

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE M'HAMED  
BOUGARA  
BOUMERDES**



**FACULTE  
DES SCIENCES  
DE L'INGENIEUR**

**DEPARTEMENT GENIE DES PROCEDES INDUSTRIELS**

## **Mémoire de Magister**

**Spécialité : Génie Industriel  
Option : Technologie Textile**

Présenté par :

**M<sup>me</sup> : DERROUECHE Née TOULEB Farida**

**Thème : Décoloration par adsorption des eaux résiduaires textiles chargées  
en colorants acides par les bentonites locales**

Soutenu devant le jury composé de :

M <sup>r</sup> ALIOUCHE D.	Prof	UMBB	Président
M <sup>r</sup> MAALLEM M.	M.C.	UMBB	Rapporteur
M <sup>r</sup> BENRACHDI K	M.C	UMBB	Examineur
M <sup>r</sup> LAMOURI S	M.C	EMP (Bordj- Elbahri)	Examineur

**Année universitaire 2006 - 2007**

# DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma mère qui m'a beaucoup soutenu le long de mes études;*

*A toute ma grande famille ;*

*A mon cher époux pour m'avoir témoigné une grande patience et apporté encouragements et soutien morale ;*

*A ma très chère fille SAMIA IKRAM et surtout toi mon bébé adoré ABDELMOUMEN veuillez trouver dans ce manuscrit toutes mes excuses, ma profonde gratitude et mes remerciements les plus vifs.*

*F.DERROUECHE*

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je voudrais exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui sous une forme ou une autre, ont contribué à sa réalisation, ainsi qu'à ceux ayant accepté de le juger.

Monsieur ALIOUCHE.D pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire.

Je remercie infiniment Monsieur LAMOURI.S et Monsieur BENRACHDI.K d'avoir accepté de faire partie du jury tant qu'examinateurs.

Mes vifs remerciements vont à mon promoteur Monsieur MAALLEM.M d'avoir accepté de diriger ce travail.

Je tiens à remercier M<sup>me</sup> OUSLIMANI. N qui m'a transmis une partie de son savoir Pour mener à bien ce mémoire.

Je n'oublie pas dans mes remerciements tout le personnel du Laboratoire du CRD de Sonatrach pour leur aide précieuse.

---

## ملخص

ان تلوث المياه ببعض المواد الكيميائية الصناعية تمثل منبع لتلوث المحيط و بلاخص المياه الناتجة عن الصناعة النسيجية فهي تتسبب فى افراز مواد عضوية ملوثة خاصة منها الملونات النسيجية، هذه الاخيرة تستعمل بكمية كبيرة فى تلوين النسيج، الامر الذى يجعل من الصعب معالجة هذه المياه بالوسائل المعتادة وذلك نظرا لوجود مركبات كيميائية سامة فى جزيئاتها والتي تعتبر فى وقتنا الحاضر من الملوثات البيئية الخطيرة رغم تواجدها بكمية قليلة.

من خلال هذه الاطروحة حاولنا اعادة الاعتبار للبتونيت المتواجد بكمية كبيرة فى الجزائر (مغنية) وذلك بزيادة قدرتها على امتصاص ملونات النسيج بتغيير خصائصها و جعلها بنتونيت صوديوم.

الى جانب ذلك درسنا تأثير عدة عوامل من بينها ( مدة التأثير، الحموضة، و درجة الحرارة) على خصائص الامتصاص لدى البنتونيت.

وفى الاخير تطرقنا الى تعيين منحنى ايزوترم الامتصاص للملونين الحامضين "ملون احمر حمضي" و "ملون اصفر حمضي" لدى البنتونيت.

---

---

## RESUME

La pollution des eaux par certains produits chimiques d'origine industrielle constitue une source de dégradation de l'environnement. Les eaux des l'industries textiles sont, elles aussi, chargées de nombreux micropolluants organiques, notamment certains colorants. Ces derniers sont souvent utilisés en teinture avec une grande quantité, dont la faible biodégradabilité rend leurs traitements biologiques difficilement applicables à cause de la présence dans leurs molécules des composés aromatiques qui ont une toxicité certaine et qui sont considérés aujourd'hui comme des polluants cancérigènes et dangereux même lorsqu'ils existent sous forme de traces.

Le présent travail à pour but la valorisation de bentonite algérienne en vue d'augmenter ses capacités de rétention des colorants et ce, par la modification du caractère (sodique) de la bentonite.

Outre cela, nous avons étudié l'influence de différents paramètres en particulier, le temps de contact, le pH, la température sur les capacités sorptionnelles de la bentonite.

En fin, nous avons déterminé l'allure des isothermes d'adsorption des colorants acides « le colorant rouge Bemacid CL-BN200 » et « le colorant jaune Bemacid CM-3R » par la bentonite.

---

## SUMMARY

The water pollution by certain chemicals of industrial origin constitutes a source of environmental pollution. Water of textile industries is charged with many micropolluants organics, in particular some dyes. These latter are often used in dyeing with a great quantity, of which the low biodegradation makes their treatments biological not easily applicable because of the presence in their molecules of the aromatic compounds which have an high toxicity and which are regarded today as carcinogenic and dangerous pollutants even when they exist in the form of traces.

The purpose of this work is to valorize the Algerian bentonite in order to increase their holding capacities of the dyes and this, by the modification of the bentonite character (sodic).

At the end, we have determined the pace of the isotherms of adsorption of the acid dyes, "the red dye Bemacid CL-BN200" and the "the yellow dye Bemacid CM-3R", by bentonite.

# SOMMAIRE

Liste des figures.....	04
Liste des tableaux.....	06
INTRODUCTION.....	08
I. 1. L'absorption .....	11
I .1.1. Types d'adsorption.....	11
I .1.1.1. L'absorption physique ou physisorption.....	11
I .1.1.2. L'adsorption chimique.....	11
I .1. 2. Forces d'adsorption.....	12
I .1. 3. Cinétiques d'adsorption.....	12
I .1. 3.1. Transfert de matière.....	12
I .1.4. Facteurs influençant l'adsorption.....	13
I .1. 4.1. Surface spécifique.....	13
I .1.4.2. Nature de l'adsorbant.....	13
I .1.4.3. pH.....	13
I .1.4.4. Polarité.....	13
I .1.4.5. Température.....	13
I .1.4.6. Nature de l'adsorbat.....	14
I .1.5. Les modèles d'adsorption.....	14
I .1.5.1. Isotherme de l'adsorption de Langmuir.....	14
I .1.5.2. Isotherme de l'adsorption de Freundlich.....	15
I .1.5.3. Isotherme de l'adsorption de BET.....	16
I.2. Les adsorbants.....	17
I.2.1. L'argile.....	18
I.2.2. Présentation de la bentonite.....	19
I.2.2.1. Origine et historique de la bentonite.....	19
I.2.2.2. La structure de la bentonite.....	19
I.2.2.2.1. Composition des feuillets.....	19
I.2.2.2.2. Existence d'une charge de surface.....	22
I.2.2.3. Classification des minéraux argileux.....	22
I.2.2.4. Adsorption de l'eau par la montmorillonite.....	23
I.2.2.5. Mécanisme de gonflement.....	24
I.2.2.5.1. Gonflement interfoliaire.....	25
I.2.2.5.2. Gonflement interparticulaire.....	25
I.2.2.6. Principale caractéristique de la bentonite.....	25
I.2.2.6.1. La densité de charge spécifique.....	25
I.2.2.6.2. La capacité d'échange cationique.....	26
I.2.2.6.3. La surface spécifique.....	26
I.2.2.7. Activation de la bentonite.....	26
I.2.2.7.1. Activation thermique.....	26
I.2.2.7.2. Activation chimique.....	27
I.2.2.8. Utilisation de la bentonite.....	27

I.3. Les effluents de l'industrie textile.....	28
I.3.1. Les différents types de polluants des effluents de l'industrie textile.....	28
I.3.1.1. Matières décantables.....	28
I.3.1.2. Métaux lourds.....	29
I.3.1.3. Hydrocarbures.....	29
I.3.1.4. Composés organo- halogénés.....	29
I.3.1.5. Agent de surface/détergent.....	29
I.3.1.6. Coloration.....	29
I.3.2. Méthodes utilisées pour la décoloration des eaux de rejets textiles.....	30
I.3.2.1. La coagulation - floculation.....	30
I.3.2.2. Le traitement biologique.....	31
I.3.2.3. Les résines échangeuses d'ions .....	31
I.3.2.4. Procédés membranaires.....	31
I.3.2.5. L'oxydation.....	32
I.3.2.6. La chloration.....	32
I.3.2.7. L'ozonation.....	32
I.3.2.8. Traitement physico-chimique : l'adsorption.....	32
I.4. Application des colorants.....	33
I.4.1. définition.....	33
I.4.2. Caractérisation des colorants acides.....	34
I.4.3. Cinétique de la teinture.....	34

