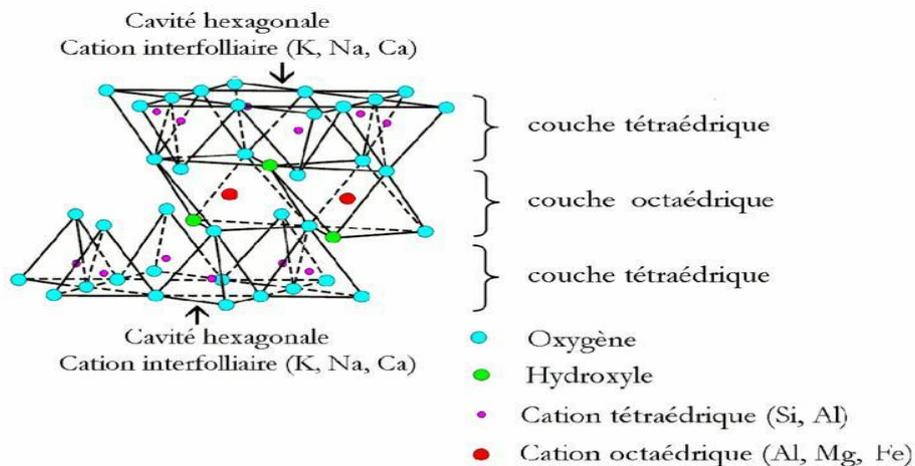


Figure 10 : Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2:1

II.1.3 Classification des minéraux argileux

D'après l'Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA), ainsi que d'autres experts internationaux, les phyllosilicates ont été classés selon des critères précis [13] :

- Type de feuillets 2 :1 ou 1 :1.
- Charge globale du feuillet.

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

- Nature des cations inter-foliaires.

Il existe diverses classifications des argiles, la plus courante étant basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet, permettant de distinguer 4 groupes : [13]

1) Minéraux à 7 Å :

Ces matériaux sont composés de feuilles comprenant une couche tétraédrique avec du silicium occupant ses sites, associée à une couche octaédrique où l'aluminium occupe les sites. La distance entre les couches est d'environ 7 Å. Chaque tétraèdre SiO_4^{4-} dans la couche tétraédrique est relié à trois de ses voisins par ses sommets, tandis que le quatrième sommet établit un lien avec le cation dans la couche octaédrique. (Figure 4) [14].

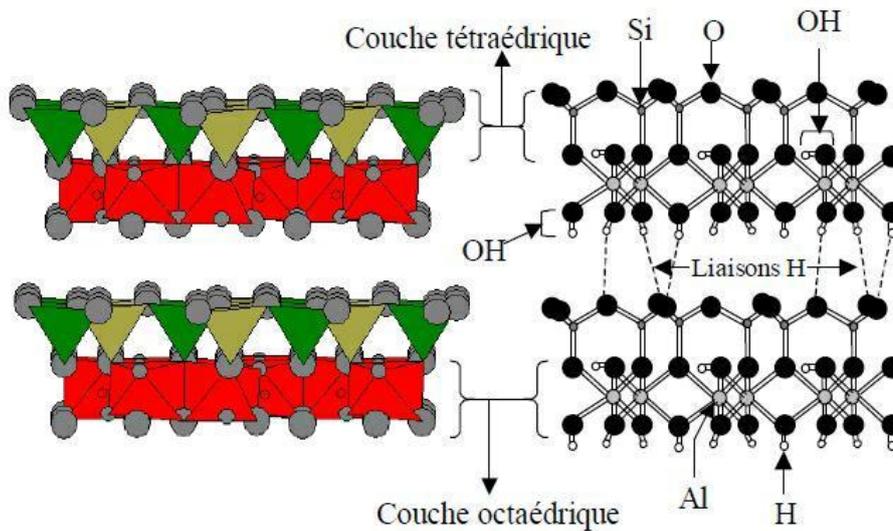


Figure 11 : Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux (cas de la kaolinite).

La Figure 14 regroupe les minéraux argileux T-O selon la structure des feuillets Élémentaires.

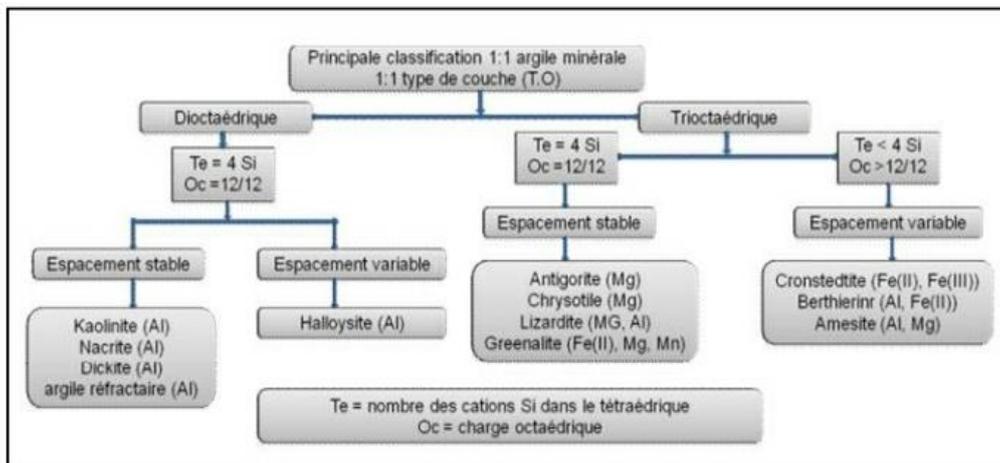


Figure 12 : Classification des minéraux argileux T-O [15]

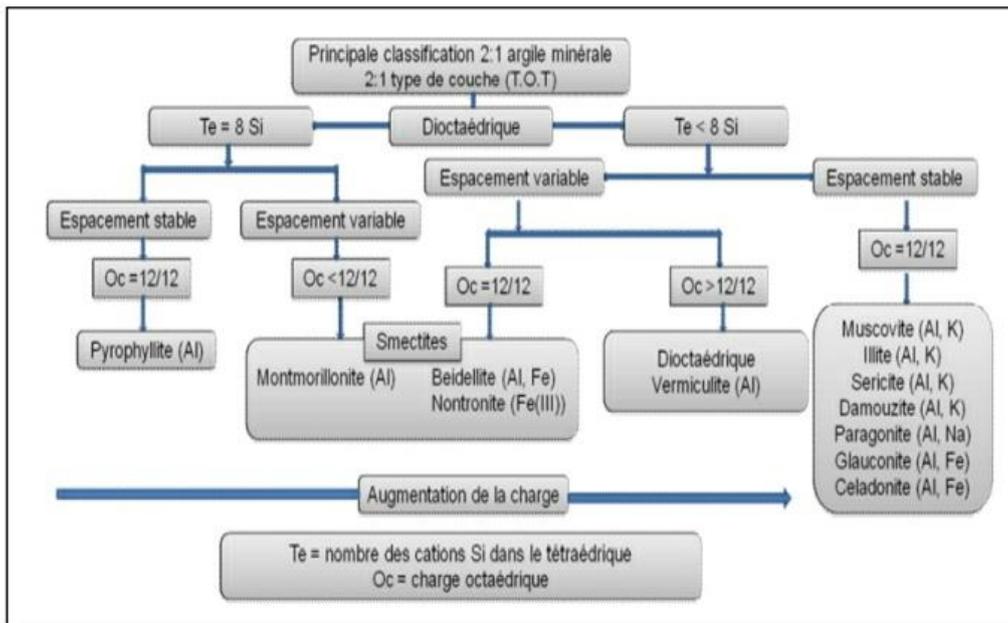
Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

2) Minéraux à 10 Å :

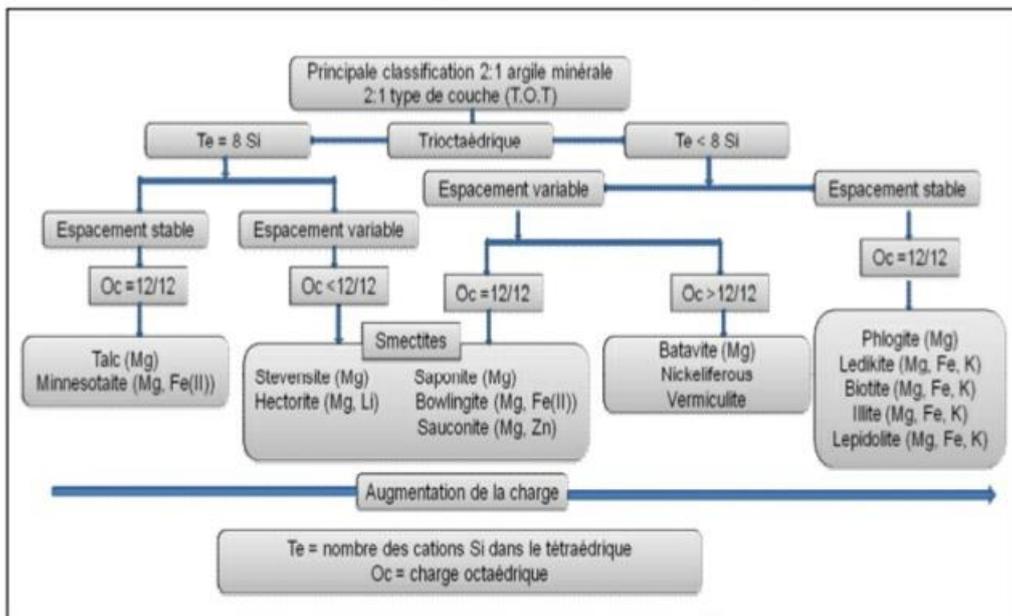
Le feuillet est formé de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique, caractérisant ainsi une structure T :O :T ou de type 2 :1. Son épaisseur est d'environ 10 Å. Les argiles ayant une structure élémentaire T-O-T sont illustrées dans les figures 6a et 6b.

T-O-T (ou 2:1) sont une classe de minéraux argileux caractérisés par leur structure cristalline composée de deux couches tétraédriques (T) entourant une couche octaédrique (O).

Les minéraux argileux T-O (ou 1 :1) sont une classe de minéraux argileux caractérisés par leur structure cristalline spécifique. Cette structure est composée d'une couche tétraédrique (T) liée à une couche octaédrique (O).



(a) Minéraux argileux T-O-T dioctaédriques



(b) Minéraux argileux T-O-T trioctaédriques

Figure 13: Classification des minéraux argileux T-O-T [15].

3) Minéraux à 14 Å :

Le feuillet se compose d'une alternance de feuillets T :O :T et de couches octaédriques inter-foliaires, avec une épaisseur d'environ 14 Å.

4) Minéraux interstratifiés :

La dimension des couches varie. Ces minéraux sont le produit du mélange organisé ou désordonné d'argiles provenant des groupes mentionnés précédemment.

II.1.4. Principaux groupes de minéraux argileux

Parmi toutes les types d'argiles mentionnées dans le tableau 04 , les trois familles les plus importantes sont les kaolinites, les l'illites et les smectites [13] :

i) kaolinite : est un phyllosilicate neutre, dioctaédrique et alumineux, avec une composition $(Si_2)(Al_2)O_5(OH)_4$. Elle se présente sous forme de particules hexagonales composées de feuillets empilés. Sa faible capacité d'échange[13] .

ii) Smectites : Les smectites sont des phyllosilicates composés de deux couches tétraédriques entourant une couche octaédrique (phyllosilicates 2 :1). Les minéraux les plus importants de cette famille comprennent la montmorillonite, la bédellite, l'héctorite et la saponite. La forte charge de ces argiles est principalement due à des substitutions isomorphiques. Cette charge est ainsi permanente, négative et varie en fonction du pH.

Les argiles gonflantes, telles que les smectites, possèdent une capacité d'échange cationique élevée grâce aux cations compensateurs logés entre les feuillets pour équilibrer le déficit de charge. Des molécules d'eau peuvent également s'insérer dans cet espace, et le degré d'hydratation dépend du cation hydraté et de l'humidité relative. Cette capacité de gonflement est liée à la structure feuilletée des smectites, qui ont des feuillets à grande extension latérale. La montmorillonite, par exemple, est une argile dioctaédrique où l'aluminium peut être partiellement remplacé par d'autres éléments comme le magnésium, le fer, ou le zinc.[13].

iii) L'illite : est un phyllosilicate 2:1, tout comme les smectites, mais avec une charge négative plus élevée. Cette charge est compensée par des ions potassium, qui sont peu échangeables, ce qui donne à l'illite une faible capacité d'échange cationique. De plus, il n'y a pas d'hydratation des espaces inter-foliaires dans l'illite.[13].

Tableau 04 : Classification des phyllosilicate 2 :1 [7]

Feuillet	Charge par maille	diocetraedriques	Triocetraedriques
1 :1	0	Kaolinite $(Si_4)(Al_4)O_{10}(OH)_8$	Antigorite $(Si_4)(Mg_3)O_{10}(OH)_8$
	#0	/	Berthierines $(Si_{4-x}Al_x)(Mg^{2+}_{6-x}M^{3+}_x)O_{10}(OH)_8$
	#0	Pyrophyllite $(Si_8)(Al_4)O_{20}(OH)_4$	Talc $(Si_8)(Mg_6)O_{20}(OH)_4$
2 :1	0.4	Montmorillonite $(Si_8)(Al_{4-y}Mg_y)O_{20}(OH)_4M_y^+$	Hectorite $(Si_8)(Mg_{6-y}Li_y)O_{20}(OH)_4M_y^+$
	a		
	1.2	Beidellite $(Si_{8-x}Al_x)Al_4O_{20}(OH)_4M_x^+$	Saponite $(Si_{8-x}Al_x)(Mg_6)O_{20}(OH)_4M_x^+$
	1.2	Illites $(Si_{8-x}Al_x)(Al_{4-y}M^{2+}_y)O_{20}(OH)_4$ K^{+}_{x+y}	Vermiculites $(Si_{8-x}Al_x)(Mg_{6-y}M^{3+}_y)O_{20}(OH)_4$ K^{+}_{x+y}
	A		
	1.8		
	2	Muscovite $(Si_6Al_2)(Al_4)O_{20}(OH)_2K^{+}_2$	Phlogopite $(Si_6Al_2)(Mg_6)O_{20}(OH)_2K^{+}_2$
	4	Margarite $(Si_4Al_4)(Al_4)O_{20}(OH)_2Ca^{2+}_2$	Clintonite $(Si_4Al_4)(Mg_6)O_{20}(OH)_2Ca^{2+}_2$

III.2. Propriétés des argiles

II.2.1 La capacité d'échange cationique (CEC)

Les argiles peuvent fixer des cations de manière échangeable depuis les solutions environnantes. La capacité d'échange de cations (CEC), mesurée en milliéquivalents par 100 grammes d'argile (meq/100g), représente le nombre de charges échangeables par unité de masse d'argile. Cette capacité dépend du type d'argile, de ses propriétés cristallographiques, des cations présents et du pH du milieu.[16].

La capacité d'échange cationique (CEC) d'une argile résulte de la substitution isomorphique d'atomes dans ses couches octaédrique et tétraédrique, entraînant un déficit de charge compensé par des cations [17] . La CEC se mesure en saturant l'argile avec une solution riche en cations et en analysant les cations échangés. Cette analyse utilise souvent des cations NH_4^+ ou Ba^{2+} . La microanalyse élémentaire des ions permet de déterminer la CEC [18].

Tableau 05 : Capacités d'échange des cations de quelques argiles [19].

Argiles	CEC meq/100g
Montmorillonite Ca ²⁺	80
Montmorillonite Ca ²⁺	150
Illite	30-40
Kaolinite	3-15

II.2.2 La surface spécifique (SSE)

La surface spécifique est une propriété essentielle dans la caractérisation des matériaux poreux, elle désigne l'ensemble des surfaces accessibles à des particules ioniques, elle est exprimée en m²/g. On peut distinguer [20] :

- Les surfaces des plans extérieurs formant les bases des particules, ce sont les surfaces externes.
- Les surfaces cumulées de tous les plans des feuillets, qui limitent les espaces inter-foliaires, appelées surfaces internes.
- Les surfaces qui marquent latéralement les limites des feuillets, ce sont les surfaces latérales.

La mesure de la surface spécifique est basée sur la formation d'une monocouche de la substance adsorbée, connaissant les dimensions des molécules et leurs possibilités d'arrangements, en déterminant alors la quantité fixée, on peut évaluer la surface qui leur sert de support. Les corps adsorbables qui permettent d'obtenir des résultats satisfaisants sont : les gaz inertes (N₂), hydrocarbures aliphatiques ou des polyalcools simples comme le glycol ou glycérol.).

L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé. Les caractéristiques de ces argiles sont résumées dans le tableau (06) [21] :

Tableau 06 : Surfaces spécifiques de quelques minéraux argileux

Argiles	Surfaces spécifiques (m ² /g)
Montmorillonite	80
Illite	150
Kaolinite	30-40
Eléments non argileux	3-15

II.2.3 Capacité de gonflement

Le degré d'hydratation varie d'une famille argileuse à une autre. Certains minéraux argileux ont la capacité d'incorporer dans leur structure des molécules d'eau (figures 7. A et 1.7. b). Cette eau modifie la dimension de la couche en provoquant son gonflement. Ces argiles sont appelées argiles gonflants. On distingue deux types de gonflement [22]

- a. **Gonflement inter-foliaire** : L'eau qui pénètre dans les particules s'organise en couches mono moléculaires.
- b. **Gonflement inter-particulaire** : L'eau n'entre pas à l'intérieur des particules d'argile. L'hydratation de l'argile est un processus réversible, elle peut sécher ou regonfler tout en conservant ses propriétés.

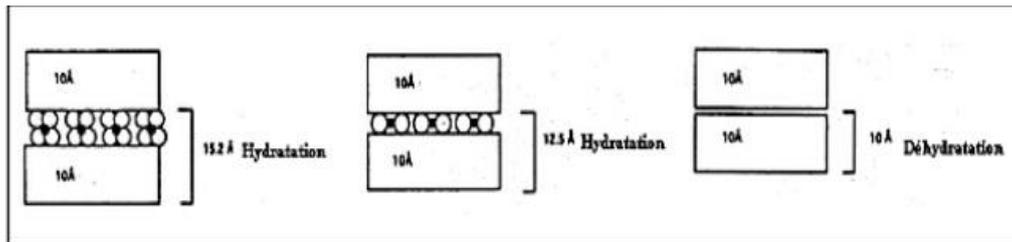


Figure 14.a : Capacité d'adsorption d'eau par les particules argileuses [23].