## METHODE DES MOYENS D'ANALYSE

II.1. Matières utilisées.....	38
II.1.1. Bentonite.....	38
II.1.2. Colorant.....	38
II.2. Produit chimique.....	38
II.3. Méthodes.....	40
II.3.1. Préparation de l'adsorbant.....	40
II.3.2. Préparation des effluents de teinture.....	42
II.3.2.1. Détermination de la classe des colorants.....	42
II.3.2.2. Teinture des fibres de laine.....	42
II.3.2.3. Détermination de la concentration des effluents de teinture.....	42
II.3.3. Caractérisation physico-chimique de la bentonite.....	42
II.3.3.1. Détermination de la granulométrie.....	43
II.3.3.2. Détermination de la composition chimique .....	44
II.3.3.2.1. Détermination de la composition chimique par la fluorescence X.....	44
II.3.3.2.2. Détermination de la composition chimique par spectrophotométrie infrarouge.....	44
II.3.3.3. Analyse minéralogique.....	45
II.3.4. Adsorption des colorants acides par la bentonite.....	46
II.3.5. Détermination de la DBO <sub>5</sub> .....	47

## PARTIE EXPERIMENTALE

III.1. Préparation des effluents de teinture.....	49
III.1.1. Détermination de la classe des colorants.....	49
III.1.2. Détermination de la concentration des effluents de teinture.....	49
III.2. Préparation de l'adsorbant.....	49
III.3. Caractérisation physico-chimique de la bentonite.....	49
III.3.1. Détermination de la granulométrie.....	49
III.3.2. Détermination de la composition chimique.....	53
III.3.2.1. Détermination de la composition chimique par la fluorescence X.....	53
III.3.2.2. Détermination de la composition chimique par spectrophotométrie infrarouge.....	53
III.3.3. Analyse minéralogique.....	55
III.4. Adsorption des colorants acides par les bentonites.....	58
III.4.1. Influence du temps de contact.....	58
III.4.2. Influence du pH.....	60
III.4.3. Influence de la température.....	62
III.4.4. Analyse de l'adsorption par rayon X.....	63
III.5. Etablissement des isothermes d'adsorption.....	64
III.5.1. Forme linéaire des isothermes d'équilibre.....	66
III.6. Détermination de la DBO <sub>5</sub> .....	69
Conclusion.....	72
Références bibliographiques.....	74
Annexes.....	80

## LISTE DES FIGURES

<i>Fig.I.1 : Etape de transfert d'un soluté lors de son adsorption.....</i>	<i>12</i>
<i>Fig.I.2 : Evaluation graphique des constantes d'adsorption de modèle de Langmuir.....</i>	<i>15</i>
<i>Fig.I.3 : Allure de la courbe de l'isotherme de Langmuir .....</i>	<i>15</i>
<i>Fig.I.4 : Evaluation graphique des constantes d'adsorption de modèle de Freundlich.....</i>	<i>16</i>
<i>Fig.I.5 : Allure de la courbe de l'isotherme de Freundlich.....</i>	<i>16</i>
<i>Fig.I.6 : Evaluation graphique des constantes d'adsorption de modèle de B.E.T .....</i>	<i>16</i>
<i>Fig.I.7 : Allure de la courbe de l'isotherme de B.E.T.....</i>	<i>17</i>
<i>Fig.I.8 : Allure de la courbe de l'isotherme de B.E.T.....</i>	<i>17</i>
<i>Fig.I.9 : Illustration de l'empilement des feuillets de bentonite montrant la surface basale, les bordures ainsi que l'espace interfeuillets....</i>	<i>20</i>
<i>Fig.I.10 : Représentation des tétraèdres de silicium et des octaèdres d'aluminium ou de magnésium, ainsi que de leur agencement en couches.....</i>	<i>21</i>
<i>Fig.I.11 : Représentation schématique de l'empilement des feuillets unitaires dans une smectite.....</i>	<i>21</i>
<i>Fig. I.12 : Groupes structuraux des principaux minéraux des argiles selon Brindley.....</i>	<i>23</i>
<i>Fig.I.13 : Représentation schématique de l'adsorption d'eau par les smectites.....</i>	<i>24</i>
<i>Fig. I.14 : Schéma du changement de la charge des fibres protéiniques et du polyamides en fonction du pH .....</i>	<i>35</i>
<i>Fig. I.15 : Influence du temps sur les concentrations des ions de chlore, hydrogène et anion de colorant dans le bain de teinture de la laine avec les colorants acides.....</i>	<i>35</i>
<i>Fig. II.1 : Préparation de la bentonite sodique.....</i>	<i>41</i>
<i>Fig.II.2 :Schéma simplifié de granulomètre laser.....</i>	<i>43</i>
<i>Fig.II.3: Spectrophotomètre infrarouge.....</i>	<i>45</i>
<i>Fig.II.4 : Illustration de la Loi de Bragg .....</i>	<i>45</i>
<i>Fig.II.5 : Le diffractomètre de rayon X.....</i>	<i>46</i>

<i>Fig.II.1 : Courbe de distribution granulométrique de la bentonite brute.....</i>	<i>52</i>
<i>Fig.III. 2 : Courbe de distribution granulométrique de la bentonite sodique.....</i>	<i>52</i>
<i>Fig.III.3 : Spectre infrarouge de la bentonite brute et sodique.....</i>	<i>54</i>
<i>Fig.III.4 : Le diffractogramme de la bentonite brute.....</i>	<i>56</i>
<i>Fig.III.5 : Le diffractogramme de la bentonite sodique.....</i>	<i>57</i>
<i>Fig.III.6 : Influence du temps de contact sur l'adsorption du colorant rouge Bemacid CL-BN200 par les bentonites brute et sodique.....</i>	<i>59</i>
<i>Fig.III.7 : Influence du temps de contact sur l'adsorption du colorant jaune Bemacid CM-3R par les bentonites brute et sodique.....</i>	<i>59</i>
<i>Fig.III.8 : Influence du pH sur l'adsorption du colorant rouge Bemacid CL-BN200 par les bentonites brute et sodique.....</i>	<i>60</i>
<i>Fig.III.9 : Influence du pH sur l'adsorption du colorant jaune Bemacid CM-3R par les bentonites brute et sodique.....</i>	<i>61</i>
<i>Fig.III.10 : Représentation schématique du mécanisme d'adsorption de la bentonite sodique.....</i>	<i>61</i>
<i>Fig.III.11 : Influence de la température sur l'adsorption du colorant rouge Bemacid CL-BN200 par les bentonites brute et sodique.....</i>	<i>62</i>
<i>Fig.III.12 : Influence de la température sur l'adsorption du colorant jaune Bemacid CM-3R par les bentonites brute et sodique.....</i>	<i>62</i>
<i>Fig.III.13 : Raies <math>d_{(001)}</math> des diffractogrammes de bentonite brute avant adsorption (a) et après adsorption (b) du colorant jaune Bemacid.....</i>	<i>63</i>
<i>Fig.III.14 : Raies <math>d_{(001)}</math> des diffractogrammes de la bentonite sodique avant adsorption (c) et après adsorption (d) du colorant jaune Bemacid.....</i>	<i>64</i>
<i>Fig.III.15 : Isothermes d'adsorption du colorant rouge Bemacid (a) et du jaune Bemacid (b) par la bentonite brute.....</i>	<i>65</i>
<i>Fig.III.16 : Isothermes d'adsorption du colorant rouge Bemacid (c) et du jaune Bemacid (d) par la bentonite sodique.....</i>	<i>65</i>

## **LISTE DES TABLEAUX**

<i>Tableau N°I.1 : Schéma simplifié montrant la classification des principaux groupes de minéraux argileux et leurs espèces.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau N°I.2 : Les principales caractéristiques de trois types d'argile .....]</i>	<i>26</i>
<i>Tableau N°I. 3: Les principales utilisations de la bentonite.....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau N°I.4 : caractérisation des eaux résiduaires de teinture des fibres et file en laine, teinture et finissage des tissus en laine .....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau N°I. 5 : Caractéristiques des colorants acides .....</i>	<i>34</i>
<i>Tableau N°II.1 : Intervalle de mesure de la DBO<sub>5</sub> en fonction du volume d'échantillon.....</i>	<i>47</i>
<i>Tableau N°III.1 : Caractéristiques des colorants et leurs appartenances.....</i>	<i>49</i>
<i>Tableau N°III.2 : Granulométrie de la bentonite brute.....</i>	<i>50</i>
<i>Tableau N°III.3 : Granulométrie de la bentonite sodique.....</i>	<i>51</i>
<i>Le tableau N°III.4 : La Composition chimique de la bentonite.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau N°III.5 : Résultats de l'analyse minéralogique des bentonites.....</i>	<i>58</i>
<i>Tableau N°III.6 : Résultats de la linéarisation obtenus à l'aide de l'équation de Langmuir et de Freundlich pour la bentonite brute.....</i>	<i>67</i>
<i>Tableau N°III.7 : Résultats de la linéarisation obtenus à l'aide de l'équation de Langmuir et de Freundlich pour la bentonite sodique.....</i>	<i>68</i>
<i>Tableau N°III.8 : Résultats de la DBO<sub>5</sub> pour les deux bentonites.....</i>	<i>69</i>

# *INTRODUCTION*

## **INTRODUCTION**

La protection de l'environnement est devenue l'un des enjeux majeurs du développement économique. Au niveau national comme au niveau international les politiques économiques et environnementales l'une de l'autre, et l'environnement, devenu à la fois marché, facteur de croissance, de création d'emplois, et élément de concurrence fait désormais partie intégrante de toutes les stratégies industrielles.

La pollution des eaux continue de préoccuper les autorités et les populations, Les quelles par le monde, s'associent pour la combattre.

Comme l'Agence de Protection de l'Environnement ou certaines organisations non gouvernementales, sonnent l'alarme à l'occasion de chaque catastrophe et proposent des réglementations de plus en plus strictes.

L'Organisation Mondiale de la Santé et l'Union Européenne quand à elles ne fixent pas de lois mais donnent des orientations pour la fixation des concentrations maximales admissibles. Elles donnent des recommandations qui tiennent compte de risques et fixent alors un seuil de tolérance et une concentration maximale admissible.

De leur côté, les chercheurs scientifiques de différents horizons (chimie, géologie, agronomie, physiologie végétale, médecine,...) s'intéressent de plus en plus à l'identification et à l'élimination de pollutions impliquées directement dans l'apparition de déséquilibres au niveau des écosystèmes ou à l'origine de troubles graves pouvant conduire à la mort, aussi bien chez les animaux que chez l'homme.

Parmi les industries qui engendrent une pollution importante, l'industrie textile dont les rejets sont surtout caractérisés par leurs couleurs qui donnent une sensation d'une pollution assez grave.

Les colorants de synthèse, toxiques pour la plupart, sont largement utilisés dans l'industrie textile. D'un point de vue purement technologique, ces substances sont classées en deux grandes familles : les colorants solubles dans l'eau et les colorants insolubles dans l'eau. Les premiers sont responsables d'un problème délicat car les traitements classiques des eaux ayant servi dans les bains de teinture n'assurent pas une épuration satisfaisante [1].

Dans certains pays comme l'Algérie, dont les ressources hydriques sont relativement limitées, les eaux traitées sont souvent réutilisées en irrigation. Si le traitement n'est pas suffisamment efficace, les toxiques peuvent atteindre l'homme à travers la chaîne alimentaire; des essais pilotes effectués par une équipe de biologistes de l'université d'Oran [2] montre que les légumes irrigués par les eaux provenant de l'industrie textile sont contaminés. Or, la biodégradabilité des colorants textiles est très faible à cause de la présence dans leurs molécules de noyaux aromatiques.

Les procédés classiques de purification ont montré leurs limites, la coagulation-floculation-décantation ne permet pas un abattement suffisant de ces composés. Dans le cadre de l'ozonation, l'ozone réagit parfois avec le colorant pour donner des formes oxydées également colorées.

La réduction de cette micropollution organique par adsorption sur charbon actif est restée pendant longtemps et jusqu'à ce jour la méthode la plus utilisée et la plus efficace.

En effet, l'introduction discontinue de charbon actif en poudre en tête de la filière de traitement a été alors complétée par la mise en œuvre des procédés de traitement par adsorption sur lit de charbon actif en grains.

Bien que le charbon actif présente de nombreux avantages (fort pouvoir adsorbant dû essentiellement à sa grande surface spécifique), la remise en cause de la pré-oxydation chimique par le chlore ainsi que le coût engendré par la régénération périodique des matériaux ont conduit, depuis les années 1980, de nombreux laboratoires de différents horizons à s'intéresser à la recherche de nouveaux adsorbants à base de matériaux naturels.

C'est ainsi qu'ont été utilisés des matériaux comme les zéolithes naturelles ou synthétiques, les tuffs, les cendres volcaniques et surtout les argiles dans certains domaines comme la catalyse et le traitement des effluents.

De nos jours, une nouvelle famille de solides microporeux à porosité contrôlée semblable aux zéolites, appelés communément argiles activées est très largement étudiée par de nombreux chercheurs de différents horizons pour des applications variées dont notamment l'adsorption et la catalyse.

Ce travail a pour but essentiel la décoloration des bains résiduaux chargés en colorants acides par la bentonite brute et modifiée de Maghnia localement disponible.

Notre travail est partagé en quatre parties essentielles :

- Préparation et purification de la bentonite.
- Caractérisation de la bentonite brute et sodique par l'utilisation des différentes méthodes physico-chimiques : la diffraction des rayons X, granulométrie, fluorescence X et spectroscopie infrarouge.
- Etude de l'adsorption des colorants acides par les bentonites dans différentes conditions : milieux de traitement, temps de contact et la température.
- Etablissement des isothermes d'adsorption.

# *PARTIE THEORIQUE*

## **I.1 L'ADSORPTION**

Le terme adsorption a été proposé pour la première fois par KAYSER en 1881, pour différencier entre une condensation de gaz à la surface, et une adsorption de gaz, processus dans lequel les molécules de gaz pénètrent dans la masse. Enfin le terme de sorption a été proposé en 1909 par M.C. BAIN, il désigne aussi bien le phénomène d'adsorption que celui d'absorption [3].

L'adsorption fait partie des opérations physiques de séparation des mélanges [4], Elle définit la propriété de certains matériaux de fixer à leur surface des molécules (gaz, ions métalliques, des molécules organiques, etc.) d'une manière plus ou moins réversible. Il y a transfert de la phase aqueuse vers la surface solide.

Le phénomène est général pour toutes les surfaces. D'après WEBER ; tout solide est un adsorbant potentiel. Cependant, on cherche à l'exploiter en le magnifiant par l'emploi de solides à porosité élevée [6].

La substance qui fixe la molécule est appelée « adsorbant », la molécule fixée est appelée « adsorbât ».

### **I.1.1 TYPES D'ADSORPTION**

Suivant la nature des forces mises en jeu, on distingue deux types d'adsorptions :

- La physisorption qui est due principalement à des forces physiques ;
- La chimisorption qui est due surtout à des forces chimiques.

#### **I.1.1.1 L'adsorption physique ou physisorption**

L'adsorption du type physique est rendue possible par des forces d'attraction physique de type VAN der WAALS. L'énergie mise en jeu par ces forces est faible de l'ordre de 1 à 10 kcal/mole.

C'est un processus instantané car la vitesse d'adsorption est très rapide et ne peut avoir lieu qu'à des températures inférieures à la température d'ébullition de l'adsorbat.

#### **I.1.1.2 L'adsorption chimique**

L'adsorption de type chimique appelée aussi adsorption activée ou chimisorption se distingue nettement de l'adsorption physique. Elle met en jeu la formation des liaisons chimiques de forte énergie (25 à 400 kcal/mole) entre des composés ionisables et les groupements fonctionnels présents en bordure des adsorbants [6].

A ce type de liaison correspond une chaleur d'adsorption environ dix fois plus élevée que dans le cas de la physisorption. En outre le processus est sélectif comme l'est une réaction chimique et généralement irréversible.

La désorption est plus difficile [7] et le résultat en est fréquemment une combinaison chimique de l'adsorbât et l'adsorbant.