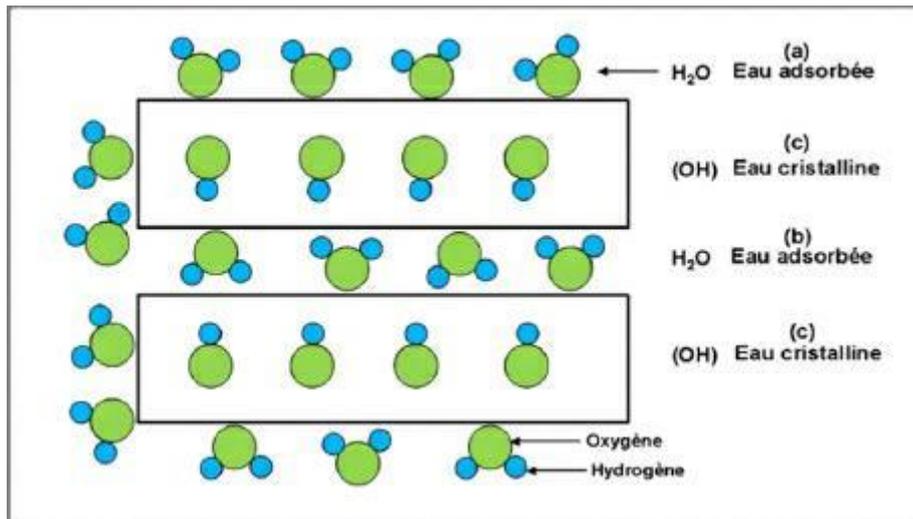


Figure 14. b : Localisation de l'eau dans les particules argileuses [23]

Les smectites, vermiculites et minéraux interstratifiés ont une grande capacité d'expansion et d'absorption d'eau, influencée par la température et l'humidité. Ils peuvent augmenter leur volume jusqu'à 95% grâce à une hydratation réversible, formant des couches d'eau de 2.5 à 5.2 angströms. En revanche, certains minéraux, comme les argiles fibreuses, contiennent de l'eau adsorbée sans gonflement. Le gonflement inter-particulaire, affectant tous les types d'argiles, est plus limité car l'eau ne pénètre pas à l'intérieur des particules.[24].

II.2.4 Colloïdalité

La colloïdalité revêt une grande importance dans le processus de purification des argiles en raison des charges négatives présentes à la surface de chaque particule d'argile. Cette caractéristique se manifeste par la formation d'une double couche d'ions hydrosolubles de charges opposées qui enveloppe chaque particule d'argile.

II.2.5 La densité de charge spécifique

La densité de charge spécifique représente le rapport entre la capacité d'échange cationique (CEC) et la surface spécifique (S) de la particule d'argile. Dans les environnements argileux, on distingue deux types de charges[25] :

- Une charge permanente ou structurale liée aux substitutions ioniques (Al^{3+} pour Si^{4+} dans la couche tétraédrique, Mg^{2+} ou Fe^{2+} pour Al^{3+} dans la couche octaédrique).
- Une charge de surface variable selon le pH du milieu liée aux réactions chimiques qui se produisent à la surface des minéraux.

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

Une augmentation de la densité de charge spécifique diminue le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui conduit à une réduction de leur épaisseur.

II.2.6 La capacité de fixation des éléments métalliques

Sous certaines conditions telles que le pH, les argiles peuvent fixer une molécule ou un ion en raison de la présence de sites réactifs (comme Si-OH ou Al-OH) à leur surface, en particulier au niveau des bords des feuillets [26].

II.3. Bentonite

II.3.1 Généralité sur la bentonite

Faisant partie du groupe des smectites) [27], Dans leur état naturel, la plupart des gisements de bentonite sont hétérogènes ; ils sont constitués de smectites mélangées ou inter stratifiées avec l'illite et/ou la kaolinite et d'autres impuretés [28].

Les principaux gisements de bentonite sont souvent formés par la transformation de cendres volcaniques vitreuses dans des milieux aqueux ou par l'altération hydrothermale des roches volcaniques. De plus, certaines couches d'argiles sédimentaires riches en smectite peuvent également constituer des gisements de bentonite [29]. Ces matériaux sont ensuite utilisés dans diverses industries, allant du simple concassage à des processus d'extraction et de traitement plus complexes.

La bentonite est connue pour sa capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement, ainsi que pour ses propriétés rhéologiques particulières, telles que la thixotropie. En raison de ces caractéristiques, elle est considérée comme l'un des minéraux industriels les plus utiles et est largement utilisée dans divers domaines tels que le forage, la fonderie, la céramique, la peinture, la pharmacie, les agents décolorants, ..., etc.[30].

Les bentonites peuvent être divisées en deux catégories en fonction de leur composition : sodique (gonflables, adaptées aux boues de forage) ou calcique (avec un faible indice de gonflement mais une forte capacité d'adsorption).

II.3.2 Types de bentonites

Une caractéristique clé des montmorillonites est leur capacité à échanger des cations avec leur environnement. Dans la nature, les cations les plus courants sont le calcium et le sodium. Ainsi, on distingue deux types de bentonites [31] :

- La bentonite à base de sodium, également appelée bentonite de Wyoming ou bentonite de l'Ouest, possède une teneur en $\text{Na}_2\text{O} > 2\%$, ce qui lui confère un indice de gonflement élevé entre 15 et 20. Cette caractéristique est particulièrement mise en valeur dans les mastics utilisés pour l'enfouissement des déchets polluants dans les sols et dans la fabrication des boues de forage.

- La bentonite à base de calcium, ou bentonite du Sud, est la plus courante. Elle ne présente pas de propriétés de gonflement, mais sa forte teneur en ions échangeables, en particulier Mg^{2+} , lui confère une capacité d'adsorption très élevée. C'est pourquoi elle est utilisée dans la production de terres décolorantes.

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

Il est important de noter que ces termes ne doivent pas être confondus : une bentonite naturelle n'est jamais totalement calcique ou totalement sodique. Seul le cation dominant est ainsi désigné.

II.3.3 Microstructure de la bentonite

Dans cette section, nous examinons la microstructure de la bentonite à travers une revue bibliographique sur la microstructure de la montmorillonite. Nous prenons en compte les divers types de minéraux et les agencements de particules qui composent l'argile concernée. Cette approche est motivée par :

- (i) La forte présence de la montmorillonite dans la littérature [33, 34] .
- (ii) Le fait que les phyllosilicates présentent des similitudes de structures et de propriétés [32] .
- (iii) La bentonite, en particulier celle utilisée dans notre étude, représente généralement une proportion importante de ce type de minéral.

Les montmorillonites se distinguent par leur capacité de gonflement, la plus remarquable parmi tous les minéraux de la famille des phyllosilicates. La compréhension de leur structure à différentes échelles et de leurs propriétés spécifiques est rendue possible grâce à l'utilisation de techniques expérimentales telles que la Diffusion aux Petits Angles des Rayons X (DPAX)[35].

La Microscopie Électronique à Transmission (MET) et la Microscopie Électronique à Balayage (MEB) ont été utilisées par différents chercheurs pour mettre en évidence trois niveaux d'organisation dans les systèmes argileux, en particulier les montmorillonites. Dans la figure 1.17, nous avons repris la présentation des différents niveaux d'organisation selon l'échelle d'observation proposée par Le Pluart [36]. Cette présentation met en évidence les trois « objets » caractéristiques de la structure multi-échelle des montmorillonites.

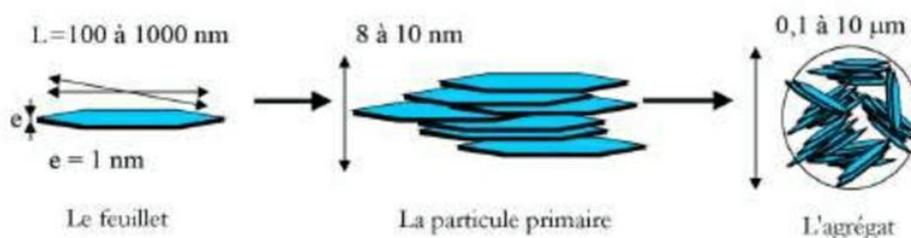


Figure 15 : Structure multi-échelle de la montmorillonite

II.3.3.1 Le feuillet

Les feuillets constituent les unités structurales de base qui définissent la nature minéralogique, l'appartenance au type d'argile, les propriétés physico-chimiques ainsi que le comportement macroscopique. Chaque feuillet représente la répétition horizontale de la demi-maille dans les directions x et y, ressemblant à un disque ou à une plaquette avec des dimensions latérales de l'ordre du micron et une épaisseur d'environ un nanomètre. Ces plaquettes sont considérées comme souples et relativement déformables, avec une anisotropie très marquée. Dans la famille des smectites, la charge d'un feuillet varie généralement de 0,2 à 0,6 électron par maille, en fonction de la localisation des substitutions et du taux d'occupation des couches octaédriques. La montmorillonite, par exemple, possède environ 0,3 à 0,4 électron par maille[32]. Comme mentionné

précédemment, les cations compensateurs à la surface des feuillets de montmorillonite sont généralement des ions calcium ou sodium. Les termes « calcique » et « sodique » sont souvent utilisés pour désigner la nature de ces cations dans la montmorillonite.

II.3.3.2 La particule primaire

Les particules constituent le premier niveau d'organisation et sont caractérisées par un empilement de feuillets identiques parallèlement à leur plan de base. Les forces de cohésion entre les feuillets sont moins importantes que celles à l'intérieur du feuillet. Trois grands types d'empilements peuvent être observés dans la structure de la particule, en considérant les principales espèces minéralogiques :

(i) Empilement ordonné : les feuillets sont empilés les uns sur les autres dans un ordre parfait. Cela se produit généralement dans les phyllosilicates dont l'espace inter-foliaire est vide ou anhydre, notamment pour les kaolinites ou les illites.

(ii) Empilement semi-ordonné (ou désordre translationnel) : dans ce cas, les feuillets successifs présentent des translations « semi-définies » et sont séparés par quelques molécules d'eau. L'épaisseur de la particule varie en fonction du degré d'hydratation, et les feuillets peuvent glisser latéralement les uns sur les autres.

(iii) Empilement désordonné (ou désordre turbostratique) : ici, les feuillets successifs présentent des translations et/ou des rotations quelconques dans toute la structure. Les feuillets sont séparés par un film d'eau, ce qui permet une rotation libre autour d'un axe perpendiculaire au plan de la particule[37].

Un large éventail de termes est utilisé pour désigner les particules. Le plus petit élément cristallin produisant des interférences dans un phénomène de diffraction X a été nommé « particule primaire » par Mering et Oberlin (1971) [38]. Ensuite, la particule résultante après dispersion dans des conditions spécifiques, formée par l'association de plusieurs particules primaires, a été appelée « particule libre » par les mêmes auteurs. La montmorillonite est généralement composée de l'association de plusieurs particules primaires, avec une extension latérale particulièrement importante[39-40-41].

Si nous nous concentrons sur la dimension des particules dans la direction perpendiculaire au plan des feuillets, leur épaisseur a été évaluée à environ une dizaine de feuillets, maintenus ensemble par des forces électrostatiques attractives entre les ions compensateurs et les feuillets. Cette épaisseur est généralement de 8 à 10 nanomètres (fig. 1.8). La taille des particules reste relativement constante, ce qui signifie que lorsque la montmorillonite gonfle, l'espace inter-foliaire augmente et il y a moins de feuillets dans chaque particule[36] [32] [13].

En outre, la montmorillonite présente des substitutions isomorphes de type dioctaédrique[43]. Ce type de localisation des charges empêche les cavités hexagonales de deux feuillets adjacents de se superposer. Ainsi, l'arrangement global des feuillets au sein d'une particule primaire de montmorillonite est turbostratique. Bien qu'ils présentent un désordre dans le plan latéral, tous les feuillets sont alignés perpendiculairement à la direction z[44].

Cela a été solidement confirmé dans le cas des montmorillonites calciques fortement hydratées en utilisant à la fois l'analyse de la diffusion aux petits angles et la microscopie électronique à transmission[39-45]. Les auteurs ont défini la particule comme un empilement parallèle, indépendamment du degré d'ordre dans la répétition des feuillets à l'intérieur de l'empilement. Ces particules, comme nous le verrons plus tard, constituent les « parois » du réseau

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

de pores développé à l'intérieur de l'échantillon et ont une épaisseur extrêmement variable en fonction de la teneur en eau de l'échantillon.

Dans la littérature, on trouve fréquemment des études sur des bentonites constituées de minéraux non homogènes, appelées « interstratifiées » [46-47]. Ces particules d'argile résultent de la superposition de feuillets qui peuvent être :

- (i) De natures différentes, telles qu'illite-smectite, vermiculite-smectite, etc.,
- (ii) De même nature mais présentant des remplissages inter-foliaires différents, comme c'est le cas de la montmorillonite hydratée où l'espace inter-foliaire peut contenir une, deux, trois ou quatre couches d'eau.
- (iii) Ou bien par la combinaison de la nature des feuillets et de leur remplissage inter-foliaire, comme c'est le cas de l'illite-smectite avec des feuillets de smectite présentant différents degrés d'hydratation [13-48]. Parmi ces minéraux, les interstratifiés illite/smectite sont les plus étudiés, et on les retrouve fréquemment dans les bentonites utilisées dans les boues de forage [13-47-49].

Dans le cas des minéraux interstratifiés, l'empilement est principalement caractérisé par la succession des feuillets de natures différentes le long de la normale à leur plan. Ainsi, pour un minéral interstratifié contenant deux types de feuillets A et B, trois types d'inter-stratifications peuvent être envisagés :

- (i) **Ségrégés** : une particule donnée présente des séquences AAABBB (figure 18 a). Le diagramme de diffraction X est la superposition des diagrammes produits par chacun des constituants.
- (ii) **Réguliers** : une particule donnée comporte des séquences ABABAB...AB (figure 18 b). Une période de sur-structure perpendiculairement au plan des feuillets, égale à la somme des épaisseurs des deux feuillets, apparaît ($dT = dA + dB$). Le diagramme de diffraction X comporte alors des réflexions basales de sur-structure correspondant à dT .
- (iii) **Aléatoires** : tous les cas intermédiaires entre les deux décrits précédemment (figure 18.c). Dans ce cas, les diagrammes de diffraction X présentent des réflexions (001) irrationnelles et leur interprétation est très délicate.



Figure 16 : Différents modes de succession des feuillets au sein d'une unité interstratifiée

II.3.3.3 L'agrégat

Il s'agit d'un ensemble de particules primaires orientées dans toutes les directions, formant des agrégats dont la taille varie de 0,1 à 10 microns, comme illustré sur la figure 17. Ces agrégats sont constitués de particules dont l'arrangement est influencé par le type de forces résultant des interactions entre les particules, ainsi que par le degré de compaction. Lorsque les forces répulsives

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

dominant, les particules s'orientent parallèlement, et la structure est qualifiée de dispersée. Selon la quantité d'eau présente dans le système et la nature de l'argile considérée, l'organisation peut être plus ou moins variée.

Cela conduit à différents types de structuration, comme dans le cas de la montmorillonite, qui présente des unités morphologiques très déformables. Ces déformations sont probablement plus faciles que dans d'autres phyllosilicates, bien qu'elles restent relativement limitées en raison de la rigidité des particules[43].

On peut conclure que la compréhension de l'organisation de la microstructure de la bentonite, allant des feuillets jusqu'à l'assemblage d'agrégats, ne peut être réalisée que si l'organisation de l'espace poreux est prise en compte. La dimension, la forme et la distribution des espaces poreux dépendent de la granulométrie de l'argile, de son caractère gonflant, ainsi que du fluide interstitiel et des contraintes auxquelles la bentonite est soumise [50]. On distingue trois types d'espaces liés à l'organisation de la phase solide dans les argiles (Figure. 1.10) :

(i) L'espace inter-foliaire, situé entre deux feuillets dans un empilement, est généralement rempli de couches d'eau adsorbée (de 1 à 4) et de cations échangeables, avec une épaisseur moyenne de 1,5 à 2,5 nm.

(ii) L'espace inter-particulaire, qui sépare les particules d'argile formant les agrégats, peut diminuer jusqu'à atteindre la même épaisseur que l'espace inter-foliaire pour les argiles fortement compactées[51]. Dans ce type d'espace, la double couche, dont nous discuterons en détail plus tard, peut se former. Les micropores lenticulaires se trouvent à l'intérieur des particules, à une échelle de quelques nm.

(iii) L'espace inter-agrégat correspond à une section moyenne comprise entre 1,6 et 16 nm, où l'eau circule librement (eau libre), limitant les effets électrostatiques de la double couche (figure 1.19).

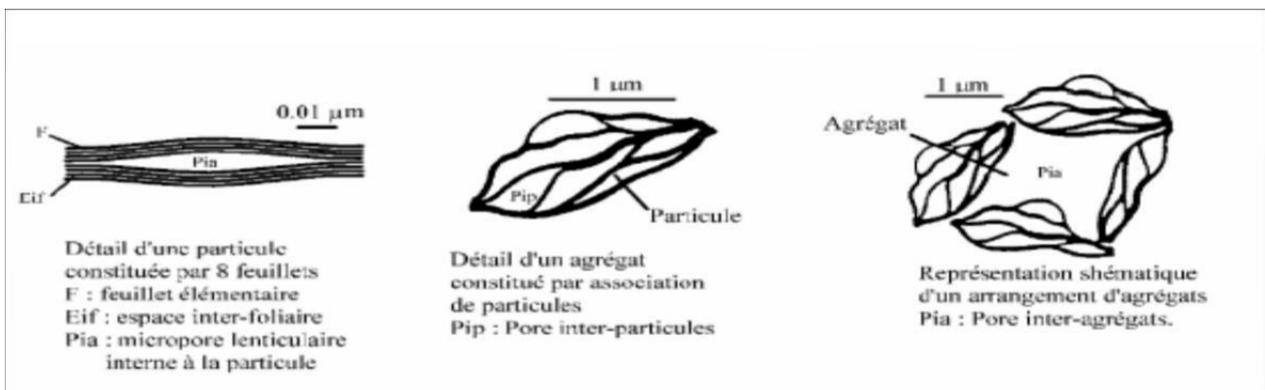


Figure 17 : Les différents types d'espaces poreux

II.4. Le système bentonite-eau

Les particules de bentonite montrent une forte affinité pour l'eau, ce qui se manifeste à la fois par la capacité de l'argile à retenir l'eau et par l'énergie avec laquelle cette eau est retenue. Ce phénomène capillaire, résultant de la finesse de la granulométrie des particules et de la présence de charges à la surface des feuillets, renforce les interactions entre la bentonite et l'eau. À l'échelle des particules, les feuillets sont séparés par un nombre variable de couches d'eau (entre 0 et 4) et des pores lenticulaires d'environ 30 à 50 Å[52].

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

La taille des particules varie en fonction du cation compensateur et des propriétés physico-chimiques de la bentonite. Bien que les particules soient séparées par une quantité importante d'eau, elles ne sont pas totalement indépendantes. En raison de l'ampleur des feuillets dans leur plan et des forces d'attraction entre les feuillets, des liaisons se forment entre les particules. Cela peut se produire par le rapprochement de deux zones de feuillets extérieurs à deux particules adjacentes ou par interaction entre les feuillets [43].

Les particules ainsi liées forment des agrégats ou des super-agrégats en fonction de la densité des suspensions. Cette organisation est typique de ce que l'on appelle un « milieu granulaire ». Lorsque l'hydratation se poursuit et que les particules gonflent, on qualifie l'état de la bentonite hydratée de « gel ». Ces gels se caractérisent par des particules très lâches composées d'un petit nombre de feuillets (en moyenne 5), voire de feuillets isolés, situés à des distances allant de 30 à quelques centaines d'angströms (figure 20). Dans l'ensemble, cela forme un réseau très souple, avec des propriétés importantes de viscosité et de thixotropie [36].

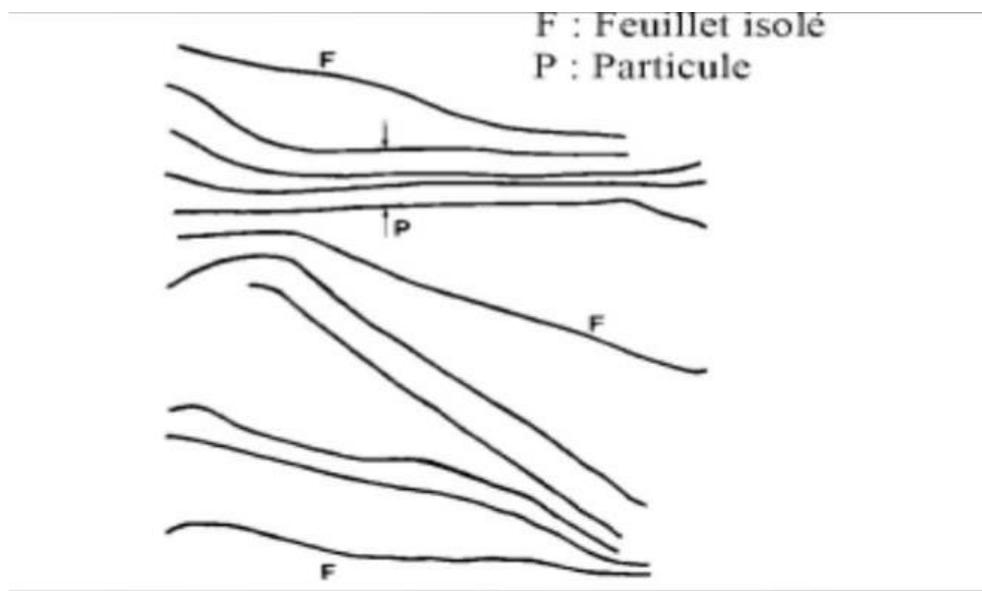


Figure 18 : Représentation schématique de l'état gel

II.4.I Dispersion des feuillets

En présence d'eau, la bentonite a la capacité de former un solide hydraté, un gel et/ou une suspension plus ou moins stable, grâce à son caractère gonflant. Ce phénomène est étudié en détail par plusieurs auteurs, notamment Norrish (1954)[53], Swartzen-Allen et Matijevic (1974)[54], Van Olphen (1977)[55], et Luckham et Rossi (1999)[43].

Dans le processus de gonflement, deux échelles distinctes peuvent être distinguées :

- (i) La dispersion inter-particulaire, où les molécules d'eau pénètrent entre les particules élémentaires.
- (ii) L'hydratation inter-feuillets, où les molécules d'eau pénètrent entre les feuillets constituant une particule[35] [56].

L'hydratation inter-feuillets entraîne une augmentation de la distance entre les feuillets (distance basale), comme illustré dans la figure 1.21. Des études antérieures utilisant la diffraction

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

des rayons X sur des phyllosilicates hydratés sous une pression relative contrôlée ont révélé que l'eau s'organise en couches moléculaires planes dans ces matériaux [57].

D'autres chercheurs ont examiné la montmorillonite et ont observé l'existence d'hydrates successifs avec des pressions relatives d'eau croissantes. Ces hydrates présentent respectivement 1, 2, 3 et 4 couches d'eau, correspondant à des distances basales de 12,6 Å, 15,6 Å, 18,6 Å et 21,6 Å [48-58-59]

À ce stade, lorsque le nombre de couches d'eau inter-foliaires est compris entre 1 et 4, la montmorillonite reste dans un état solide hydraté [40-60]. Cependant, lorsque l'hydratation se poursuit et dépasse 4 couches d'eau dans un système de montmorillonite hydratée, on parle dans la littérature du processus de « gonflement ». Ce phénomène est principalement attribué à la formation d'une « double couche diffuse » entre les feuillets adjacents [43-53]

Les distances inter-foliaires passent brusquement de 21,6 Å (correspondant à l'hydrate à 4 couches d'eau) à 30 Å et au-delà, sans qu'il soit possible de détecter de distances intermédiaires entre ces deux valeurs [45-61]. Pour des teneurs en eau plus importantes, on fait souvent référence à la dispersion ou à la suspension de montmorillonite dans l'eau plutôt qu'au gonflement aqueux de la montmorillonite [12].

Les propriétés d'hydratation, de gonflement et de dispersion ne se manifestent que lorsque l'énergie de cohésion entre les feuillets est suffisamment faible pour permettre aux molécules d'eau de pénétrer entre eux. Ainsi, lorsque la cohésion reste élevée, l'hydratation est limitée à quelques couches d'eau seulement. C'est le cas typique de la montmorillonite-Ca, où l'énergie attractive devient inférieure à l'énergie cohésive dès l'adsorption de la deuxième couche d'eau. En revanche, dans les systèmes où la cohésion entre les feuillets devient très faible par rapport à l'énergie attractive, le nombre de couches d'eau insérées peut devenir très élevé, entraînant, comme dans le cas de la montmorillonite-Na, la dispersion des feuillets [40-60].

Dans la littérature, on trouve une terminologie précise pour décrire ces deux modes de gonflement, qui se distinguent par leur capacité d'hydratation :

(i) Le gonflement cristallin de la montmorillonite, ou gonflement en présence d'eau vapeur, permet d'augmenter la distance inter-foliaire de 9,6 à 20 Å. Ce gonflement est directement lié au nombre de couches d'eau adsorbées entre les feuillets. Il est notable qu'une montmorillonite, même séchée à 105°C, présente généralement une distance inter-foliaire d'environ 12 Å, ce qui témoigne de la présence d'eau liée entre ses feuillets. L'amplitude du gonflement cristallin est liée à l'énergie d'hydratation des cations compensateurs. Dans le cas d'une montmorillonite-Ca, le phénomène de gonflement est limité à ce type de mécanisme [28-29].

(ii) Le gonflement osmotique, également connu sous le nom de gonflement « macroscopique » ou « libre », se produit lorsque l'énergie d'hydratation est suffisante pour surmonter la barrière de potentiel due aux forces électrostatiques attractives entre les feuillets. Au-delà de la deuxième couche d'eau adsorbée à la surface d'un feuillet, l'eau perd ses propriétés d'eau liée et devient de l'eau libre.

II. 4.2 Rôle des cations compensateurs

Le gonflement dépend de la nature des cations compensateurs associés aux particules. Des recherches ont identifié deux groupes de cations compensateurs [53-60-48-52] :

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

- (i) Ceux favorisant une dispersion maximale pour la montmorillonite et d'autres phyllosilicates similaires. Ces cations incluent : Na^+ , Li^+ , K^+ et Ag^+
- (ii) Ceux limitant l'hydratation à quelques couches d'eau (généralement 2-4 selon le minéral) : Cs^+ , Ca^{++} , Mg^{++} et Ba^{++}

Norrish (1954) a établi un lien entre le gonflement des particules argileuses et l'hydratation des cations en les classant par ordre décroissant d'hydratation réduite. Il a proposé le classement suivant : Na^+ , Li^+ , Ca^{++} , K^+ et Cs^+ . Ce classement semble cohérent, à l'exception du K^+ qui peut se comporter tantôt comme Na^+ et tantôt comme Ca^+ . Plus tard, Faisandier (1997) a montré que le potassium induit la formation d'un système hétérogène où coexistent, au sein d'une même particule, des feuillets de smectite hydratés et des feuillets collapsés (à une distance de 10 Å).

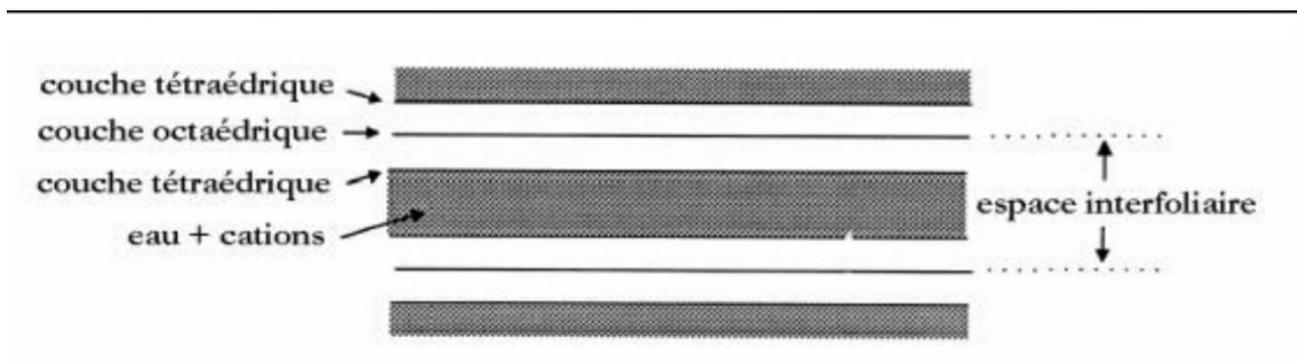


Figure 19 : Représentation de l'espace inter-foliaire (distance basale) entre deux feuillets de Montmorillonite

II.4.3 Interactions dans une suspension aqueuse de bentonite

Il est important d'examiner de près les interactions entre les feuillets et les divers paramètres qui influent sur la stabilité colloïdale du système bentonite-eau.

Dans la littérature, le terme « colloïde » fait référence à tout système dispersé dont les dimensions se situent entre 1 et 100 nm. Cependant, son utilisation n'est pas toujours aussi restreinte ; il peut également être appliqué à des structures plus « grossières » résultant de l'agrégation d'éléments colloïdaux, comme les suspensions argileuses de bentonite qui peuvent présenter une distribution granulométrique de l'ordre du micron [63-64-65].

La stabilité des dispersions des suspensions colloïdales dépend largement de la charge électrique présente à l'interface entre la particule et le milieu liquide. Les particules argileuses portant une charge négative sur leurs surfaces extérieures, le scénario « idéal » est celui où ces particules sont dispersées dans l'eau, se repoussant mutuellement grâce aux forces électrostatiques. Dans de telles conditions, il n'y a aucune tendance à l'agglomération et la suspension reste stable. Cependant, la réalité est bien plus complexe. La stabilité ou l'instabilité des suspensions aqueuses de bentonite est liée à la nature des cations compensateurs, ainsi qu'aux dimensions et interactions entre les « doubles couches électriques » qui entourent chaque particule.

II.4.4 Double couche électrique

La théorie de Gouy – Chapman La théorie de Gouy-Chapman décrit une décroissance exponentielle du potentiel électrique ψ en fonction de la distance x , (figure 22), selon l'équation 1.1 :

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

$$\psi = \psi_0 e^{-kx} \dots\dots\dots (I.1)$$

Et :

$$\frac{1}{k} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 RT}{F^2 \sum_{i=1}^n c_i z_i^2}} \dots\dots\dots (I.2)$$

Dans l'expression (I.1),

ψ_0 : le potentiel à la surface,

k^{-1} : l'épaisseur de la couche électrique,

F : la constante de Faraday,

c_i : la concentration en électrolyte,

z_i : la valence des ions,

ϵ_0 : la constante diélectrique du milieu,

R : la constante des gaz (1 ATM/mole K),

T : la température absolue (K).

Cette expression est valide uniquement pour une certaine distance de la surface chargée, où le potentiel est relativement faible et diminue exponentiellement.

À partir de l'expression (I.2), on observe que l'épaisseur de la couche électrique est principalement influencée par la concentration en électrolyte de la solution et la valence des ions présents. Une force ionique plus élevée entraîne une compression plus importante de la double couche. Ce phénomène est représenté schématiquement sur la figure 22 [43].

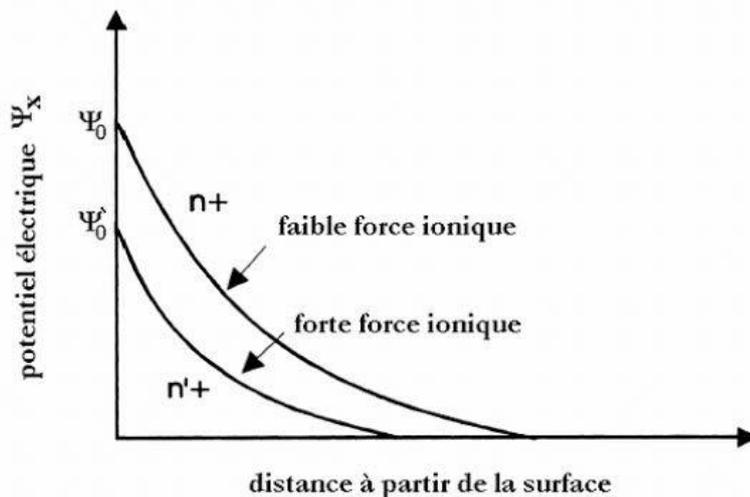


Figure 20 : Représentation schématique de la chute du potentiel de surface ψ_x et de la contraction de la double couche électrique, dues à une augmentation de la force ionique

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

Les études postérieures aux travaux de Stern (1924)[67] et Grahame (1947)[68] ont apporté peu de modifications à la modélisation de la couche électronique. La figure I.22 présente une représentation schématique de la structure multicouche de l'interface eau-argile. Ce diagramme, proposé par Li et al. (2003)[69] et modifié selon la description de Güven et Pollastro (1992)[70], synthétise la double couche électronique en termes de plans de molécules d'eau et de contre-ions.

On observe également sur la figure 23 que la présence de charges négatives à la surface d'une particule argileuse influence la distribution ionique dans la région interfaciale entre la particule et l'eau. Cela entraîne une augmentation de la concentration en contre-ions près de la surface, ainsi que l'apparition d'une double couche électrique autour de chaque particule.

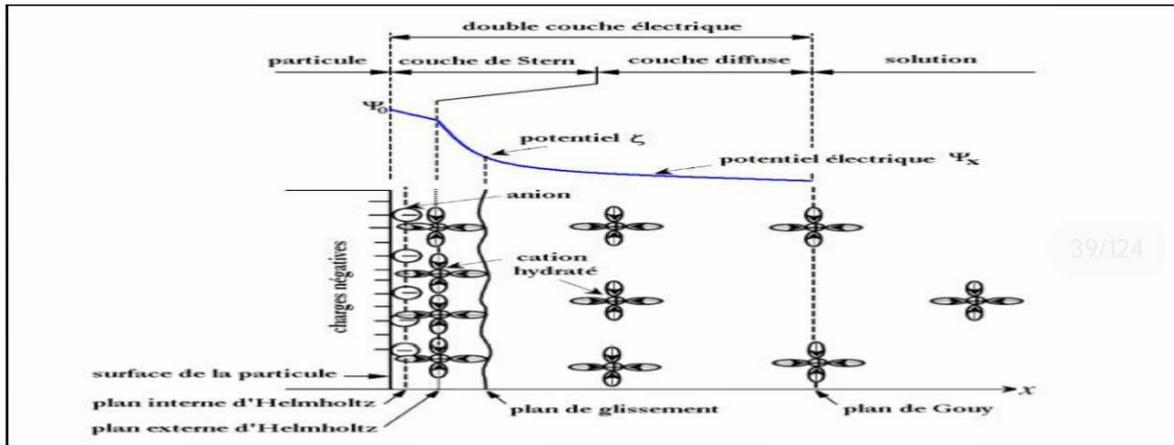


Figure 21 : Sémantisation de la structure multicouche de l'interface eau-argile. La Double couche électrique et l'évolution du potentiel électrique en fonction de la distance à La particule.

La couche de liquide qui entoure la particule peut être envisagée sous la forme de deux couches distinctes :

(i) La première couche, la plus proche de la surface, est constituée d'ions solidement liés à cette dernière. Cette couche, appelée couche de Stern, est composée de cations immobiles qui sont étroitement associés à la surface.

(ii) La seconde couche, plus mobile, présente une distribution ionique influencée par les forces électriques ainsi que par les mouvements thermiques aléatoires. Cette couche, appelée couche diffuse, est caractérisée par une distribution ionique moins structurée et plus mobile que la couche de Stern[43-70].

La limite entre la couche de Stern et la couche diffuse est définie comme le plan externe de Helmholtz, suivi du plan de cisaillement ou plan de glissement[70-71].

L'ensemble de la couche de Stern et de la couche diffuse forme la double couche électrique de la particule en suspension. Cette structure implique une concentration élevée en ions positifs près de la surface de la particule, qui diminue progressivement en s'éloignant de celle-ci.

Près de la surface, il existe un déficit en anions, repoussés par les forces électrostatiques. Cette disparité de concentration entre anions et cations engendre un potentiel électrique. Sur la figure 23, nous avons schématisé l'évolution de la concentration en ions et du potentiel électrique en fonction de la distance à la surface de la particule [70-69].

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

Le potentiel électrique est égal à ψ_0 à la surface de la particule et diminue de manière linéaire dans la couche de Stern. La valeur du potentiel au niveau du plan de glissement est appelée « potentiel Zêta ». C'est la seule valeur accessible expérimentalement grâce à un zétamètre. En pratique, le potentiel ζ (localisé au niveau du plan de glissement) est souvent confondu avec le potentiel de Stern (ψ_s), qui se situe au plan externe de Helmholtz (figure 23) [32-43-72].

D'après la théorie de Gouy(1910)-Chapman ((1913)[73-74], le potentiel électrique diminue exponentiellement au-delà du plan de Helmholtz, et à une distance infinie du feuillet, il peut s'annuler pour maintenir l'électroneutralité de la solution.