## I.1.2 FORCES D'ADSORPTION

Les molécules, ions ou atomes, formant la surface d'un solide sont soumises à des forces dissymétriques qui se traduisent par un champ de forces attractives. Ce champ représente une énergie superficielle par unité de surface, comparable à la tension superficielle des liquides. Ces forces sont neutralisées lorsque les particules mobiles (un gaz ou un solide) se fixent à la surface, on dit qu'elles s'adsorbent. La force qui retient une molécule adsorbée dépend de la configuration spatiale de l'interface [5].

## I.1.3 CINETIQUE D'ADSORPTION

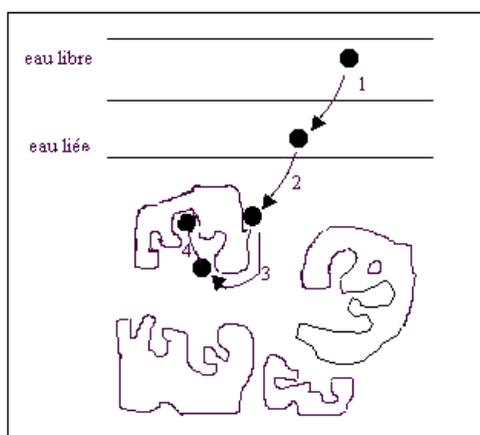
### I.1.3.1 Transfert de matière

Les phénomènes relevant de ce que l'on appelle le transfert de matière se manifestent chaque fois que dans un mélange fluide, les différents constituants sont en déplacement relatif les uns par rapport aux autres, ceci se produit lorsque les concentrations ne sont pas uniformes au sein du mélange. Si par conséquent, un constituant prend naissance ou disparaît localement dans le mélange, il se produit un transfert de ce constituant à partir de la région où elle est plus faible [8].

Ceci se traduit par un mouvement désordonné des molécules ou particules fluides, et on sera amené à caractériser le transfert de matière par des critères qui dépendent de :

- La nature des substances.
- Les conditions hydrodynamiques régissant le transfert.

Le transfert de matière dans un corps poreux s'effectue en plusieurs étapes [6,9]



*Fig.1.1 : étape de transfert d'un soluté lors de son adsorption [6].*

On détermine lors de la deuxième étape, un coefficient de transfert  $K_f$  qui dépend de l'agitation du milieu. Sa valeur est de l'ordre de  $10^{-3} \text{ cm.s}^{-1}$ . Celle-ci augmente si la granulométrie diminue. Par contre, elle chute si la masse moléculaire de soluté augmente car la diffusion moléculaire est limitée. Cette étape limite la vitesse d'adsorption.

La troisième étape fait intervenir un coefficient de diffusion  $D_S$  dont la valeur extrême sont  $10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pour les composés simples comme le phénol et  $10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  pour les macromolécules de type acide humique [6].

#### **I.1.4 FACTEURS INFLUENÇANT L'ADSORPTION**

Moins une substance est soluble dans le solvant, mieux elle est adsorbée. Il faut rompre le lien entre les solutés et l'eau pour autoriser l'adsorption. La facilité avec laquelle l'adsorbant fixe l'adsorbât, est fonction de *la taille de la molécule* et de *sa solubilité dans l'eau*. L'adsorption des composés ionisés est faible. Un haut poids moléculaire réduit la diffusion de l'étape 3 par conséquent, la fixation. Il devient évident que les substances de caractère hydrophobe, peu affines avec l'eau, sont quantitativement adsorbées [6].

L'équilibre d'adsorption entre un adsorbant et un adsorbât, dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont décrits ci-après:

##### **I.1.4.1 Surface spécifique**

Elle est définie comme étant sa surface par unité de masse (exprimée en  $\text{m}^2/\text{g}$ ), La quantité de substance adsorbée augmente avec l'accroissement de la surface adsorbante, pour atteindre un effet d'adsorption important, il est nécessaire que la surface de l'adsorbant soit la plus grande possible [10].

##### **I.1.4.2 Nature de l'adsorbant**

Tout solide peut être considéré comme adsorbant potentiel [11], mais la capacité d'un adsorbant varie d'un adsorbant à un autre. Par exemple des substances ayant une structure spongieuse ou fortement poreuse; ou celles qui sont finement pulvérisées (état de dispersion élevée) constituent de bons adsorbants.

##### **I.1.4.3 pH**

L'adsorption est maximum au point isoélectrique, car les liaisons avec l'eau y sont minimum, de même une molécule neutre est mieux adsorbée qu'une autre.

##### **I.1.4.4 Polarité**

L'affinité de l'adsorbant polaire pour le solvant est plus élevée quand ce dernier est plus polaire que le solvant.

##### **I.1.4.5 Température**

L'adsorption physique est généralement exothermique, d'où les résultats sont meilleurs à froid. La chimisorption par contre est endothermique. On cite par exemple une application curieuse et intéressante de l'action de la température dans l'épuration des eaux de teinturerie, pour obtenir une adsorption sélective des colorants en présence de détergents [5].

#### I.1.4.6 Nature de l'adsorbât

D'après la règle de LUNDELUIS : « moins une substance est soluble dans le solvant, mieux elle est adsorbée »

#### I.1.5 LES MODELES D'ADSORPTION

D'assez nombreux auteurs ont proposé des modèles, théoriques ou empiriques, pour décrire la relation entre la masse d'adsorbât fixée à l'équilibre et la concentration sous laquelle elle a lieu, il s'agit des relations non cinétiques, que l'on nomme « isothermes ».

Une telle isotherme est une courbe qui représente la relation entre la quantité d'impuretés adsorbées par unité de masse d'adsorbant et la concentration d'impuretés en solution [12].

Les trois isothermes les plus connues sont ceux de [13]:

- LANGMUIR,
- FREUNDLICH,
- BRUNAUER- EMMET-TELLER (B.E.T).

Cette dernière est la plus récente, car elle rend compte aussi du phénomène de saturation et fait intervenir la solubilité du soluté dans son solvant et admet la formation de nouvelles molécules.

##### I.1.5.1 Isotherme d'adsorption de LANGMUIR

C'est un modèle conceptuel : on suppose que les molécules adsorbées forment une monocouche et occupent une portion  $\alpha S$  de la surface  $S$ .

La théorie de Langmuir implique en fait :

- Il n'existe qu'un seul type de site d'échange à la surface ;
- Il ne peut y avoir adsorption que d'une seule molécule par site d'adsorption ;
- L'adsorption est limitée à une seule couche ;
- L'adsorption est réversible ;
- L'énergie d'adsorption est constante ;
- L'absence d'interactions entre les molécules adsorbées [3, 14].

L'équation de l'isotherme de LANGMUIR est la suivante :

$$X = Q \frac{bc}{1 + bc} \quad (1)$$

Où :  $X$ , la concentration de l'adsorbât présente à la surface / la masse d'adsorbant  
 $Q$ , capacité maximale d'adsorption correspondante à l'occupation de tous les sites disponible (mg/g)

$b$ , constante relative à l'énergie d'adsorption définie comme suit

$$b = b_0 \exp (-H_{\text{ads}}/ RT)$$

$b_0$ , constante relative à l'énergie  
 $H_{ads}$ , énergie d'adsorption (Kcal/mole)  
 $R$ , constante des gaz parfait  
 $T$ , température absolue (K)  
 $c$ , concentration de la solution à l'équilibre (g/l)

En exprimant l'inverse de X dans l'équation (1)

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{Q} + \frac{1}{bQc} \quad (2)$$

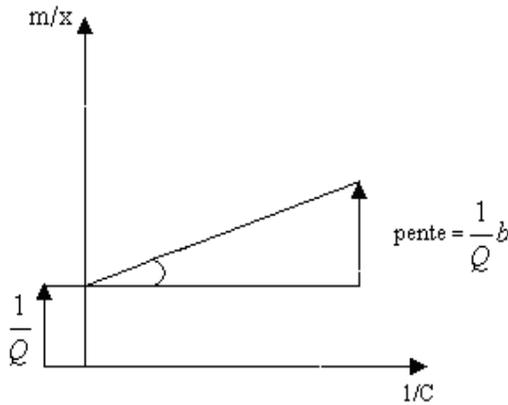


Fig.1.2: Evaluation graphique des constantes d'adsorption de modèle de Langmuir

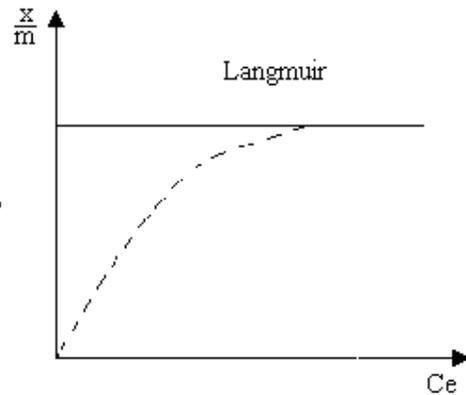


Fig.1.3 : Allure de la courbe d'isotherme de Langmuir

### I.1.5.2 Isotherme d'adsorption de FREUNDLICH

L'isotherme d'adsorption de FREUNDLICH, présentée en 1926, stipule que la quantité du soluté adsorbée par une masse d'adsorbant donnée est fonction de la concentration de la solution à l'équilibre [15]. Il repose sur l'équation empirique suivante :

$$\frac{x}{m} = k \cdot c^{1/n} \quad (3)$$

Où : k et n sont des constantes qu'il faut évaluer pour chaque solution et pour chaque température.