Le potentiel zêta (mesuré en coulomb/m²) est particulièrement important du point de vue pratique, car il varie en fonction de l'environnement de la particule, contrairement à d'autres caractéristiques physiques ou chimiques. Dans la littérature[43], ce potentiel est associé au plan de glissement (figure 23).

Lorsque la particule se déplace dans le milieu, la structure de la couche de Stern reste stable. Les interactions réelles entre les particules se produisent au niveau du plan de glissement, où le potentiel zêta est mesuré. Cependant, la littérature présente des opinions divergentes concernant la position exacte du plan de glissement dans la couche diffuse du colloïde.

Généralement, on pense que la position du potentiel zêta est proche du plan externe de Helmholtz, également (appelé plan de Stern)[69]. Cependant, une étude récente remet en question cette définition en suggérant que la position réelle du potentiel zêta se trouve dans la couche diffuse, sur le plan de Gouy (figure 23).

II.4.5 Bilan des forces d'interactions entre particules

Les forces d'attraction, de répulsion et de friction inter-particulaires en milieu aqueux sont les composantes essentielles du comportement mécanique macroscopique des suspensions colloïdales. Voici un résumé des différents types d'interactions entre les feuillets de smectites, tel qu'inventorié par Güven et Pollastro (1992) [70] et résumé par Besq (2000) [71] et Leyama (2001) [69] :

- **Mouvement Brownien et diffusion**** : Mouvement aléatoire caractéristique qui éloigne les particules solides de leur position initiale sous l'effet de l'agitation thermique des molécules du fluide.

- **Forces de répulsion de Born**** : Apparaissent à de courtes distances (environ 0,1 nm), résultant de l'impossibilité de recouvrement des nuages électroniques, empêchant un contact trop étroit entre les particules et générant un potentiel d'interaction important.

- **Forces de van der Waals** : Forces attractives résultant des fluctuations thermodynamiques du champ électromagnétique à l'intérieur et autour des particules, liées aux interactions entre dipôles fluctuants.

- **Forces osmotiques (répulsion de la double couche)** : Répulsion entre deux surfaces chargées de même signe, générée par le rapprochement de leurs doubles couches chargées de manière similaire.

- **Forces de solvation et d'interactions stériques** : Interaction spécifique de l'eau avec la surface et les ions en raison de sa structure et de ses propriétés, tenant compte de la taille des molécules du solvant et de la nature discrète du milieu de séparation des particules [70].

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

La courbe force-distance entre deux particules résulte de la combinaison de toutes ces forces et permet de déterminer les conditions de stabilité ou d'agrégation irréversible.

II.4.6 Types d'associations des particules

Contrairement à d'autres particules en suspension qui adoptent soit un état aggloméré soit un état dispersé, les particules de bentonite présentent un comportement plus complexe pour lequel aucune théorie n'a fait l'unanimité quant aux interactions inter-particulaires et à la structure de la suspension [12].

Dans la littérature, deux paramètres sont considérés comme décisifs pour définir le type et la force d'association, et donc la formation du gel : la concentration des particules argileuses et la salinité du milieu [43]

À faible concentration d'argile, les particules de bentonite ne sont pas associées dans une suspension très diluée, en raison de l'absence d'interaction entre les particules qui se repoussent mutuellement en raison de leurs doubles couches électroniques. La dispersion stable, minimisant l'énergie libre, se présente sous forme de feuillets individuels ou de très fines particules primaires [76]

Pour des concentrations plus élevées en argile, trois formes d'association des particules peuvent se produire lors de la floculation de la suspension, comme décrit par Van Olphen (1964) [77]. Ces différents modes d'organisation sont schématiquement représentés sur la figure 24.

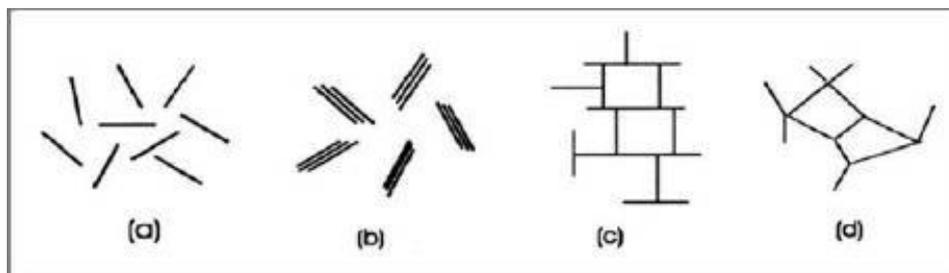


Figure 22 : Modes d'associations supposés des feuillets de montmorillonite en suspension

(a) Dispersion, (b) agrégation face-face, (c) association bord-face, (d) association bord-bord [Van Olphen (1964)]

Pour donner une idée de la concentration à laquelle une suspension de bentonite peut former un gel, on peut se référer au travail de Darley et Gray (1988) [78]. Ils ont montré que des concentrations de montmorillonite sodique supérieures à 3% peuvent entraîner la floculation des feuillets et des particules primaires, conduisant à la formation d'un gel tridimensionnel. Ce phénomène a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs pour comprendre les interactions entre les particules et la structure de la suspension lors de la formation du gel. Cependant, aucune théorie ne semble encore largement acceptée pour expliquer ce processus complexe [12].

Sur la figure I.24, Van Olphen (1964)[77] a distingué quatre modes d'association de particules argileuses :

a) **État dispersé** : caractéristique d'une argile très diluée.

b) Organisation face à face : résultant des interactions des doubles couches électriques de deux feuillets. Cette organisation peut entraîner l'agrégation des feuillets lorsque les doubles couches coalescent et que les feuillets ne sont séparés que par une couche médiane de cations positifs. Cela peut conduire à la formation d'agrégats de feuillets parallèles distants de moins de 20 Å [79]. Dans ce cas, les unités structurales pouvant contribuer à la formation d'un gel sont moins nombreuses en raison de la diminution de la surface d'interaction entre l'argile et la solution [43].

c) Organisations bord-face.

d) Organisation bord-bord : les bords des feuillets de montmorillonite sont constitués de liaisons rompues de silice et d'alumine, présentant un caractère amphotère. Selon le pH de la solution, ils peuvent être chargés positivement ou négativement. Sous certaines conditions de pH, les bords des feuillets et les faces présentent des polarités opposées, générant des forces électrostatiques attractives. Cela permet la formation d'organisations de type « château de cartes », piégeant davantage d'eau que l'agrégation face à face et conduisant à une structure continue semblable à un gel [43-55].

Dans la littérature, l'hypothèse de l'organisation en « château de cartes » pour expliquer le gel des suspensions de smectite n'est pas largement acceptée [43]. D'autres théories sur les modes d'association des particules menant au gel ont été avancées. Cette théorie présente deux principales limitations, notamment en raison de la controverse entourant l'existence des interactions bord-face. La première limite réside dans la faible probabilité de prédominance d'une interaction bord-face par rapport à la répulsion face-face, en raison de la faible surface des bords par rapport aux faces dans le cas de la montmorillonite [80].

Une autre critique de cette théorie est son application à des valeurs élevées de pH, où les charges portées par les bords et les faces des feuillets sont négatives. Pour expliquer la formation du gel sans recourir au modèle du château de cartes, Callaghan et Ottewill (1974) [80] attribuent le gel à des interactions répulsives à grande distance entre les doubles couches électriques. Ces idées ont été renforcées par les travaux de Rand et al. (1980) [81], qui n'ont pas observé d'association bord-face pour des gels formés de montmorillonite à des valeurs de pH supérieures à 4, remettant ainsi en question l'hypothèse du château de cartes. Cependant, ces auteurs ne contestent pas l'existence des interactions bord-bord.

Selon Norrish (1954) [53], les bords de feuillets présentent un potentiel électrostatique minimal, favorisant ainsi la floculation. M'Ewen et Pratt (1957)[82] ont utilisé cette explication pour proposer une structure en trois dimensions où les feuillets sont liés par les bords tandis que les faces se repoussent. Cette structure, illustrée sur la figure I.25 (a), permet, selon ces auteurs, de retenir une grande quantité d'eau grâce aux interactions bord-bord, ce qui est cohérent avec les résultats expérimentaux observés en gonflement.

En opposition à cette théorie, d'autres chercheurs comme Vali et Bachmann (1988)[83] défendent le modèle de bandes, initialement proposé par Weiss et Frank (1961)[84]. À partir d'observations en microscopie électronique et de caractérisations rhéologiques, ils ont mis en évidence l'existence d'un réseau tridimensionnel d'agrégats en forme de feuillets. Ces agrégats seraient constitués de feuillets agglomérés par des interactions face-face, mais avec un recouvrement partiel de leurs surfaces respectives. La flexibilité des feuillets permettrait ainsi d'obtenir un réseau tridimensionnel, comme illustré schématiquement sur la figure 25 (b). Parallèlement, Brandenburg et Lagaly (1988) [85] ont confirmé la probabilité de l'existence d'une telle structure pour des pH alcalins, tout en ne remettant pas en cause l'existence de la structure en château de cartes pour des valeurs de pH acides.

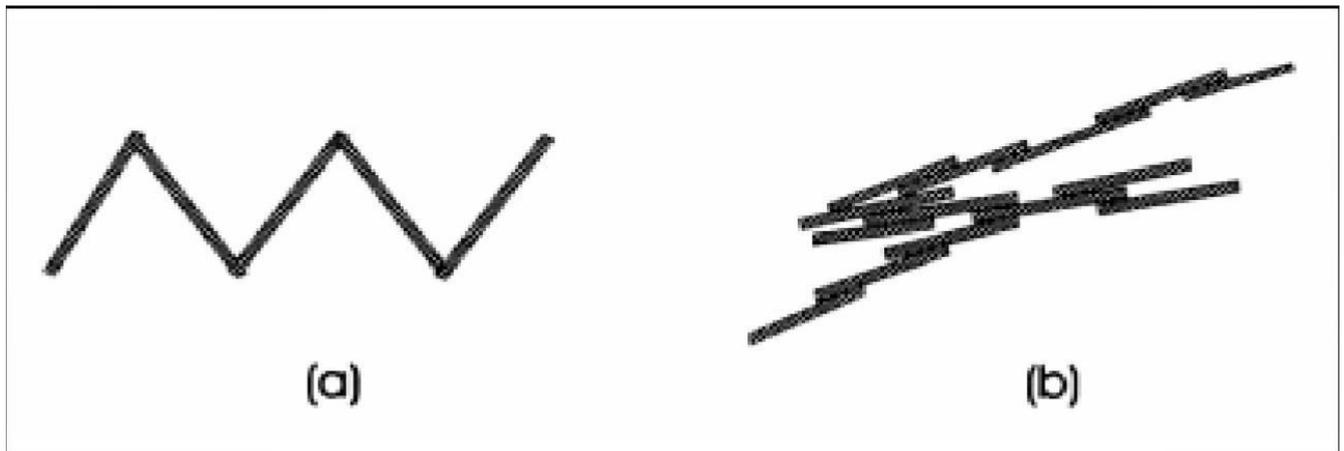


Figure 23 : Représentation schématique a) de l'organisation proposée par M'Ewen et Pratt (1957) ; b) en deux dimensions du « modèle de bandes » proposé par Weiss et Frank (1961)

Keren et al. (1988) [86] proposent une autre structure basée sur des interactions face-face pour représenter les gels à des pH ne permettant pas les interactions bord-face. Ils mettent en avant l'hétérogénéité de répartition des charges à la surface des feuillets, postulant l'existence de zones ponctuelles non chargées où les forces de répulsion entre feuillets ne s'exerceraient pas. Ils ont également déterminé les valeurs critiques de floculation de la Na-montmorillonite en suspension aqueuse à différentes valeurs de pH, détectant un volume de gel relativement important pour une suspension diluée à un pH d'environ 9,8, indiquant ainsi l'existence d'une structure tridimensionnelle ouverte, dominée par une association face-face.

De Kretser et al. (1998) [87] ont conclu à une orientation aléatoire des feuillets en association bord-bord lors de la floculation et en association face-face lors de l'agrégation de la montmorillonite, avec une absence d'association bord-face.

Pignon et al. (1998) [88] ont caractérisé la structure de gel de la kaolinite à différentes échelles, montrant l'existence de zones organisées de quelques dizaines de nanomètres qui se combinent pour former des agrégats macaroniques liés à une structure tridimensionnelle continue, présentant un comportement fractal.

La structure multi-échelle de la kaolinite adopte une approche fractale, comme illustré schématiquement sur la figure 26. Aux alentours de la transition sol-gel, qui se situe entre un taux volumique de 0,35 % et 0,56 % pour la kaolinite, le gel prend une structure fibreuse. À des concentrations supérieures, au-dessus de 1,2 % en volume, la structure du gel devient hétérogène, avec des zones denses et des zones moins denses en agglomérats.

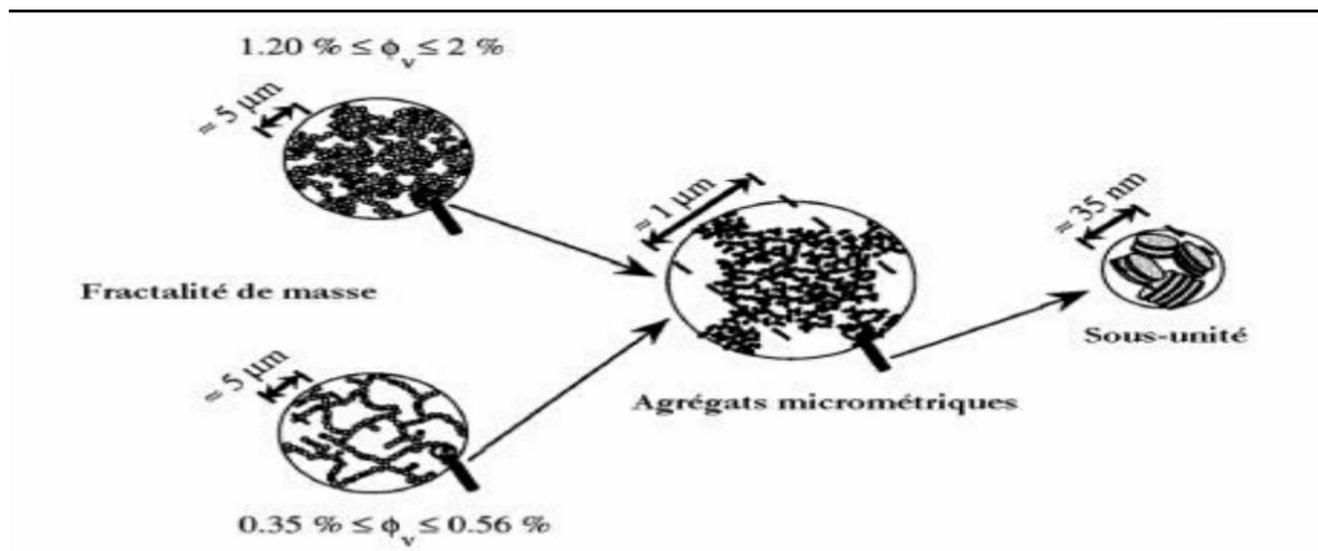


Figure 24 : Représentation schématique multi-échelle de la structure fractale des gels de kaolinite, d'après [Pignon et al. (1998)]

Selon des études récentes [89-90-91-92-93-94-95-96], pour des pH élevés, il est possible d'envisager la formation d'une structure tridimensionnelle ouverte, favorisant les liaisons face-face.

II.5. La bentonite dans le monde

Les réserves mondiales de bentonite s'élèvent à des millions de tonnes, avec les plus grandes réserves situées aux États-Unis, totalisant 13 millions de tonnes. Environ 90% de la production mondiale de bentonite provient de 22 pays, notamment l'Arménie, l'Australie, l'Azerbaïdjan, la Biélorussie, la Bulgarie, la République tchèque, l'Allemagne, la Grèce, l'Italie, le Japon, le Kazakhstan, le Kirghizistan, le Mexique, la Moldavie, la Russie, l'Afrique du Sud, le Tadjikistan, la Turquie, le Turkménistan, l'Ukraine, les États-Unis et l'Ouzbékistan [97]. Le tableau 07 présente les principaux pays producteurs de bentonite dans le monde pour la période 2013-2017 [98].

Tableau 07 : Production mondiale de la bentonite (en tonne) [98]

Pays	2013	2014	2015	2016	2017
USA	4350000	4800000	40100000	3600000	3700000
Russie	24127	18583	19355	26758	33777
Algérie	27670	31510	34100	37200	37000

II.6. Les principaux usages industriels de la bentonite

La bentonite est l'un des minéraux industriels les plus polyvalents et largement utilisés dans de nombreuses applications (Figure 27) [99]. Sa large gamme d'applications technologiques est attribuable à plusieurs facteurs, notamment sa composition minéralogique et chimique, ses propriétés physiques et chimiques globales, ainsi que sa distribution granulométrique (capacité d'échange cationique, surface spécifique, dimensions et formes des particules, cristallinité) [100]. Chaque application spécifique requiert des propriétés d'adsorption, des caractéristiques mécaniques (viscosité, seuil d'écoulement, thixotropie) et des critères minéralogiques (présence de minéraux non argileux, polymères, tensioactifs) adaptés à ses besoins particuliers. Dans le cadre de cette thèse, nous ne couvrirons que quelques-unes des applications des minéraux argileux de type « smectites ».