Ce modèle est très variable pour les solutions diluées, mais il est incompatible avec la saturation, car x croît sans limite si c croît.

L'équation de Freundlich est cependant plus utile sous sa forme logarithmique, soit :

$$\ln \frac{x}{m} = \ln k + \frac{1}{n} \ln c \quad (4)$$

Ainsi, si l'on porte  $\ln x$  en fonction de  $\ln c$ , on doit obtenir une droite en pente  $\frac{1}{n}$  et d'ordonnée à l'origine  $\ln K$  [16].

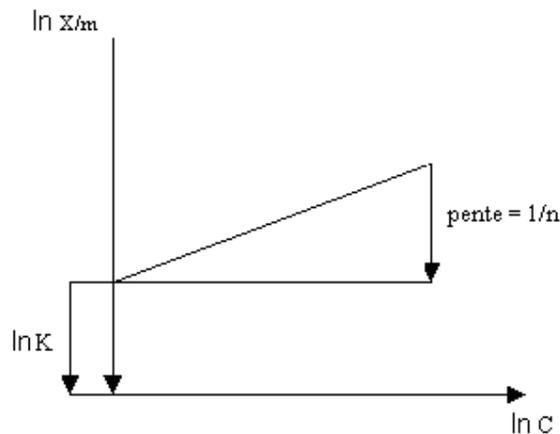


Fig I.4: Evaluation graphique des constantes d'adsorption de modèle de Freundlich

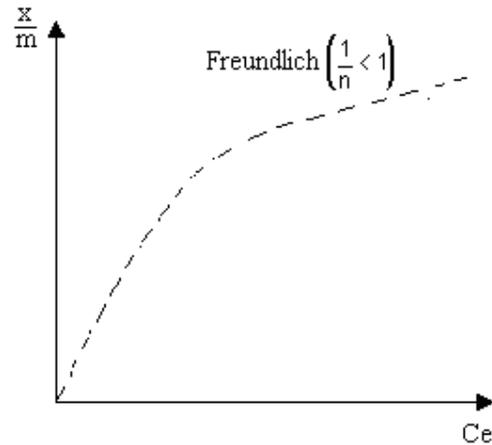


Fig I.5: Allure de la courbe d'isotherme de Freundlich

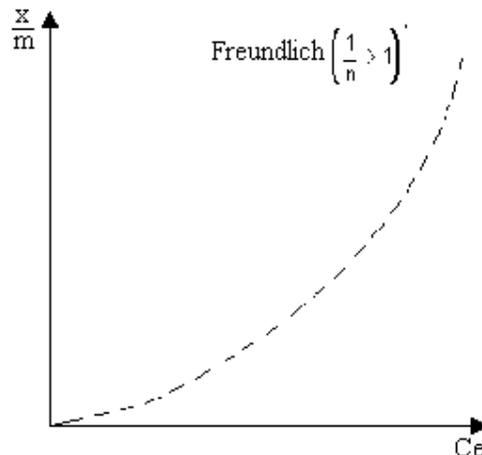


Fig I.6: Allure de la courbe d'isotherme de Freundlich

### I.1.5.3 Isotherme d'adsorption de B.E.T. (BRUNAUER - EMMETT - TELLER)

L'isotherme de B.E.T proposé en 1938, repose sur les hypothèses suivantes:

- Plusieurs couches successives de molécules peuvent être fixées sur l'adsorbant.
- Les sites d'adsorption sont distribués uniformément à la surface de l'adsorbant.
- Chaque site est indépendant des sites voisins.
- L'énergie d'adsorption retient la première couche de molécules, alors que l'énergie de condensation retient les couches successives suivantes [12].

L'isotherme B.E.T. a peu d'application en phase aqueuse, il sert surtout à déterminer les surfaces d'adsorption des charbons par l'azote gazeux [5].

L'équation de l'isotherme d'adsorption de B.E.T est la suivante :

$$\frac{x}{m} = \frac{kcx_o}{(c_s - c) \left[ 1 + (k-1) \frac{c}{c_s} \right]} \quad (5)$$

Où:  $x_o$ , masse d'impuretés adsorbées par la première couche par unité de masse d'adsorbant.

$c_s$ , concentration de saturation.

$k$ , coefficient déterminé empiriquement.

La forme linéaire du **B.E.T.** :

$$\frac{c}{(c_s - c) \frac{x}{m}} = \frac{1}{kx_o} + \frac{k-1}{kx_o} \left[ \frac{c}{c_s} \right] \quad (6)$$

Si on pose:  $y = \frac{c}{(c_s - c) \frac{x}{m}}$  et  $X = \frac{c}{c_s}$  (7)

L'équation (6) devient :  $y = \frac{k-1}{kx_o} x + \frac{1}{kx_o}$  (8)

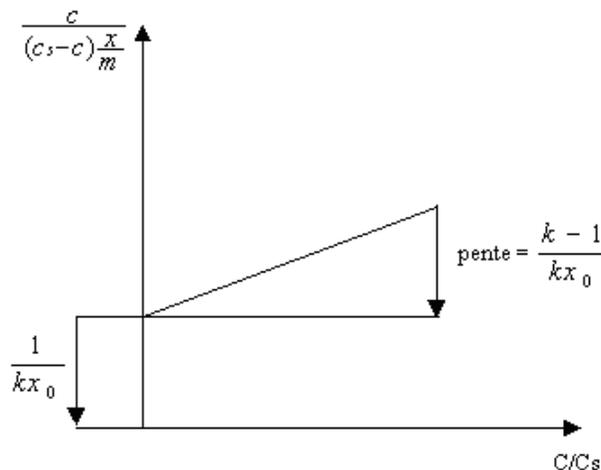


Fig.1.7 : Evaluation graphique des constantes d'adsorption de modèle de B.E.T

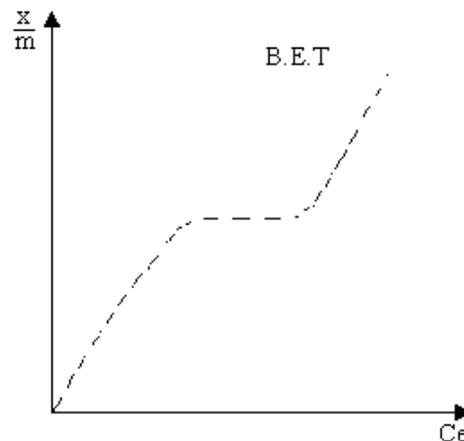


Fig.1.8 : Allure de la courbe d'isotherme de B.E.T

## **I.2 LES ADSORBANTS**

Tous les solides sur lesquels se produit une adsorption sont des corps poreux, c'est à dire présentent une très grande surface par rapport à leur masse.

Les principaux adsorbants utilisés en pratique sont, soit des produits naturels employés tels quels (terre à foulon) ou après un traitement préalable (activation) ayant pour but d'augmenter la porosité, soit certaines matières plastiques de synthèse. Certains adsorbants ont une origine minérale se sont les argiles, la magnésie, la bauxite, l'alumine et le gel de silice, les autres (noir animal, charbons végétaux, résines synthétiques) sont d'origine organique.

L'argile a fait l'étude de plusieurs travaux concernant l'adsorption des matières organiques en particulier les colorants, plusieurs techniques de décoloration ont été étudiées. Kacha S, Ouali M S et Elmelah S [1], ont étudié la sorption de deux grandes familles utilisés dans l'industrie textile : les colorants acides et les colorants dispersés. Le procédé proposé repose sur l'utilisation de sels d'aluminium (polyhydroxyaluminium) associés à une bentonite de forage. Les essais montrent que l'association bentonite -aluminium permet d'éliminer les colorants en quasi-totalité avec une excellente décantation. Sur un effluent industriel réel, le procédé permet de passer d'une DCO de 770 mg/l à moins de 30 mg/l.

Bouras O, HOUARI M, KHALAF H [17] se sont porté sur la préparation d'une série de complexes inorgano-montmorillonites (CIM) à grandes surfaces spécifiques et stables thermiquement qui est préparée par intercalation d'une montmorillonite algérienne par trois solutions pontantes à base d'aluminium, de fer ou de titane. L'adsorption de ces trois argiles pontées par du bromure de cétyl-triméthyl ammonium conduit à la formation de complexes organoinorgano-montmorillonites (COIM) hydrophobes et organophiles. Les isothermes d'adsorption de plusieurs composés organiques ont montré de grandes affinités adsorbants-adsorbats, surtout en milieu acide et avec les argiles à piliers de titane et de fer.

Sekrane F, M. Kadraoui, Z. Boubarka, A. Khenifi, Z. Derriche [18], on eu recours, pour le traitement des eaux polluées par des composés aromatiques, à l'utilisation de la bentonite algérienne en modifiant la structure de la montmorillonite par l'intercalation d'amines aliphatiques dans l'espace interlamellaire. Ils ont préparés deux types d'organo-montmorillonite selon la nature du cation organique intercalé.

Choi Ys, Cho Jh [19], ont mené des expériences pour évaluer l'efficacité des solutions de vermiculite (extrait) comme coagulant, et de vermiculite comme adsorbant, pour éliminer les colorants des eaux usées. La vermiculite s'est avérée un bon adsorbant, qui peut être régénéré à haute température. Le coût de l'application du vermiculite est de 11% du coût du charbon actif.

### **I.2.1 L'ARGILE**

L'argile est un matériau de la couche superficielle de l'écorce terrestre. Elle se forme le plus souvent par altération des minéraux des roches sous l'action des eaux de surface, sa genèse peut être due à l'action d'eau hydrothermale. Dans l'un et l'autre cas il y a un lien étroit entre l'existence de l'argile et l'eau [20].

Du fait de leur mode de formation, l'argile est en général un matériau polyphasique, composé à la fois de phases minérales et organiques [21]. Les phases minérales pures, dites "minéraux argileux", représentent alors des proportions variables du matériau global. Cependant, des conditions hydrothermales ont parfois favorisé la formation de matériaux argileux formés de phases d'une plus grande pureté.

L'intérêt accordé ces dernières années à l'étude des argiles par de nombreux laboratoires dans le monde se justifie par leur abondance dans la nature, l'importance des surfaces qu'elles développent, la présence des charges électriques sur cette surface et surtout l'échangeabilité des cations interfoliaires. Ces derniers, appelés aussi cations compensateurs, sont les principaux éléments responsables de l'hydratation, du gonflement, de la plasticité et de la thixotropie et ils confèrent à ces argiles des propriétés hydrophiles.

Parmi les argiles ayant des applications variées dont notamment l'adsorption et de la catalyse, nous pouvons citer les bentonites.

## **I.2.2 PRESENTATION DE LA BENTONITE**

### **I.2.2.1 Origine et historique de la bentonite**

L'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riches en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux, qui font partie principalement du groupe des smectites. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming, Etats-Unis).

La bentonite est un mélange naturel de minéraux, composé en majeure partie de montmorillonite (contient plus de 80 %) ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 par Damour et Selveta, près de Montmorillon, dans le département de la Vienne (France) [22].

Les bentonites se caractérisent par une capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement, ainsi que par des propriétés rhéologiques particulières (thixotropie). Elles ont de ce fait de larges applications, toujours plus nombreuses et dans différents domaines (forage, fonderie, céramique, peinture, pharmacie, terres décolorantes, etc.).

La majeure partie de la bentonite exploitée dans le monde est utilisée comme liant du sable de moulage, dans l'industrie de la fonderie et aussi pour épaissir les fluides de forage.

Pour de nombreuses applications techniques, les bentonites brutes doivent être soumises à une préparation adaptée aux exigences de leur utilisation (purification).

Lors de l'activation alcaline, les bentonites calciques (les plus fréquentes) sont transformées par traitement avec de la soude en bentonites de sodium, qui se caractérisent notamment par une capacité de gonflement plus élevée. L'activation avec des acides comme l'acide chlorhydrique augmente la porosité par dissolution périphérique des smectites. Il en résulte un produit de haute capacité d'adsorption.

## I.2.2.2 La structure de la bentonite

### I.2.2.2.1 Composition des feuillets

Les smectites sont composées de particules plates d'un diamètre allant de quelques microns à plusieurs centaines de microns. Ces particules sont elles-mêmes constituées d'un empilement de feuillets unitaires, formant spatialement une structure du type "jeu de cartes" (Figure.I.9).

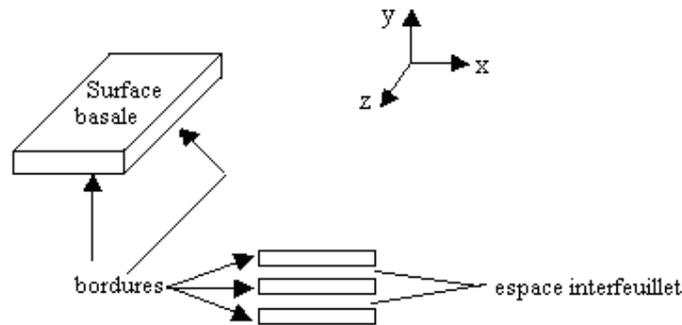


Fig.I.9 : Illustration de l'empilement des feuillets de bentonite montrant la surface basale, les bordures, ainsi que l'espace interfeuillelet [23]

Les feuillets de bentonite sont constitués d'une couche octaédrique (essentiellement aluminium Al (OH)<sub>3</sub> ou magnésium) emprisonnée entre deux couches de silice (SiO<sub>2</sub>) en coordination tétraédrique (structure dite T.O.T. ou 2:1), séparé l'un des autres par un espace interfoliaire dans lequel sont situés des cations échangeables associés à des molécules d'eau [24-25].

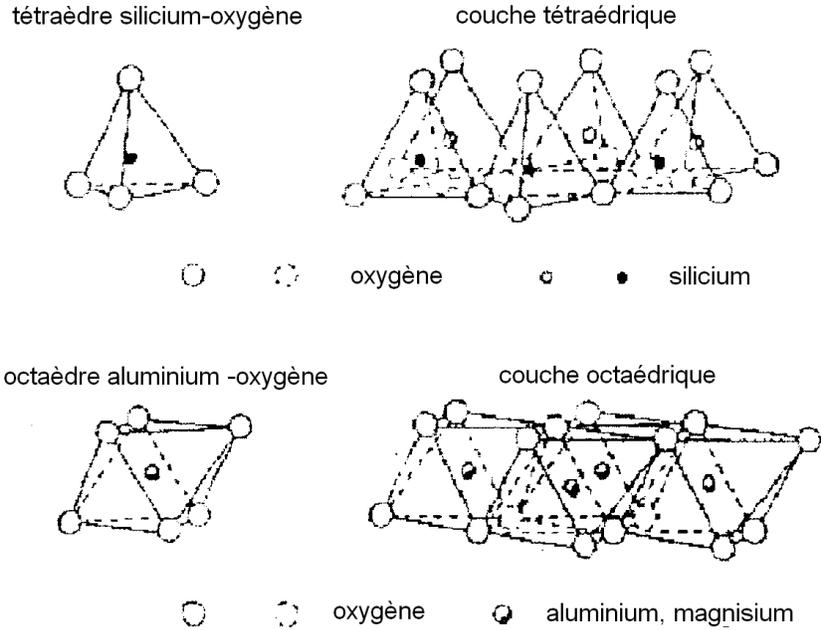
L'épaisseur totale du feuillet et de l'espace interfeuillelet associé est d'environ 14 Å. Cependant, ces minéraux argileux ont la capacité de gonfler en présence d'eau, comme nous le verrons plus loin, et cette épaisseur est alors par conséquent susceptible d'augmenter. Une représentation schématique de la structure des couches tétraédriques et octaédriques, ainsi que de leur empilement, est montrée sur la Fig.I.10 et la Fig.I.11, respectivement.