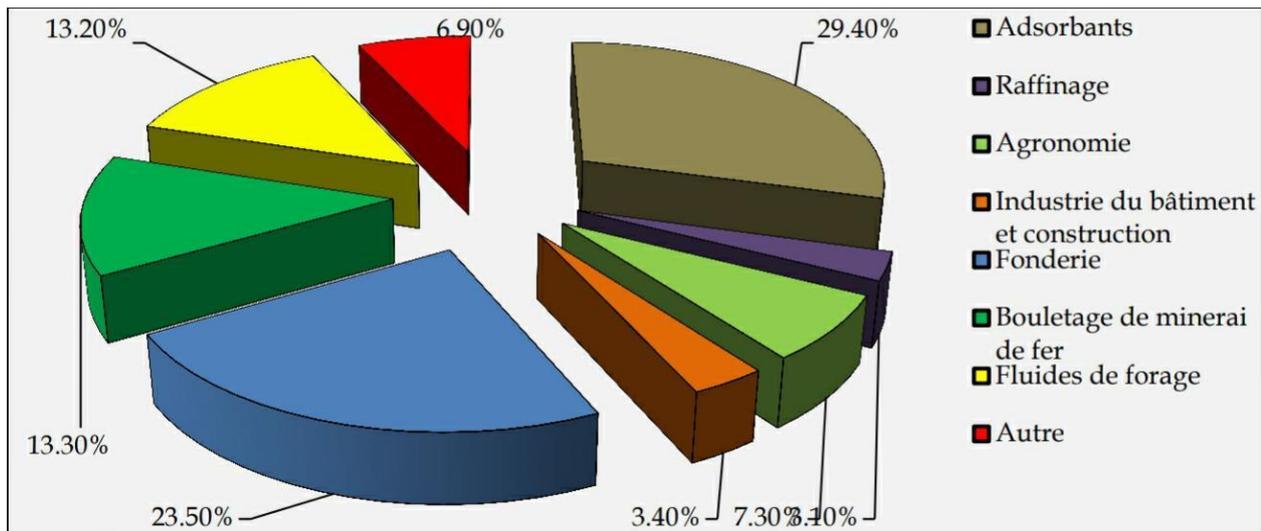


Figure 25 : Domaines industriels d'utilisation des bentonites [99]

II.6.1 La bentonite dans les boues de forage

L'industrie pétrolière est le principal utilisateur de la bentonite, où elle est employée comme agent de viscosification dans les boues de forage. Grâce à ses propriétés rhéologiques, la bentonite répond aux nombreuses exigences des puits pétroliers, telles que la stabilité du trou de forage (en imprégnant le terrain et en formant un gâteau pour limiter la filtration vers les parois) et l'élimination des déblais.

Lors du processus de forage, la boue bentonitique est injectée sous pression à l'intérieur de la tige de forage et remonte le long des parois du forage. Elle lubrifie d'abord la tête de forage, puis englobe les déblais pour faciliter leur extraction, et enfin dépose une couche stabilisatrice sur les parois. En cas d'arrêt temporaire des travaux, la boue se gélifie, maintenant les déblais en suspension pour éviter leur sédimentation. Lors de la reprise des travaux, la boue se fluidifie et les opérations reprennent. Si les pertes de circulation ne sont pas trop importantes, la boue utilisée est recyclée et éventuellement réinjectée dans le forage. En ajustant les propriétés de la boue, il est parfois possible de colmater les pertes.

II.6.2 La bentonite dans l'environnement

La forte capacité d'échange cationique (CEC) et le pouvoir d'adsorption des bentonites en font des matériaux de dépollution efficaces pour traiter les milieux contaminés par divers composés organiques, hydrocarbures, huiles et eaux contaminées par des métaux lourds tels que le mercure, le nickel, le zinc, le cadmium, l'argent, le plomb, le cobalt ou le chrome. Elles sont également utilisées pour créer des barrières étanches dans la gestion des déchets industriels et ménagers, ainsi que des déchets toxiques et radioactifs.

II.6.3 La bentonite en génie civil

La bentonite trouve également des applications dans le génie civil, notamment dans l'étanchéité des structures, la construction de digues, l'installation de canalisations, la construction de tunnels et l'injection de vides souterrains.

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

II.6.4 La bentonite en fonderie

La bentonite de fonderie est utilisée pour la préparation des moules en fonderie, en particulier avec l'introduction sur le marché des sables dits synthétiques. Ces sables sont principalement constitués de silice mélangée à de l'argile sodique dans des proportions allant de 4 à 6 %. Pour les moulages sous pression, cette proportion peut être considérablement augmentée, atteignant parfois 10 à 15 %. L'utilisation croissante des bentonites dans ce secteur est un développement significatif, notamment aux États-Unis, où le sable de fonderie constitue le principal marché pour les bentonites non gonflantes et le troisième marché en importance pour la bentonite de type Wyoming.

II.6.5 La bentonite dans l'industrie agro-alimentaire

Les bentonites trouvent leur utilisation dans le domaine agro-alimentaire en tant qu'agent de texture dans la production de divers aliments pour animaux. Elles sont également employées pour la filtration des bières, la clarification des boissons telles que l'eau et le vin, ainsi que pour la clarification des huiles alimentaires d'origine végétale et minérale.

II.6.6 La bentonite dans l'industrie de papier

La bentonite est employée pour améliorer le processus de conversion de la pâte en papier et pour améliorer la qualité du papier en empêchant l'agglomération des particules de caoutchouc. Grâce à sa capacité d'absorption, la bentonite offre également des propriétés de désencollage bénéfiques pour le recyclage du papier.

II.6.7 La bentonite dans l'industrie de céramiques

Comprendre les propriétés rhéologiques des céramiques, constituées de mélanges d'argile, de quartz et de feldspath, est essentiel pour assurer leur écoulement et préserver leur forme. La bentonite est également utilisée pour maintenir en suspension des mélanges de particules relativement grossières dans les émaux.

II.6.8 La bentonite dans l'industrie des peintures

Dans l'industrie de la peinture, la bentonite sert à épaissir les liquides. Il est crucial que la peinture s'écoule suffisamment pour assurer une bonne couverture, tout en pouvant se transformer en gel lorsque le mouvement cesse. Cela permet de contrôler la durée de séchage des peintures, évitant ainsi les marques de pinceau si le séchage est trop rapide, ou les coulures si le séchage est trop lent.

II.6.9 Autres utilisations

Les bentonites sont utilisées dans de nombreuses autres applications, telles que charge minérale dans les engrais, les insecticides et pesticides, les aliments pour le bétail, les lacs, les polymères, en agriculture, et comme agent de décoloration des huiles,etc.

II. 7. Les applications pharmaceutiques et cosmétiques

II. 7.1 L'argile et la bentonite dans la pharmacie : une histoire [101]

L'argile a été utilisée depuis longtemps dans les domaines médical, pharmaceutique et cosmétique. Selon la littérature, les humains employaient des argiles à des fins thérapeutiques,

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

comme matériau pour soigner les plaies, soulager les irritations, nettoyer la peau et inhiber les hémorragies, entre autres. Dans l'Égypte ancienne, les médecins du pharaon utilisaient la terre de Nubie (au nord du Soudan) comme agent anti-inflammatoire pour traiter les plaies cutanées et les maladies internes, ainsi que pour la momification. Cléopâtre, reine d'Égypte, utilisait la boue de la mer Morte pour des soins esthétiques. À l'époque grecque antique, des matériaux à base de boue servaient de cataplasmes antiseptiques pour traiter les affections cutanées, favoriser la cicatrisation et soigner les morsures de serpent.

II.7.2 Utilisations modernes de la bentonite dans l'industrie pharmaceutique et cosmétique [102- 103 – 104 – 105 – 106 – 107 – 108 – 109 – 110 -111 – 112 – 113 – 114]

L'utilisation de minéraux argileux dans les produits pharmaceutiques et cosmétiques a été largement documentée par de nombreux auteurs (Bolger, 1995; Carretero, 2002; Cerri et al., 2004; López Galindo et Viseras, 2004; Love, 2004; Carretero et al., 2006; Droy-Lefaix et Tateo, 2006; Carretero et Pozo, 2007, 2009, 2010). En raison de leurs propriétés fondamentales telles qu'une surface spécifique élevée (SSA), une grande capacité d'adsorption (pour les ions ou les molécules), une capacité d'échange cationique (CEC), des caractéristiques rhéologiques favorables, une thixotropie, des propriétés colloïdales, une capacité de gonflement, une dispersivité, une plasticité, une inertie chimique, une toxicité faible ou nulle pour le patient et un coût faible, les minéraux argileux, et particulièrement les bentonites, sont largement utilisés dans les produits pharmaceutiques :

II.7.2.1 Excipients

Les excipients pharmaceutiques, également appelés « véhicules » ou « adjuvants », sont des substances inactives en elles-mêmes mais qui facilitent l'administration et la conservation du principe actif d'un médicament. Une qualité essentielle d'un excipient est son inertie ; il doit être, autant que possible, inerte vis-à-vis des principes actifs, des matériaux de conditionnement et de l'organisme. Cependant, il est important de noter qu'un excipient peut parfois modifier significativement l'activité d'un principe actif, ce qui nécessite souvent de refaire des essais cliniques après un changement d'excipient.

Les argiles bentonitiques sont considérées comme des matériaux principalement non toxiques et non irritants aux niveaux utilisés dans les excipients pharmaceutiques. Elles sont incluses dans le « **Guide des ingrédients inactifs** » publié par la Food and Drug Administration (FDA), qui répertorie tous les ingrédients inactifs présents dans les produits pharmaceutiques approuvés (ou approuvés sous condition) pour un usage humain.

II.7.2.2 Utilisation des argiles en tant que substances actives [102 –103-104-105-106-107-108-109-110-111-112-113-114]

• Antidiarrhéiques

Les antidiarrhéiques sont généralement classés en quatre catégories : antipéristaltiques, adsorbants, antisécrétoires et enzymes digestives. Les minéraux argileux sont également utilisés en pharmacie en raison de leurs propriétés biologiques, que ce soit pour traiter les maladies gastro-intestinales ou pour des applications topiques. Ils sont aussi employés dans le traitement de certaines maladies spécifiques.

Parmi ces minéraux, la bentonite est particulièrement efficace dans le traitement de la diarrhée infectieuse. Elle réduit la durée et la fréquence des selles liquides en absorbant l'eau et les

Chapitre II : Généralité et domaine d'utilisation de la bentonite

électrolytes dans l'intestin, en diminuant la mucolyse causée par les bactéries, et en protégeant la surface luminale contre les bactéries pathogènes.

De plus, certains chercheurs ont décrit l'utilisation de la smectite dans le traitement de la diarrhée aiguë, bien que cette utilisation ne soit pas actuellement recommandée [102-104]. En revanche, Carretero [12] a récemment présenté la smectite Na⁺ comme un laxatif osmotique, bien qu'aucune preuve expérimentale ne vienne étayer cette affirmation.

• Anti-inflammatoire et antiseptique

L'argile bentonitique est utilisée dans des poudres à épousseter pour apaiser les irritations et prévenir les rugosités. Elle est également utilisée pour traiter des symptômes de mal de gorge, tels que l'amygdalite, la pharyngite et la stomatite, grâce à sa capacité à adsorber les déchets.

Les mélanges de kaolin, bentonite et palygorskite sont proposés comme pansements pour le traitement des blessures cutanées, en particulier les brûlures [115]. La kaolinite est appliquée localement sous forme de pâte de kaolin pour réduire l'inflammation [116]. De plus, des pâtes de kaolin et d'acide salicylique sont utilisées comme anti-inflammatoires topiques pour traiter la douleur et la tendinite musculaire.

Les argiles fibreuses, telles que la bentonite et la kaolinite, sont également utilisées dans le traitement des inflammations aqueuses. Elles absorbent la fraction aqueuse de l'inflammation et retiennent probablement aussi la fraction protéique. Ces argiles peuvent également adsorber efficacement les toxines et les bactéries présentes dans le tractus gastro-intestinal.

• Certaines applications topiques

L'utilisation des minéraux argileux dans des formes posologiques topiques (crèmes, laits et poudres) est proposée en raison de leur capacité à adsorber efficacement une variété de substances indésirables, comme les graisses, les exsudations cutanées et les toxines bactériennes [117]. Cependant, dans ces formulations, les minéraux d'argile sont généralement utilisés comme excipients. Ces substances auxiliaires aident à maintenir la dose du principe actif sur la zone à traiter en augmentant la viscosité du système. De plus, ils favorisent l'adhésion à la peau et maintiennent une concentration élevée de médicament près de la zone traitée.

II.7.2.3 Utilisation comme formes posologiques liquides et semi-solides

Les argiles sont utilisées comme agents de suspension dans des mélanges complexes de composants pour prévenir la sédimentation et la séparation de certains médicaments liquides. Elles permettent de maintenir les composés en suspension de manière uniforme et répartie.

Les systèmes dispersés ont diverses applications dans les domaines pharmaceutiques et cosmétiques, comprenant les produits liquides tels que les suspensions et les émulsions, ainsi que les semi-solides comme les pommades, les crèmes et les gels. Dans ces systèmes, une phase discontinue est dispersée dans un milieu appelé véhicule ou phase externe. Les systèmes de dispersion solide dans liquide (suspensions grossières et dispersions colloïdales) et liquide dans liquide (émulsions) sont thermodynamiquement instables, ce qui nécessite une rhéologie précise et des contrôles de stabilité pour éviter la séparation des phases avec le temps.

II.7.2.4 Interactions médicamenteuses

La co-administration d'agents gastro-intestinaux à base d'argile, tels que les antidiarrhéiques et les antiacides, ou la présence de stabilisants à base d'argile dans les formulations liquides, peut réduire l'absorption de nombreux médicaments oraux. Ainsi, il est recommandé de respecter un intervalle d'administration aussi long que possible entre ces préparations et d'autres substances actives.

Par exemple, l'absorption de la promazine diminue lorsqu'elle est administrée en association avec des mélanges antidiarrhéiques contenant de la palygorskite. Depuis ces études, de nombreux auteurs ont rapporté une diminution de la biodisponibilité de plusieurs médicaments en raison de leur co-administration avec du tri-silicate de magnésium et de la palygorskite.

II.7.2.5 Utilisation en cosmétique [102 –103-104-105-106-107-108-109-110-111-112-113-114]

Les argiles bentonitiques sont largement utilisées dans les soins cosmétiques et thérapeutiques en raison de leur grande capacité d'absorption. Elles sont disponibles sous plusieurs formes telles que poudre, pâte, morceaux et gélules. Les bentonites sont utilisées dans une variété de produits cosmétiques, comme : **Crèmes , Poudres , Emulsions .**

Chapitre III

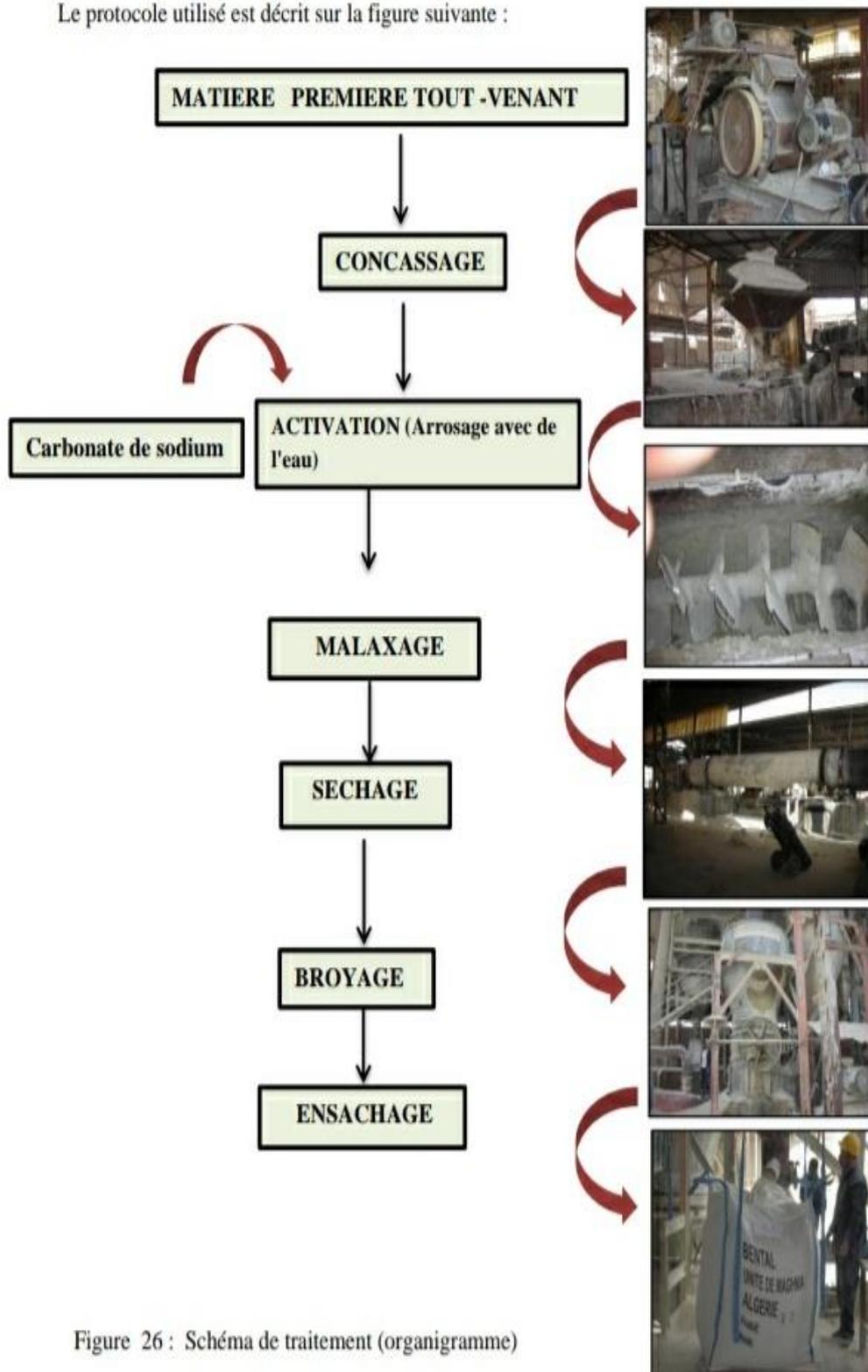
Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé

Chapitre III : Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé

III.1. Processus de traitement de la bentonite de Hammam Boughrara - Maghnia

Le traitement de la bentonite de Hammem Boughrara est un procédé de traitement conventionnel classique par voie sèche comprenant le concassage, l'activation, le séchage, le broyage et enfin l'ensachage du produit marchand (Figure 28).

Le protocole utilisé est décrit sur la figure suivante :



Chapitre III : Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé

La fabrication de la bentonite au sein de carrière de Hammam Boughrara est le résultat d'un processus de traitement qui comporte plusieurs stades [118]

Etape 1 : Alimentation et concassage

Après le transport, la première étape du traitement est le concassage. Son objectif est de réduire les dimensions des particules à une granulométrie inférieure à 50 mm.

Etape 2 : Activation

L'opération d'activation du tout-venant consiste à :

- Etaler 10 godets de pelle mécanique du tout venant
- Ajouter 1.250 Tonnes de carbonate de soude
- Mélanger le tas à l'aide de la pelle mécanique
- Alimenter la section par le tout-venant préparé

Etape 3 : Séchage

Le séchoir à une forme d'une cylindrique rotatif de longueur de 12 m et un diamètre de 1.40 m A l'aide d'un tapis roulant le tout-venant activé et concassé est envoyé vers le séchoir de température environ de 450°C -500°C à la chambre et de 80°C -120°C au cylindre

Etape 4 : Broyage

Le broyeur utilisé est un broyeur pendulaire (trois pendules).

Le broyage se fait par l'action de rotation des trois pendules sur le chemine de roulement, chaque pendule porte un galet ; l'alimentation des galets se fait par des socs .Le mélange séché va subir un broyage pour obtenir une poudre fine .La sélection de la taille des particules se fait a l'aide d'un séparateur statique et un compresseur qui injecte un l'air a un débit convenable a fin de laisser passé que des particules très fines de dimension environ 60µ-150µ.

9. 5 Etape 5 : Ensachage

Le produit fini est conditionné et expédie dans des sacs de 50 kg ou bien dans des Big-bag de 1.250 Tonne pour vieillissement ou bien pour expédie directement.

III.2. Valorisation des bentonites du gisement de Hammem boughrara – Maghnia

La minéralurgie, ou traitement des minerais, englobe un ensemble d'opérations qui utilisent diverses techniques physiques et physico-chimiques pour transformer des substances minérales naturelles en matières premières de valeur marchande. Ce processus vise principalement à séparer les fractions contenant des éléments utiles, appelées concentrés, des résidus sans valeur commerciale immédiate, appelés stériles. L'enrichissement du minerai suit un schéma de procédé (flow sheet en anglais) qui est soigneusement élaboré et adapté pour chaque type de minerai.

Chapitre III : Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé

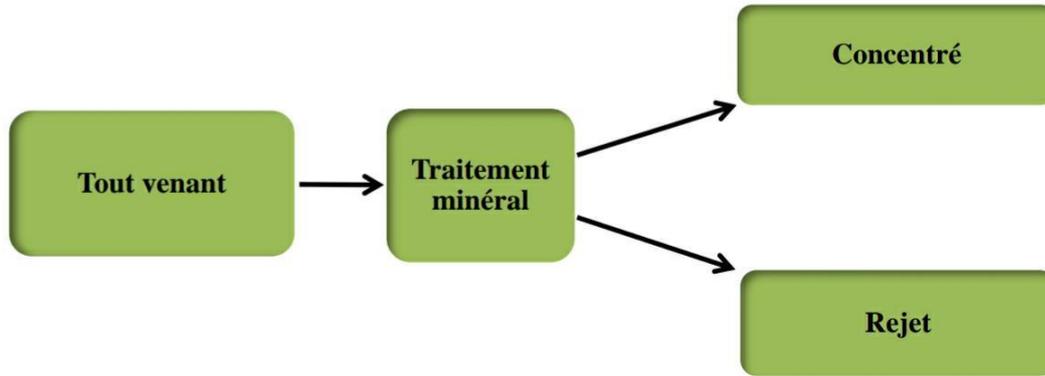


Figure 27 : Flux issus de la séparation minéralurgique d'un minerai

Le choix d'un procédé de traitement dépend des caractéristiques et des propriétés physiques et chimiques des éléments minéraux présents dans le minerai issu de l'usine de préparation mécanique. Ce choix est principalement influencé par :

- La nature du gisement, incluant la minéralogie et la pétrographie.
- Le type de gisement, qu'il soit primaire ou secondaire.
- La granulométrie du produit traité, c'est-à-dire la taille des grains obtenus.
- Le coût actuel de la substance utile.

Mode opératoire

III.3. MODE OPÉRATOIRE

III.3.1. Contrôle du tout-venant (matière première) :

Préparation de l'échantillon (phase 1):

- Concasser l'échantillon
- Mélanger ensuite et procéder au quartage jusqu'à l'obtention d'un échantillon représentatif d'environ 200 g

Préparation de l'échantillon (phase 2) :

Activation au carbonate :

- Prendre 100 g de tout-venant
- Ajouter un % de carbonate de sodium.
- Mélanger le tout avec un peu d'eau jusqu'à obtention d'une pâte.
- Former de petites billes et les mettre dans l'étuve de température environ

115°C pendant 45 mn.

- Broyer le produit et faire passer dans un tamis 150 μ .

Lecture sur viscosimètre à 600 tr/mn :

Equipement :

- Balance de précision à 0,01 g
- Mélangeur 11000 \pm 300 rpm en charge avec une seule couronne d'un diamètre d'environ 1 pouce.
- Récipient 7 pouces de profondeur (180 mm), (97 mm) diamètre de sommet et (70 mm) diamètre de base.
- Viscosimètre référence API spécification 13A
- Eprouvette graduée de 500 \pm 5 cm³
- burette de 50 cm³
- Broc de 500 cm³ environ
- Minuterie mécanique à 0,1 mn de précision
- Etuve 105°C \pm 3°C.
- Balance de précision à 0.01 g
- Spatule.

III.3.2. Procédure de mesure de la viscosité :

Introduction :

Une viscosité pourra être obtenue à partir d'une faible concentration de substances à poids moléculaire élevé aussi bien qu'à partir d'une concentration plus élevée de substances à poids moléculaire faible. Le coût de deux polymères fondés sur le poids étant essentiellement identique, il est plus rentable de fournir des dérivés à haute viscosité.

Chapitre III : Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé

Le comportement rhéologique de fluidification par cisaillement est complètement indépendant du problème de la dégradation mécanique ou chimique de la chaîne du polymère pour former un dérivé à poids moléculaire plus faible avec des caractéristiques de viscosité plus faible.

Mode opératoire :

- Préparer une suspension de $22,5 \pm 0,1$ g de bentonite dans 350 ± 5 cm³ d'eau distillée. Après agitation de $5 \pm 0,5$ mn, 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.

- Laisser la suspension de la bentonite en repos dans un broc pendant 16 heures à T° ambiants.

- Après vieillissement de 16 h, versez la suspension dans le container de l'agitateur et agiter pendant $5 \pm 0,5$ mn.

- Verser la suspension dans le broc du viscosimètre.

- Noter les lectures à 600 tr/ mn ce quant l'aiguille se stabilise sur le cadran.

III.3.3. Procédure de mesure de perte au filtrat :

Mode opératoire :

- reprendre la suspension précédente et agiter pendant $1 \pm 0,5$ mn.

- Verser la suspension dans la cellule de filtre presse. Avant la filtration

- vérifier l'étanchéité des pièces et s'assurer que celles-ci sont bien sèches

- Régler le timer à 30 mn, ouvrir la vanne de pression à 7 bars, et placer une éprouvette sous l'orifice de la cellule. Toutes ces opérations doivent être effectués simultanément dans moins de 15 secondes.

- Après les 30 mn le timer sonne, enlever l'éprouvette et noter le volume du filtrat.

III.3.4. Procédure de mesure de l'humidité :

Mode opératoire :

- peser $10 \pm 0,01$ g de bentonite (produit fini).

- Sécher à l'étuve jusqu'à poids constant (2 heures).

- Peser l'échantillon séché.

Calcul :

- Humidité (% en poids) = $\frac{\text{perte en poids}}{\text{poids de l'échantillon}}$

III.3.5. Indice de gonflement :

Introduction :

A l'état anhydre, les feuilletts 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.

Chapitre III : Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé

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 poids de l'échantillon perte en poids

Mode opératoire :

- Remplir la burette avec de l'eau distillée
- peser $0.5 \pm 0,01$ g de bentonite (produit fini) et en la verse dans la burette
- laisser le pendant 45 mn après en le ajouté un 0.5 g de bentonite et on la
- laisse gonfler pendant 2 heures
- noter le volume de gonflement

Calcul :

$$\text{Indice de gonflement} = \frac{\text{volume de gonfle} \times 50}{50 - \text{Humidité}}$$

III.3.6. Les normes de bentonite de forage :

Le contrôle de qualité de la bentonite de forage se fait selon la norme API 13 section 6.

Les paramètres contrôlés sont :

- lecture 600 tr/mN ≥ 30 cps (viscosité)
- Perte au filtrat ≤ 16 cm³
- Humidité $\leq 13\%$

Résultats et discussion

III.4. RESULTATS ET DISCUSSION

III.4.1. L'influence du pH sur la bentonite

L'influence du pH sur la bentonite est un sujet important en raison de son impact significatif sur le comportement rhéologique et les interactions inter-particulaires des suspensions de bentonite. Voici un résumé des principaux effets du pH sur la bentonite :

Effet sur la contrainte de cisaillement:

Milieu basique : À partir du pH naturel (neutre ou légèrement basique), lorsque le pH augmente et devient plus basique, la contrainte de cisaillement diminue initialement. Elle atteint un minimum avant d'augmenter brusquement dans un milieu très basique. Cela est dû à la formation d'une structure en "maison de cartes" résultant de répulsions bord à bord, bord à face, et face à face.

Milieu acide : Lorsque le pH diminue et devient acide, la contrainte de cisaillement augmente, atteignant un maximum en milieu faiblement acide avant de diminuer à nouveau dans un milieu très acide. En milieu acide, les forces attractives entre les particules dominent.

Effet sur les interactions inter-particulaires:

Milieu acide: Les forces attractives sont prépondérantes, favorisant l'agglomération des particules.

Milieu basique : Les interactions inter-particulaires sont dominées par des forces répulsives, conduisant à une structure dispersée et à une diminution initiale de la contrainte de cisaillement.

Point isoélectrique:

- Le point isoélectrique des bords de la bentonite est un facteur crucial pour comprendre les interactions électrostatiques entre les particules d'argile. Ce point varie en fonction du type de bentonite étudié.

Conductivité et mobilité électrophorétique :

- La conductivité et la mobilité électrophorétique des suspensions de bentonite varient également en fonction du pH, fournissant des informations sur la charge de surface des particules et la stabilité des suspensions.

III.4.2. L'influence de la viscosité sur la bentonite:

L'influence de la viscosité sur la bentonite est essentielle pour comprendre son comportement dans diverses applications industrielles. La bentonite est souvent utilisée en tant qu'agent épaississant, stabilisant ou pour ses propriétés de rétention d'eau. Voici comment la viscosité affecte la bentonite:

Formation de suspensions:

Concentration : La viscosité d'une suspension de bentonite dépend fortement de sa concentration. À faible concentration, la suspension peut être fluide avec une viscosité relativement

Chapitre III : Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé

basse. À mesure que la concentration augmente, la viscosité augmente également, rendant la suspension plus épaisse.

Effet du pH :

Milieu basique: En milieu basique, la viscosité des suspensions de bentonite tend à diminuer initialement en raison de la dispersion des particules et de la réduction des interactions attractives. À des pH très élevés, la viscosité peut augmenter à nouveau en raison de la formation de structures complexes de type “maison de cartes”.

Milieu acide: En milieu acide, la viscosité des suspensions de bentonite augmente en raison des forces attractives entre les particules, favorisant l’agglomération. À des pH très bas, la viscosité peut diminuer si l’acide attaque la structure de l’argile, la dégradant.

Interactions particulières:

- La viscosité est directement liée aux interactions entre les particules d’argile. En milieu neutre à faiblement basique, les forces électrostatiques entre les particules peuvent favoriser une certaine dispersion, réduisant ainsi la viscosité. En milieu acide, les forces attractives dominent, augmentant la viscosité.

Chapitre III : Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé

III.4.3. Influence de concassage :

Le but de cet essai est de voir l'influence de la grosseur des grains sur la qualité de produit fini (viscosité, indice de gonflement, humidité)

Tableau 8 : Influence du concassage sur la qualité du produit fini

		TV non active		TV active	
		Concassé	Non concassé	Concassé	Non concassé
Viscosité	Im	7	9	24	15
	16h	10	11	28	16
PH	Im	8.31	8.61	9.75	10.05
	16h	8.36	8.39	9.43	9.56
V de gonfle		6	5	11	8
Humidité		10.5	9.50	8.70	10.8
IG		7.59	6.17	14.03	9.68

Les résultats montrent que le tout-venant concassé activé donne des résultats importants de paramètres étudiés.

La granulométrie a une grande influence sur la réactivité entre le carbonate et le tout-venant. Plus les grains sont fins plus le contact entre les deux produits est grand et la réaction de sodification est rapide.

En conclusion, la granulométrie a un rôle sur la qualité des produits finis. Pour cela, il faut prévoir obligatoirement le concassage de tout-venant.

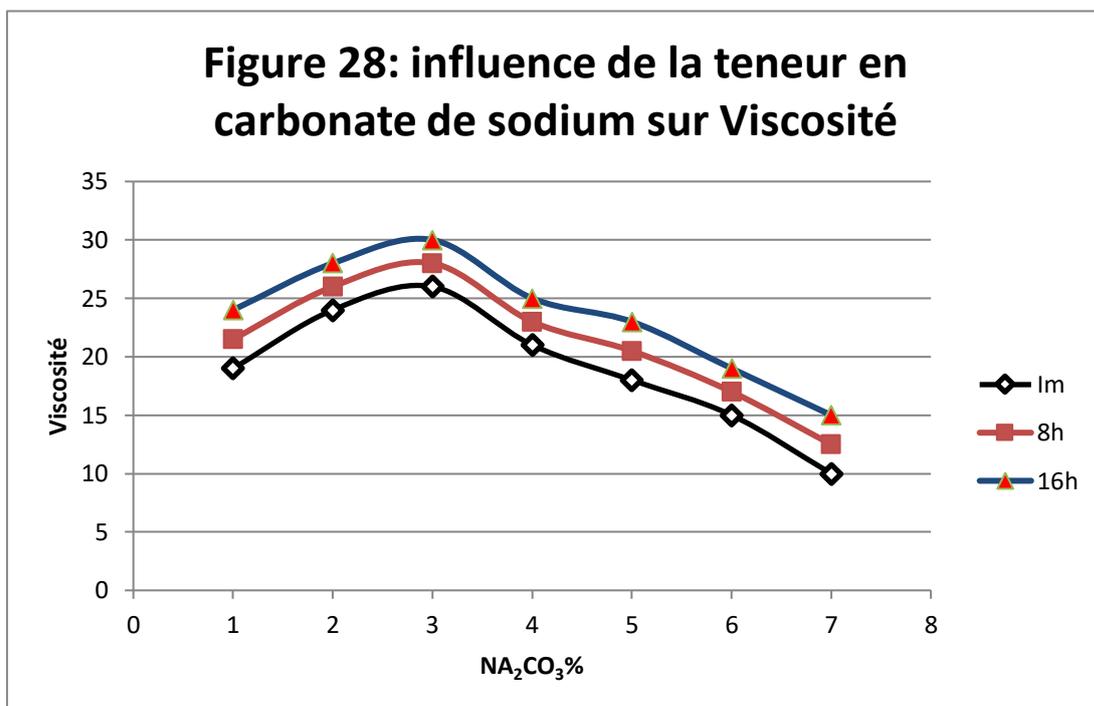
Chapitre III : Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé

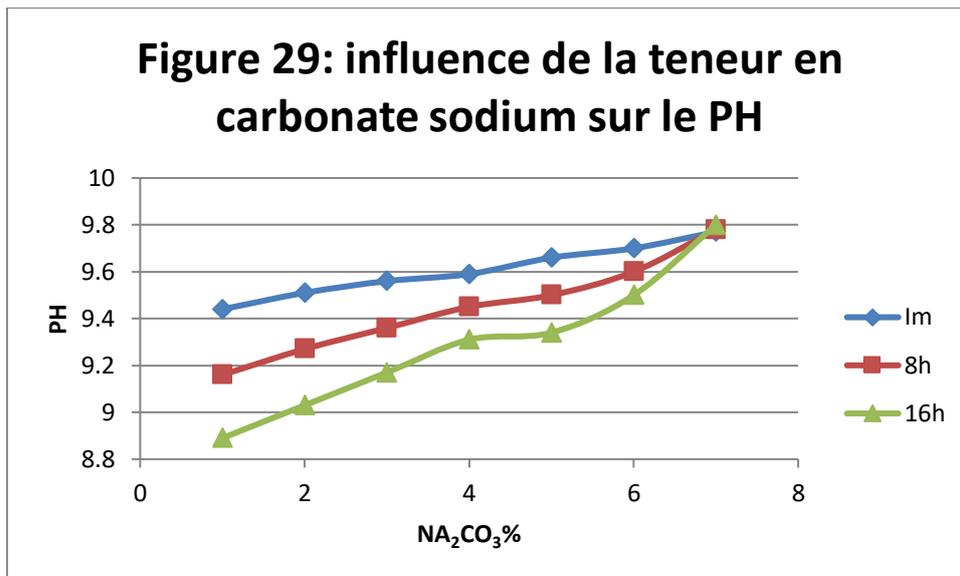
III.4.4.influence de la teneur en carbonate de sodium :

Le but de cet essai est de voir l'influence de la teneur en carbonate de sodium sur la qualité de produit fini (viscosité, indice de gonflement, humidité).

Tableau 9: Influence de la teneur en carbonate sur la qualité du produit fini

NA ₂ CO ₃ %		1	2	3	4	5	6	7
Viscosité	Im	19	24	26	21	18	15	10
	8h	21.5	26	28	23	20.5	17	12.5
	16h	24	28	30	25	23	19	15
PH	Im	9.44	9.51	9.56	9.59	9.66	9.70	9.77
	8h	9.16	9.27	9.36	9.45	9.5	9.6	9.78
	16h	8.89	9.03	9.17	9.31	9.34	9.50	9.80
H ₂ O		9	9	10	5.8	5.7	5.5	3
V de gonfle		10	12	12	10	8	7	7
IG		12.13	14.63	15.11	11.31	9.02	7.86	7.44





Chaque fois quand en ajout le carbonate de sodium la viscosité augment jusqu'à 3 %, au-delà de cette valeur, il y a une inflexion (diminution de la viscosité).

L'ajout le carbonate de sodium produit un échange cationique entre les Ca^{2+} de tout vent et les Na^+ de carbonate, Ca^{2+} a une affinité d'adsorbé l'eau qui se trouve dans la solution et par suite augmentation de la viscosité, et lorsque la solution sera saturé par Ca^{2+} il aura un excès de Na^+ (plus que 3%) et par suit il y a réaction entre OH et Na^+ est libération d'une quantité de H_2O ce qui provoque une diminution de la viscosité.

La teneur de 3% de carbonate de sodium est la conforme à la bonne qualité de produit fini.