La formule chimique générale correspondant à une maille cristalline de smectite est [26]:

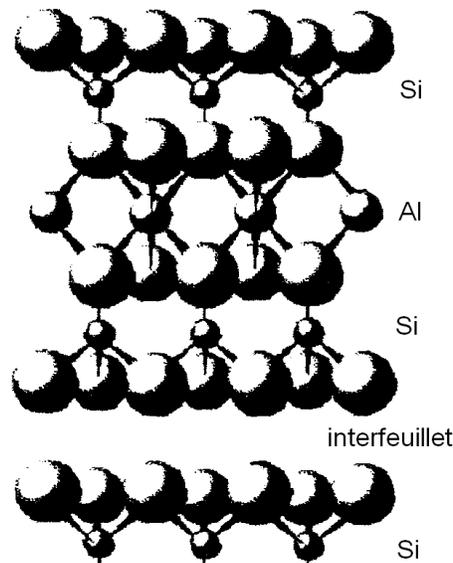


Où :

- les crochets désignent des éléments en coordination tétraédrique,
- les parenthèses désignent des éléments métalliques en coordination octaédrique,
- M symbolise un métal autre que Al, Fe, Mg,
- x est la charge négative de structure, compensée par des cations C de charge z, x étant compris entre 0,5 et 1,4.



*Fig.I.10 : Représentation des tétraèdres de silicium et des octaèdres d'aluminium ou de magnésium, ainsi que de leur agencement en couches.*



*Fig.I.11 : Représentation schématique de l'empilement des feuillets unitaires dans une smectite.*

Quant aux illites, elles sont elles aussi constituées d'une structure T.O.T., mais l'épaisseur totale du feuillet est plus faible (10 Å), et elles n'ont pas la propriété de gonfler en présence d'eau.

### I.2.2.2 Existence d'une charge de surface

Les études électrocinétiques menées sur les bentonites indiquent que pour tout pH supérieur à 2 ou 3, celles-ci portent une charge négative à leur surface, neutralisée par des cations dits "compensateurs". La principale origine de cette charge de surface provient de substitutions isomorphiques au sein du réseau cristallin résultant du remplacement des cations métalliques du réseau par des cations de même taille mais de charge inférieure. Cette charge négative est couramment notée charge structurale permanente ( $\sigma_0$ ) [27] et se situe aux alentours de  $7.10^{-3} e/\text{\AA}^2$ . Elle est à l'origine du gonflement de ces minéraux en présence d'eau. D'autres facteurs interviennent également dans la formation de la charge de surface : certaines imperfections au sein du réseau cristallin, la présence de liaisons rompues en bordure des particules, ou celle d'hydroxyles structuraux en surface.

### I.2.2.3 Classification des minéraux argileux

La classification est basée sur des notions structurales : le nombre de couches octaédriques et tétraédriques.

Les minéraux argileux qui font partie du groupe des phyllosilicates se composent de couches élémentaires organisées de manière caractéristique : tétraèdres et octaèdres.

Le Tableau N°.1.1 et la fig.1.12 montrent la classification et les groupes structuraux des principaux minéraux argileux et de leurs espèces.

Tableau N°.1.1 : schéma simplifié montrant la classification des principaux groupes de minéraux argileux et leurs espèces [17].

<i>Groupe de minéraux argileux</i>	<b>Espèce minérale</b>	Structure T – couche de tétraèdres O- couche d'octaèdres
<b>Kaolinites</b>	Kaolinites Halloysites dickite	Minéraux à 2 couches T-O T-O
smectites	montmorillonite saponite biedellite nontronite	Minéraux à 3 couches T-O-T T-O-T
Illites Vermiculites micas	illite vermiculite muscovite biotite	Ecart réticulaire variable du fait vde la présence d'eau H <sub>2</sub> O, cations
Chlorites	chlorite	Minéraux à 4 couches T-O-T-O T-O-T-O
Spiolites Palygorskites	Sepiolite (écume de mer) attapulgite	Minéraux en lattes 

La fig.1.12 montre les principaux cations des couches tétraédriques et octaédriques et les écarts réticulaires admis, étant sous entendu que celui de la montmorillonite peut varier de 15 à 21 Å selon la quantité d'eau interfoliaire [28].

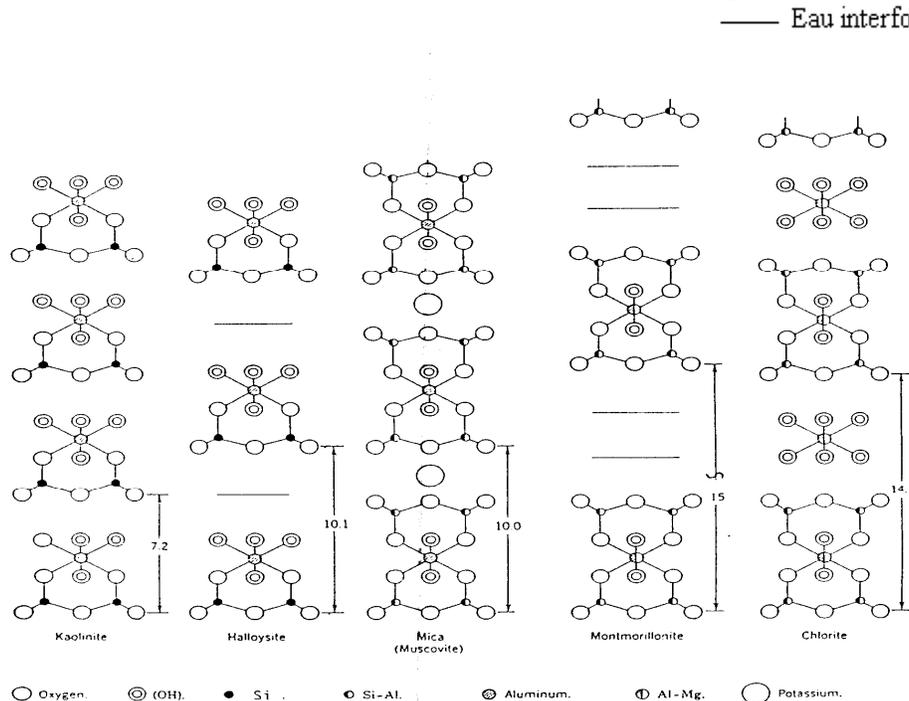


Fig. 1.12 : Groupes structuraux des principaux minéraux des argiles selon Brindley [28].

#### 1.2.2.4 Adsorption d'eau par les montmorillonites

A l'état anhydre, les feuillets argileux sont accolés les uns aux autres, mais ils s'écartent en présence d'eau (gonflement), ce qui rend accessibles les surfaces basales initialement en contact. Celles-ci constituent la surface interne du minéral, qui est de l'ordre de 800 m<sup>2</sup>/g, alors que la surface externe ne représente que 80 m<sup>2</sup>/g environ [29,30]. Cette dernière correspond aux surfaces basales externes et aux surfaces des bords des feuillets. Pour une pression relative donnée, l'écartement des feuillets et l'hydratation des surfaces internes dépendent de la nature des cations compensateurs.

Par ailleurs, la surface interne accessible à l'eau est variable selon la nature du cation compensateur. Calvet [30] a en particulier noté, dans le cas de la montmorillonite, que cette surface est largement supérieure s'il s'agit d'une argile compensée par du césium (720 m<sup>2</sup>/g) que pour une argile sodique (468 m<sup>2</sup>/g). Une montmorillonite échangée par du lithium a une surface relativement élevée, évaluée à 685 m<sup>2</sup>/g.

D'autres études plus récentes (expérimentales et théoriques) ont également montré l'influence notable de la nature du cation alcalin adsorbé à la surface des smectites (taille et énergie d'hydratation) sur la taille de l'interfeuille, la surface spécifique et l'adsorption d'eau à la surface argileuse. En particulier, sous l'effet de l'hydratation de l'argile, les ions Na<sup>+</sup> et à tendance à se détacher de la surface pour se localiser au niveau de la couche diffuse [31- 34].