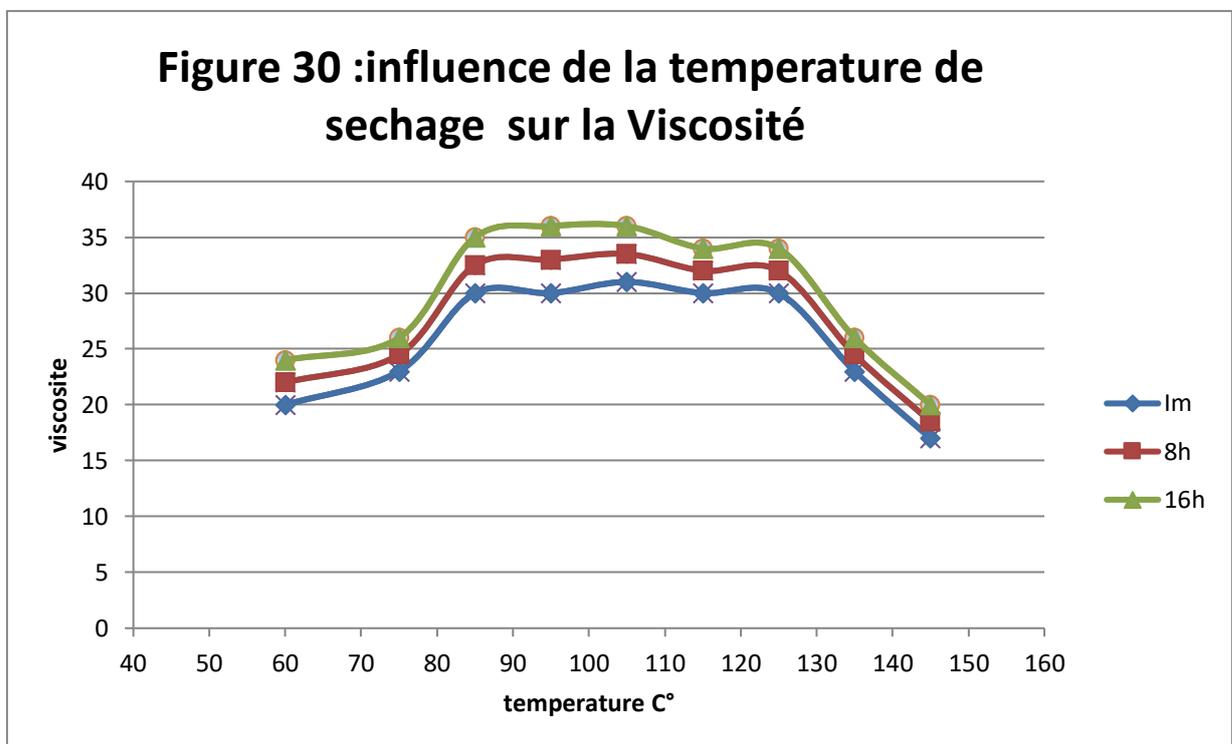
Chapitre III : Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé

III.4.5. Influence de la température de séchage :

Le séchage a pour but d'éliminer l'eau qui se trouve dans le tout vent a fin de facilite le broyage.

Tableau 10 : Influence de la température de séchage sur la qualité du produit fini

Température C°	50-70	75	85	95	105	115	125	135	145	
Temps mn	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
Viscosité Cps	Im	20	23	30	30	31	30	30	23	17
	8h	22	24.5	32.5	33	33.5	32	32	24.5	18.5
	16h	24	26	35	36	36	34	34	26	20
H ₂ O	8.10	8.10	8.10	9.20	8.12	7.60	7.20	3.80	1.14	
V de gonfle	11	12	12	13	13	12	12	10	10	
IG	13.12	14.31	14.32	15.90	15.50	14.15	14.02	10.82	10.29	



Chaque fois que la température augmente la viscosité augmente et à partir de 105 C° elle diminue.

On distingue plusieurs type de l'eau existe dans l'argile :

Chapitre III : Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé

- L'eau liée superficiellement à la particule qui ne nécessite pas assez de chaleur pour l'éliminer.

- L'eau d'adhésion qui lie au réseau cristallin il assure la mobilité des particules et son départ dégrade le réseau cristallin et par suite la qualité diminue.

Donc il y a un seuil de température de séchage à ne pas dépasser.

Critères requis des argiles bentonitiques brutes pour différentes applications industrielles:

Tableau 11 : Critères requis des argiles bentonitiques brutes pour différentes applications industrielles

Qualité	Spécifications	Applications Industrielles	Les bases de Traitement
1 ^{ère} qualité	$\text{Na}_2\text{O} > 2\%$	Pelletisation minerais Fe	Pelletisation : Séchage 10% humidité
	$\text{CaO} < 2\%$	Génie civil injection	génie civil : séchage < 5% humidité Broyage 85- 90% < 74 μ
2 ^{ème} qualité	SiO_2 55-65%	Génie civil injection	Séchage < 5% humidité max Broyage 85-90% < 74 μ
	CaO	Charge industrielle	
3 ^{ème} qualité	Indice de gonflement < 5	Traitement des eaux	Séchage < 10 humidités max Broyage 85-90% < 74 μ

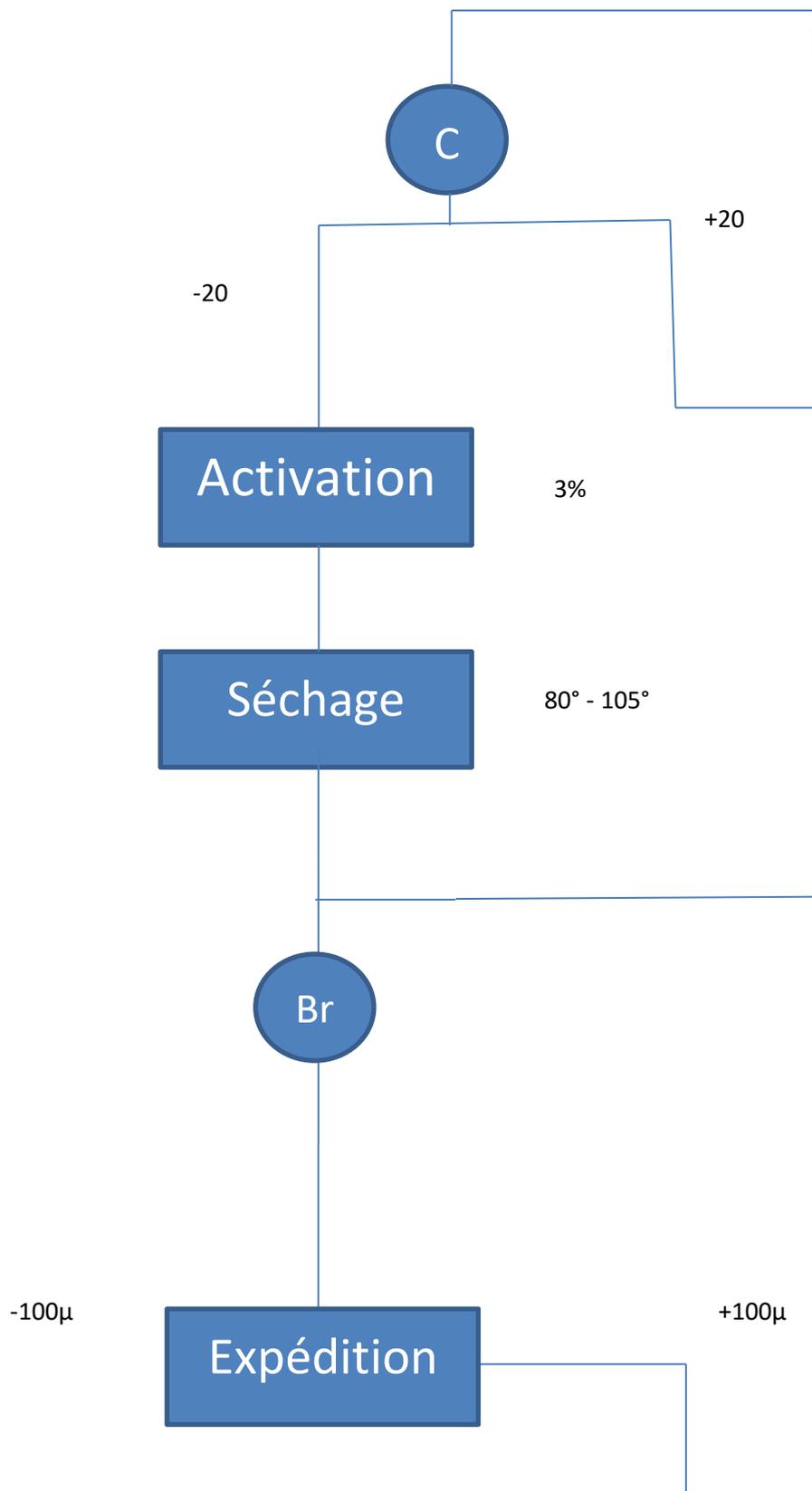


Figure 31 : Schéma de traitement proposé

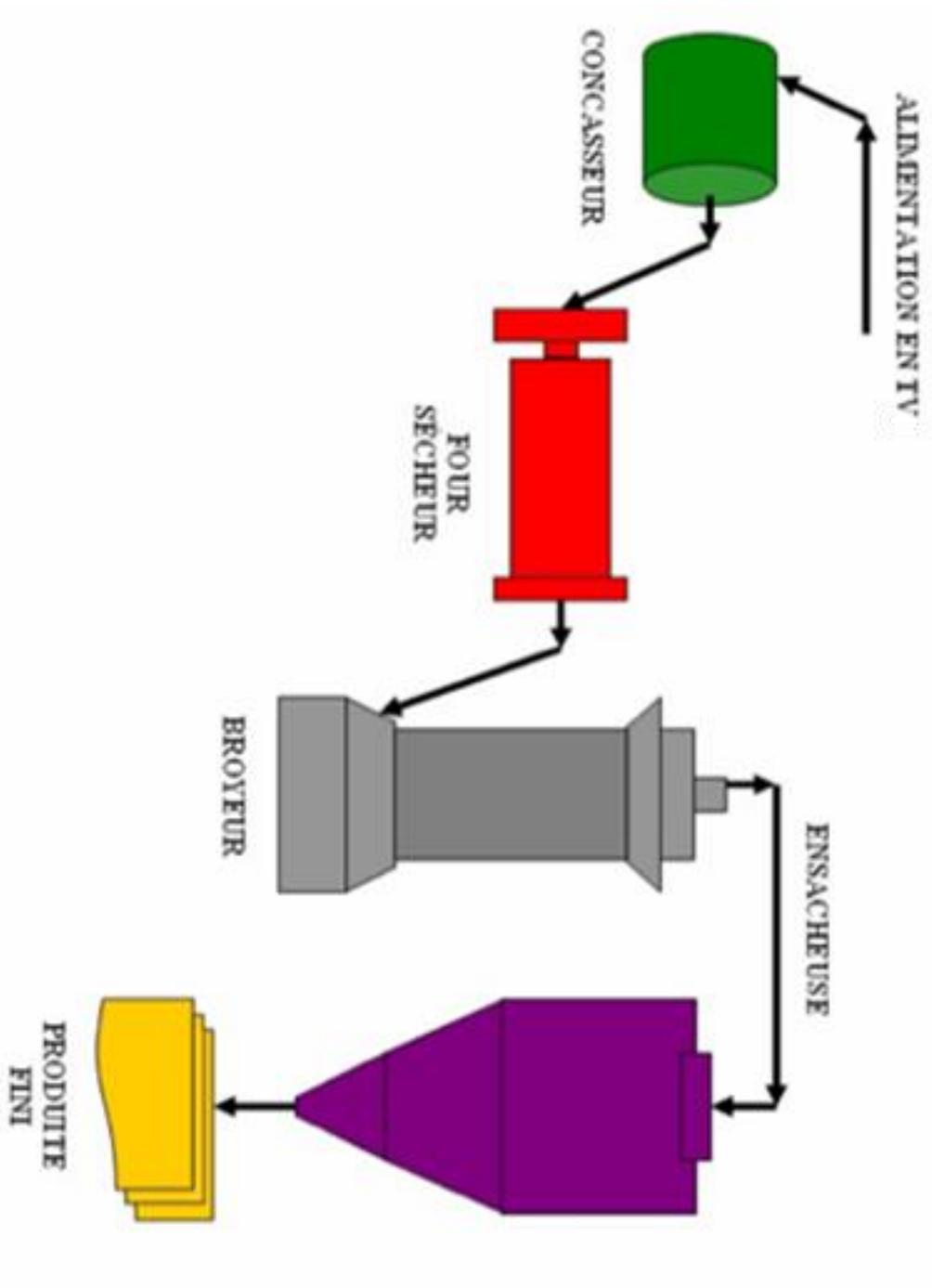


Figure 32 : Schéma de fabrication de bentonite

Chapitre III : Méthode de fabrication de la bentonite et schéma proposé

Appareils utilisés



Filtre presse



Melangeur



Viscosimètre référence API spécification 13 A

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion

L'objectif du présent travail était la préparation d'une bentonite de forage qui répond aux normes exigées par l'industrie.

Les résultats de la caractérisation physico-chimique effectuée sur la bentonite, nous permettent de conclure qu'il s'agit d'une bentonite aluminosilicate de granulométrie très fine qui présente une surface relativement faible.

D'autres techniques pourraient être envisagées tel que les changements de la température et de la teneur du carbonate de sodium pour l'activation de la bentonite, pour une éventuelle utilisation dans un autre domaine tel que le traitement des eaux et la construction civile.

L'ensemble des résultats obtenus à l'échelle industrielle, montre que l'étude de l'influence des conditions opératoires permet d'obtenir des résultats encourageants sur le comportement de la bentonite, En ce qui concerne la viscosité et le PH

/

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références

[1] Boukhedimi, M ,L., 2009. Origine du processus de bentonitisation des terrains volcanogenes rhyolitiques de Hammam Boughrara (Maghnia; Algerie nord occidentale). Thèse de doctorat université Tlemcen p. 24

[2] Kamila Baba Hamed. (2006). Hydrodynamique et modélisation d'une nappe alluviale, validation par l'approche géostatistique. Application a la nappe de la plaine de Maghnia (N-W Algérien), Thèse de doctorat université Tlemcen

[3] Kouloughli salim., (2007), Etude expérimentale des mélanges sable bentonite. Thèse Doctorat Université Constantine. page 72

[4] Sadran, G., Millot, G., Bonifas, M. ,1955. The origine of bentonite at Lalla Maghnia . Algeria Bull, pp. 213–234

[5] Cheblaoui Rachida., (2012)., Fixation du chrome sur une bentonite Algérienne.,Mémoire de magister de l'Ecole Nationale Polytechnique

[6] M. Benamar MAKHOUKHI , Thèse de Doctorat ; Modification de la bentonite par divers sels organiques – Applications à la décoloration des huiles et à l'adsorption des colorants textiles. 2008 ; UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID–TLEMCEN , page 219

[7] OUSLIMANI, N. (2012) Adsorption des colorants acides des effluents Manufacturiers par des montmorillonites. Thèse de doctorat. Université de Boumerdes.

[8] CHOUMANE, F. Elimination des métaux lourds et pesticides en solution aqueuse p par des matrices argileuses. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen

[9] BELARBI,A. (2012) Etude de L'activité catalytique de la sépiolite dans les réactions de polymérisation du styrène et du tétrahydrofurane . mémoire de Magistère. Université d'ORAN .page 03

[10] AZZPOUZ, F.Z. (2005). Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen. Mémoire de magistère. Université de Tlemcen

[11] BENTAHAR , Yassine . Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse . mémoire de doctorat. Université de Nice-Sophia Antipolis – ufr Sciences ; page : 32

Références bibliographiques

- [12] Le Pluart, L., « 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 (2002).
- [13] Jozja N. (2003), Etude de matériaux argileux Albanais : Caractérisation multi-Echelle d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de Plomb sur la perméabilité. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans.
- [14] Deng, Y. White, G.N. Dixon, J.B. « Effect of structural stress on the intercalation rate of kaolinite ». Journal of Colloid and Interface Science. 250 (2002) 379-393
- [15] Caillère, S., S. Hénin and M. Rautureau, « Minéralogie des argiles » Masson, Tomes 1 et 2, (1982) 184 et 189.
- [16] Koneshloo , Mohammad. Caractérisation, estimation et valorisation de gisements d'argiles kaoliniques du bassin des Charentes . page : 18
- [17] Ruellan, A., Deletang, J. (1997) Les phénomènes d'échange de cations et d'anions dans les sols, Orstorm, Paris
- [18] Meriam El Ouahabi, Valorisation industrielle et artisanale des argiles du maroc ;Thèse présentée à l'Université de Liège ; page 15
- [19] R.K Gupta and S.N. Bhattacharya, « Polymer-clay Nanocomposites : Current status and Challenges ».Indian chemical engineer copyright .Vol.50,N°.3,2008,P.242-267
- [20] Jad Wakim, (2005) Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses. Thèse de doctorat de l'Université de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
- [21] R. D Holtz et W. D. Kovacs, (1991) Introduction à la géotechnique. Edition de l'école polytechnique de Montréal.
- [22] B. Frédéric, Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et chaussées, Paris (2001)
- [23] BLIEFERT. C, PERRAUD.R, « Chimie de l'environnement », (traduit de l'allemand), De Boeck, Paris, 2001.

Références bibliographiques

[24] Chérifa Hakima MEMOU ; Thèse de doctorat ,université Abou-Bakr Belkaid-Tlemcen ; Préparation et Caractérisation de Nouveaux Matériaux Composites B-CD-P4VP-Bentonite.Application à la Rétention des Polluants Organiques. Page : 56

[25] Fatima Zohra CHOUMANE ; Elimination des métaux lourds et pesticides en solution aqueuse par des matrices argileuses ; UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID –TLEMCEM ; THESE DE DOCTORAT ; page 07

[26] CHEBLAOUI Rachida ; Mémoire de Magister ; Fixation du chrome sur une bentonite Algérienne ; Ecole Nationale Polytechnique ; page : 25

[27] Christidis, G., Huff, D.H., 2009. Geologic aspects and genesis of bentonites. Elements 5 (2), 93–98

[28] Laribi S, Fleureau J-M, Grossiord J-L, Kbir-Ariguib N. Comparative yield stress determination for pure and interstratified smectite clays. RheolActa 2005, (44) :P : 262–269

[29] Karakaya, M.Ç., Karakaya, N., Bakır, S., 2011. Some properties and potential applications of the Na- and Ca-bentonites of ordu (N.E. Turkey). Appl. Clay Sci. 54

[30] Modabberi, S., Namayandeh, A., López-Galindo, A., Viseras, C., Setti, M.,Ranjbaran, M., 2015. Characterization of Iranian bentonites to be used as pharmaceutical Materials . Appl. Clay Sci. 116–117, 193–201

[31] Mohamed TOBBAL SEGHIR ; Utilisation d'un SIG pour la prospection et la hiérarchisation de de la Bentonite dans le Bas-Chélif ; diplôme de MAGISTER ; Université des sciences et de la technologie « houari boumediene » page :12

[32] Le Pluart L., Nanocomposites Epoxy de / 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 (2002).

[33] Durán J.D.G., Ramos–Tejada M.M., Arroyo F.J., Gonzalez-Caballero F., Rheological and electrokinetic properties of sodium montmorillonite suspensions. J. Colloid interface Sci. 229, 107–117 (2000).

[34] Tombácz E., Szekeres M., Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions : The specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes. Appl. Clay Sci. 27, 75–94 (2004).

Références bibliographiques

[35] Pons C.H., Mise en évidence des relations entre la texture et la structure dans les systèmes eau-smectites par diffusion aux petits angles du rayonnement synchrotron. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans (1980).

[36] Le Pluart L., Duchet J., Sautereau H., Halley P., Gerard J.F., Rheological properties of organoclay suspensions in epoxy network precursors. *Appl. Clay Sci.* 25, 207–219 (2004).

[37] Pons C.H., Mise en évidence des relations entre la texture et la structure dans les systèmes eau-smectites par diffusion aux petits angles du rayonnement synchrotron. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans (1980).

[38] Mering J., Oberlin A., The smectites in *The Electron-Optical Investigation of Clays*. J. A. Gard Eds., Mineralogical Society, London p.195 (1971).

[39] Pons, C. H., F. Rousseaux and D. Tchoubar, « Utilisation du rayonnement Synchrotron en diffusion aux petits angles pour l'étude du gonflement des smectites ; II, Etude de différents systèmes eau-smectites en fonction de la température » *Clay Minerals* 17, 327-338 (1982).

[40] Ben Rhaïem, H., D. Tessier and C. H. Pons, « Comportement hydrique et évolution structurale et texturale des montmorillonites au cours d'un cycle de dessiccation-humectation ; I, Cas des montmorillonites calciques » *Clay Minerals* 21, 9-29 (1986)

[41] Tessier, D., « Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structure au cours de la dessiccation et de la réhumectation, » Thèse de doctorat de l'Université de Paris VII (1984)

[42] Mathieu-Sicaud, A. and J. Mering, « Etude au microscope de la montmorillonite et de l'hectorite saturées par différents cations » *Bull. Soc. Franc. Miner. Crist.* 74, 439-455 (1951)

[43] Luckham, P. F. and S. Rossi, « Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions » *Adv. Colloid Interface Sci.* 82, 43-92 (1999)

[44] Didier, G., « Gonflement cristallin des montmorillonites. Sa prévision, » Thèse de l'Université Claude Bernard, Lyon (1972)

[45] Pons, C. H., H. Ben Rhaïem, D. Tessier and C. Clinard, « Apport de la diffusion aux petits angles de rayons X à l'étude de la microstructure des matériaux argileux » dans « Micromorphologie des sols, Proc. VII Int. Meet. Micromorphology », 37-42 (1987).

Références bibliographiques

[46] Caillère, S., S. Hénin and M. Rautureau, « Minéralogie des argiles » Masson, Tomes 1 et 2, 184p et 189p (1982)

[47] Ben Rhaiem, H., D. Tessier and C. H. Pons, « Comportement hydrique et evolution structurale et texturale des montmorillonites au cours d'un cycle de dessiccation-humectation ; I, Cas des montmorillonites calciques » Clay Minerals 21, 9-29 (1986)

[48] Ben Rhaiem, H., D. Tessier and C. H. Pons, « Comportement hydrique et evolution structurale et texturale des montmorillonites au cours d'un cycle de

dessiccation-humectation ; I, Cas des montmorillonites calciques » Clay Minerals 21, 9-29 (1986).

[49] M'bodj, O., N. K. Ariguib, M. T. Ayadi and A. Magnin, « Plastic and elastic properties of the systems interstratified clay-water-electrolyte-xanthan » J. Colloid interface Sci. 273, 675-684 (2004)

[50] Touret O., Pons C.H., Tessier D., Tardy Y., Etude de la répartition de l'eau dans des argiles saturées Mg²⁺ aux fortes teneurs en eau. Clay Minerals 25, 217-233 (1990)

[51] Pusch, R., « Mineral-water interactions and their influence on the physical behaviour of highly compacted Na bentonite » Can. Geotech. J. 19, 381-387 (1982)

[52] Touret, O., C. H. Pons, D. Tessier and Y. Tardy, « Etude de la repartition de l'eau dans des argiles saturées Mg²⁺ aux fortes teneurs en eau » Clay Minerals 25, 217-233 (1990)

[53] Norrish, K., « The swelling of montmorillonite » Disc. Faraday Soc. 18, 120-134 (1954).

[54] Swartzen-Allen, S. L. and E. Matijevic, « Surface and colloid chemistry of clays » Chem. Rev. 74, 385- 400 (1974)

[55] Van Olphen, H., « An Introduction to Clay Colloid Chemistry » Willey, New York (1977)

[56] Hendricks, S. B., R. A. Nelson and L. T. Alexander, « Hydration Mechanism of the Clay Mineral Montmorillonite Saturated with Various Cations » J. Am. Chem. Soc. 62, 1457-1464 (1940)

[57] Ben Brahim, J., « Contribution à l'étude des systèmes eau-argile par diffraction des Rayons X. Structure des couches insérées et mode d'empilement des feuilletés dans les hydrates homogènes à

Références bibliographiques

deux couches d'eau de la beidellite Na, » Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans (1985)

[58] Brindley, G. W., « Discussion and recommendations concerning the nomenclature of Clay minerals and related phyllosilicates. » *Clays and Clay Minerals* 14, 27-34. (1966)

[59] Mering, J., « L'interférence des rayons X dans les systèmes à interstratification Désordonnée. » *Acta Cryst.* 2, 371-377 (1949)

[60] Pons, C. H., F. Rousseaux and D. Tchoubar, « Utilisation du rayonnement synchrotron en diffusion aux petits angles pour l'étude du gonflement des Smectites ; I, Etude du système eau-montmorillonite-Na en fonction de la température » *Clay Minerals* 16, 23-42 (1981)

[61] Bérend, I., « Mécanismes d'hydratation des montmorillonites homoioniques pour des pressions relatives inférieures à 0.95, » Thèse d'Université (Institut National Polytechnique de Lorraine) (1991).

[62] Faisandier, K., « Analyse multiéchelle de dispersion de montmorillonites par diffusion des rayons X. Relations entre structure, texture et propriétés macroscopiques de gonflement, » Thèse de l'Université de d'Orléans (1997)

[63] Bonifas, J. L., « Contribution à l'étude de la viscosité de suspensions de bentonite, » Thèse de doctorat de l'ULP (1998)

[64] Besq, A., « Ecoulements laminaires de suspensions de bentonite industrielles. Caractérisation rhéométrique – Ecoulements en conduites axisymétriques. Applications aux activités du Génie Civil, » Thèse de doctorat de L'Université de Poitiers (2000)

[65] Corvisier, P., « Ecoulement de fluides thixotropes dans des conduites droites ou présentant des singularités, » Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré (2001)

[66] Caillère, S., S. Hénin and M. Rautureau, « Minéralogie des argiles » Masson, Tomes 1 et 2, 184p et 189p (1982)

[67] Stern, O., « Zur theorie der elektrolytischen doppelschicht » *Zeit. Elektrochem.* 30, 508-16 (1924)

[68] Grahame, D. C., « The electrical double layer and the theory of electrocapillarity » *Chem. Rev.* 41, 441- 501 (1947)

Références bibliographiques

[69] Li, H., S. Wei, C. Qing and J. Yang, « Discussion on the position of the shear Plane » J. Colloid and Interface Science 258, 40-44 (2003)

[70] Güven, N. and R. M. Pollastro. Clay-water interface and its rheological Implications, vol. 4. CMS Workshop Lectures. The Clay Minerals Society. Boulder, Colorado, USA 1992

[71] Besq, A., « Ecoulements laminaires de suspensions de bentonite industrielles. Caractérisation rhéométrique – Ecoulements en conduites axisymétriques. Applications aux activités du Génie Civil, » Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers (2000).

[72] Grahame, D. C., « The electrical double layer and the theory of electrocapillarity » Chem. Rev. 41, 441- 501 (1947).

[73] Gouy, M. G., « Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte » J. Phys. Radium (Paris) 9, 457-468 (1910).

[74] Chapman, D. L., « A contribution to the theory of electrocapillarity » Philos. Mag. 6, 475-481 (1913)

[75] Leyama, M., « Etude de l'écoulement des suspensions de bentonite, » Thèse de Doctorat de l'ULP (2001)

[76] Callaghan, I. C. and R. H. Ottewill, « Interparticle forces in montmorillonite gels » Faraday Discussions of the Chemical Society 57, 110 -118 (1974)

[77] Van Olphen, H., « Internal mutual flocculation in clay suspension » J. Colloid Interf. Sci. 19, 313-322 (1964)

[78] Darley, H. C. H. and G. R. Gray, « Composition and Properties of Drilling and completion Fluids » 5th edn., Gulf Publ. Co., TX, USA, 643pp (1988).

[79] Mering, J., « On the hydration of montmorillonite » Trans. Faraday Soc. 42B, 205-219 (1946)

[80] Callaghan, I. C. and R. H. Ottewill, « Interparticle forces in montmorillonite gels » Faraday Discussions of the Chemical Society 57, 110 -118 (1974)

[81] Rand, B., E. Pekenc, J. W. Goodwin and R. Smith, « Investigation into the Existence of edge-face coagulated structures in Na-montmorillonite suspensions » J. Chem. Soc. Faraday Trans. 76,

Références bibliographiques

225-235 (1980)

[82] M'Ewen, M. B. and M. I. Pratt, « The gelation of montmorillonite » *Trans. Faraday Soc.* 53, 535-547 (1957)

[83] Vali, H. and L. Bachmann, « Ultrastructure and flow behavior of colloidal Smectite dispersions » *J. Colloid Interf. Sci.* 126, 278-291 (1988)

[84] Weiss, A. and R. Frank, « Über den Bau der Gerüste in thixotropen Gelen » *Z. Naturforsch* 16b, 141- 142 (1961)

[85] Brandenburg, U. and G. Lagaly, « Rheological properties of sodium montmorillonite Dispersions » *Appl. Clay Sci.* 3, 263-279 (1988)

[86] Keren, R., I. Shainberg and E. Klein, « Settling and flocculation value of Na-Montmorillonite particles in aqueous media » *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 76-80 (1988)

[87] De Kretser, R. G., P. J. Scales and D. V. Boger, « Surface chemistry-rheology inter-Relationships in clay suspensions » *Colloids Surf. A* 137, 307-318 (1998)

[88] Pignon, F., A. Magnin and J.-M. Piau, « Thixotropic behavior of clay Dispersions : Combinations of scattering and rheometric techniques » *J. Rheol.* 42, 1349-1373 (1998)

[89] Brandenburg, U. and G. Lagaly, « Rheological properties of sodium montmorillonite Dispersions » *Appl. Clay Sci.* 3, 263-279 (1988)

[90] Khandal, R. K. and T. F. Tadros, « Application of viscoelastic measurements to the Investigation of the swelling of sodium montmorillonite suspensions » *J. Colloid Interf. Sci.* 125, 122-128 (1988)

[91] Durán, J. D. G., M. M. Ramos-Tejada, F. J. Arroyo and F. Gonzalez-Caballero, « Rheological and electrokinetic properties of sodium montmorillonite Suspensions » *J. Colloid Interface Sci.* 229, 107-117 (2000)

[92] Durán, J. D. G., M. M. Ramos-Tejada, F. J. Arroyo and F. Gonzalez-Caballero, « Rheological and electrokinetic properties of sodium montmorillonite Suspensions » *J. Colloid Interface Sci.* 229, 107-117 (2000)

[93] Ramos-Tejada, M. M., F. J. Arroyo, R. Perea and J. D. G. Durán, « Scaling behavior of the rheological properties of montmorillonite suspensions : Correlation between interparticle interaction and degree of flocculation » *J. Colloid Interface Sci.* 235, 251-259 (2001).

[94] Tombácz, E. and M. Szekeres, « Colloidal behavior of aqueous montmorillonite Suspensions : The specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes » *Appl. Clay Sci.* 27, 75-94 (2004)

[95] Bekkour, K., M. Leyama, A. Benchabane and O. Scrivener, « Time-dependent rheological behavior of bentonite suspensions : An experimental study » *J. Rheol.* 49, 1329-1345 (2005).

Références bibliographiques

- [96] Benchabane, A. and K. Bekkour, « Effects of anionic additives on the rheological behavior of aqueous calcium montmorillonite suspensions » *Rheol. Acta* 45, 425-434 (2006).
- [97] J. Nones, H.G. Riella, A.G. Trentin, J. Nones, Effects of bentonite on different cell types : a brief review, *Appl. Clay Sci.* 105–106 (2015) 225–230
- [98] Brown, T.J., Idoine, N.E., Raycraft, E.R., Hobbs, S.F., Shaw, R.A., Everett, P., Kresse, C., Deady, E.A., Bide, T. *World Mineral Production 2013–17*. British Geological Survey, pp. 8
- [99] Harvey, C.C., Lagaly, G., 2013. Industrial applications. In : Bergaya, F., Lagaly, G. (Eds.), *Developments in Clay Science Techniques and Applications 5B*. Handbook of Clay Science. Elsevier, Amsterdam, pp. 458
- [100] Murray, H.H., 2000. Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite : a general overview. *Appl. Clay Sci.* 17, 207–221
- [101] Carretero, M.I., Gomes, F., Tateo, F., 2013. Clays, drugs, and human health. In : Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, L. (Eds.), *Developments in Clay Science*, vol. 5. Elsevier, The Netherlands, pp. 711–764 (Chapter 5.5).
- [102] Galan, E., Liso, M.J., Forteza, M., 1985. Minerales utilizados en la industria Farmacéutica. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía* 8, 369–378
- [103] Veniale, F., 1992. Clay science : facts and perspectives. In : *Proceedings of the Mediterranean Clay Meeting, Lipari 27–30 September 1992* *Mineralogica et Petrographica Acta*, vol. XXXV-A, pp. 13–44.
- [104] Veniale, F., 1997. Applicazioni e utilizzazioni medico-sanitarie di materiali argillosi (naturalie modificati). In : Morandi, N., Dondi, M. (Eds.), *Argille e Minerali delle Argille. Guida alla Definizione di Caratteristiche e Proprietà per gli Usi Industriali*. Corso di Formazione, Gruppo Italiano AIPEA, Rimini, Italy, pp. 205–239
- [105] Bolger, R., 1995. Industrial minerals in pharmaceuticals. *Ind. Miner.* 335, August, 52–63.
- [106] Carretero, M.I., 2002. Clay minerals and their beneficial effects upon human health : a review. *Appl. Clay Sci.* 21, 155–163
- [107] Cerri, G., de Gennaro, M., Bonferoni, M.C., Caramella, C., 2004. Zeolites in biomedical Application : Zn-exchanged clinoptilolite-rich rock as active carrier for antibiotics in anti-acne topical therapy. *Appl. Clay Sci.* 27, 141–150
- [108] Lopez Galindo, A., Viseras, C., 2004. Pharmaceutical and cosmetic applications of Clays. In : Wypych, F., Satyanarayana, K.G. (Eds.), *Clay Surfaces. Fundamentals and applications*. Elsevier, Amsterdam, pp. 267–289
- [109] Love, P., 2004. Mineral makeover. *Ind. Miner.* 9, 56–57

Références bibliographiques

- [110] Carretero, M.I., Gomes, C., Tateo, F., 2006. Clays and human health. In : Bergaya, F.,Theng, B.K.G., Lagaly, G. (Eds.), Handbook Of Clay Science. Elsevier, Amsterdam,pp. 717–741
- [111] Droy-Lefaix, M.T., Tateo, F., 2006. Clays and clay minerals as drugs. In : Bergaya, F., Theng, B.K.G.,Lagaly, G. (Eds.), Handbook of Clay Science. Elsevier, Amsterdam, pp. 743–752
- [112] Carretero, M.I., Pozo, M., 2007. Mineralogía Aplicada : Salud y Medio Ambiente. Thompson, Madrid, 406 pp
- [113] Carretero, M.I., Pozo, M., 2009. Clay and non-clay minerals in the pharmaceutical Industry. Part I.Excipients and medical applications. Appl. Clay Sci. 46, 73–80
- [114] Carretero, M.I., Pozo, M., 2010. Clay and non-clay minerals in the pharmaceutical and Cosmetic industries Part II. Active ingredients. Appl. Clay Sci. 47, 171–181.
- [115] Viseras, C., Cultrone, G., Cerezo, P., Aguzzi, P., Baschini, M.T., Valles, J., López-Galindo, A., 2006. Characterisation of northern Patagonian bentonite for pharmaceutical Uses. Appl. Clay Sci. 31, 272–281.
- [116] Shah, L.A., Valenzuela, M.D.G.d.S., Ehsan, A.M., Valenzuela-Díaz, F.R., Khattak, N.S., 2013. Characterization of Pakistani purified bentonite suitable for possible Pharmaceutical application. Appl. Clay Sci. 83-84, 50–55
- [117] Valenzuela, M., Peralta, M., Sayeg, I., Machado de Souza Carvalho, F., Wang, H., Díaz, F (2018) Enrichment of clay from Vitoria da Conquista (Brazil) for applications in Cosmetics. Applied Clay Science 155 : 111–119
- [118] Belghoul Mohamed Amine,.(2015)., Etude du vieillissement de la bentonite de Meghnia, Tlemcen. ENP. Page 110

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) جوزيان إينايس.....الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب.....

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 119990367507220000 و الصادرة بتاريخ 01/01/2022.....

المسجل بمعهد الكناجم تبسة..... قسم الهندسة المنصبة.....

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Elaboration d'un schéma de traitement du minerai
de bentonite de Tlemcen.

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه

التاريخ: 23/06/2024

إمضاء المعني (ة)

Baw

المصادقة على صحة التوقيع
السيد (ة) إونايس جوزيان
الونسرة في 23/06/2024

عن رئيسة المجلس العلمي
إمضاء بوعبد
البحري

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) رجيم جيه الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 1.000003.64043.150000 و الصادرة بتاريخ 10.10.2018

المسجل بمعهد المناجم قسم الهندسة المنجمية

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

Elaboration d'un schéma de traitement du minerai
de bentonite de Tlemcen.

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية

المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 24/06/2024

24 JUN 2024

امضاء المعني (ة)
الضمانة
السيد



من رئيس المجلس الشعبي البلدي
ويتفويض منه
امضاء: سماتي لكحل
عون



Année universitaire : 2023/2024

Tébessa le : 23/06/2024

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1. Bouziane Inas
2. Rahim Taha
- 3.

Niveau : 2^{ème} année Master Option : Valorisation des ressources minérales

Thème : Elaboration d'un schéma traitement du
minerai de bentonite de Tlemcen

Nom et prénom de l'encadreur : Mansour Krim.

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Tous les chapitres	