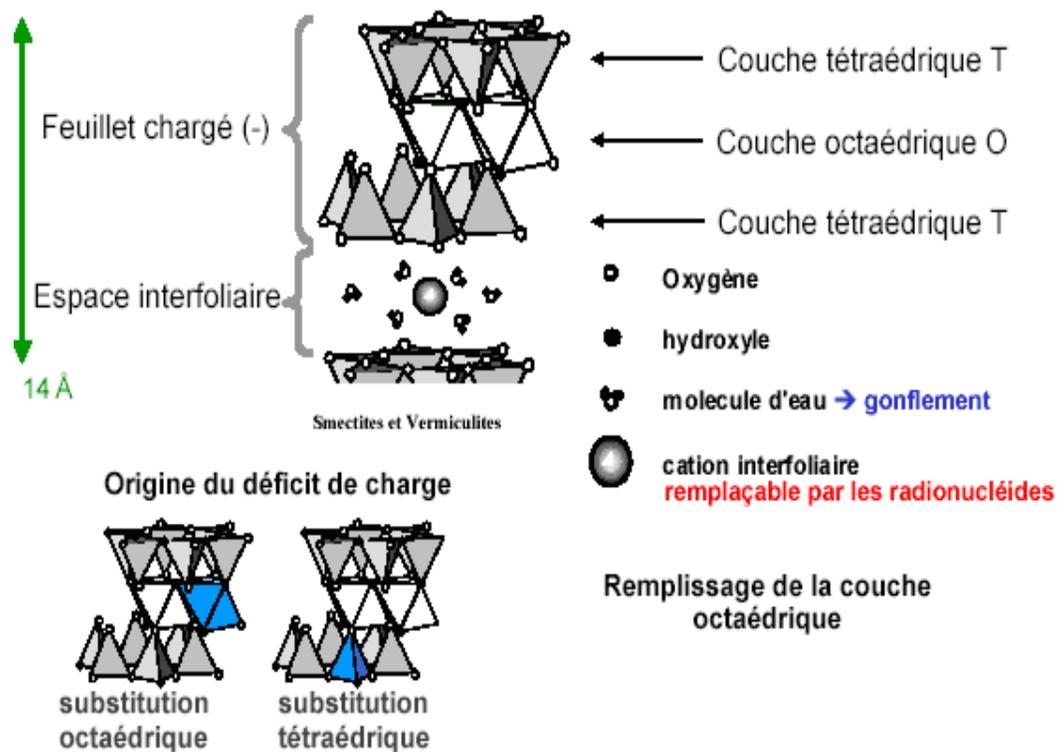


Fig.1.13 : Représentation schématique de l'adsorption d'eau par les smectites

### 1.2.2.5 Mécanisme de gonflement

Les substitutions isomorphes de  $\text{Al}^{3+}$  par  $\text{Mg}^{2+}$  à la surface des feuillets entraînent un excès de charge négative. Pour assurer l'électroneutralité, ce déficit de charge est compensé par des cations les cations compensateurs.

Ces cations échangeables se fixent à la surface des feuillets et assurent la liaison entre eux, l'intensité de ces liaisons dépend de la valence de ces cations. Plus les cations compensateurs sont petits et faiblement chargés, plus le gonflement de l'argile sera important. Ces ions facilement hydratables permettent grâce à leur complexion avec des molécules d'eau la diminution de forces attractives entre les feuillets. Le gonflement est décroissant selon le type de cations compensateurs suivant :  $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Fe}^{+2} > \text{K}^+$ .

Les montmorillonites compensées par des cations  $\text{Ca}^{2+}$  sont appelées des montmorillonites calciques. Lorsqu'elles sont compensées par des cations  $\text{Na}^+$ , elles sont appelées des montmorillonites sodiques.

Ces cations échangeables se fixent à la surface des feuillets et assurent la liaison entre eux. L'intensité de ces liaisons dépend de la valence de ces cations. A titre d'exemple, la valence des cations de sodium  $\text{Na}^+$  est plus faible que celle des cations de calcium  $\text{Ca}^{2+}$ , c'est pour cette raison que la montmorillonite sodique aura la plus grande surface spécifique, ce qui est propice à la fixation des molécules d'eau et des cations entre ces feuillets [35].

En effet, deux types de gonflement peuvent se produire au sein des matériaux argileux :

- le gonflement intraparticulaire ou interfoliaire,
- le gonflement interparticulaire.

#### **1.2.2.5.1 Gonflement interfoliaire**

Certaines argiles, pour lesquelles les liaisons interfeuillettes sont très faibles, ont la propriété de fixer des molécules d'eau entre deux feuillets voisins comme c'est le cas des smectites. L'eau pénètre alors à l'intérieur des particules et s'organise en couches mono moléculaires.

Il s'agit alors d'un gonflement *intraparticulaire ou interfoliaire*. Ce type de gonflement est réversible et intervient à l'échelle la plus petite de la structure argileuse et peut présenter une ampleur de gonflement très importante.

La pression de gonflement interfoliaire des bentonites est extrêmement élevée, elle est approximativement égale à 400MPa pour la première couche d'eau, à 110MPa pour la deuxième couche et à 27MPa pour la troisième couche [36].

#### **1.2.2.5.2 Gonflement interparticulaire**

Le gonflement est dit *interparticulaire* lorsque l'eau ne peut pénétrer à l'intérieur des feuillets argileux. Ce type de gonflement a une ampleur assez limitée mais affecte toutes les familles d'argiles.

La pression de gonflement *interparticulaire* est faible, elle est de l'ordre de 2MPa pour les bentonites [36].

#### **1.2.2.6 Principales caractéristiques de la bentonite**

Les principales caractéristiques de la bentonite qui influencent le gonflement sont les suivantes :

**1.2.2.6.1 La densité de charge spécifique** :  $\sigma$  est égale au rapport entre la capacité d'échange cationique CEC et la surface spécifique S de la particule argileuse :

$$\sigma(\text{meg} / \text{m}^2) = \frac{\text{CEC}}{S}$$

Deux types de charge existent dans les milieux argileux :

- une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques ( $\text{Al}^{+3}$  pour  $\text{Si}^{+4}$  dans la couche tétraédrique ;  $\text{Mg}^{+2}$  ou  $\text{Fe}^{+2}$  pour  $\text{Al}^{+3}$  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.

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux.

L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux.

### **1.2.2.6.2 La Capacité d'échange cationique (CEC) :**

Mesure la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argiles [33] et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler, et cela `a surfaces spécifiques égales [37].

### **1.2.2.6.3 La surface spécifique :**

La surface spécifique des argiles est composée de la surface externe comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé.

Tableau N°.1.2 : les principales caractéristiques de trois types d'argile [35]

Nom	Type	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une particule ( $\mu\text{m}$ )	Epaisseur d'une particule ( $\mu\text{m}$ )	Surface spécifique ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	CEC (meq/100g)
Kaolinite	1 :1	100-200	0,1-4	1-10	10-20	3-15
Illite	2 :1	1-10	0,1- 1	0,003-0,01	65-100	10-40
smectite	2 :1	1	0,1	0,001	700-840	80-150

### **1.2.2.7 Activation de la bentonite**

A l'état brut, la plupart des terres décolorantes ont de faibles capacités sorptionnelles, catalytiques et blanchissantes. Afin d'améliorer ces propriétés, on fait subir à ces terres (sorbant) des traitements physiques (chauffage) ou chimique (acides ou basiques).

#### **1.2.2.7.1 Activation thermique**

Un chauffage à une température de 105 à 110 °C d'une argile, permet l'élimination de l'eau. L'augmentation de cette température jusqu'à 900 °C permet le départ de l'eau de constitution et l'élimination des carbonates de calcium qui se décomposent en chaux et en gaz carbonique. Ceci provoque ou entraîne une variation de la surface spécifique en transformant les pores. l'activation thermique dépend de plusieurs facteurs à savoir:

- Composition minérale du substrat.
- Qualité et quantité des impuretés.
- Nature des cations échangeables.
- Eventuelle application des solvants naturels.

Selon J. Delapparent, l'activité par chauffage risque de détruire l'édifice structural de la montmorillonite [38].

### I.2.2.7.2 Activation chimique

En se basant sur la formule structurale proposée par HAUFFMAN et AL [38] on explique l'amélioration de la capacité sorptionnelle des bentonites subissant des traitements par l'acide.

La modification des liaisons octaédriques de la couche centrale formée de quatre atomes d'aluminium donne naissance à la formation de la bentonite ( $H^+$ ).

L'enlèvement de deux atomes sur quatre, laisserait l'ensemble du treillis de la structure élémentaire avec des charges négatives qui seraient compensées immédiatement par les ions  $H^+$ .

### I.2.2.8 UTILISATION DE LA BENTONITE

Le tableau N°.1.3 montre l'importance qu'a cette argile du point de vue utilisation et application dans différents secteurs [20,38].

Tableau N°.1. 3: Les principales utilisations de la bentonite.

Secteur d'utilisation	Exemple d'application
Industrie de forage	<ul style="list-style-type: none"><li>• Liant et enrobage du forage</li><li>• Ingrédient minéral du forage</li></ul>
Industrie alimentaire	<ul style="list-style-type: none"><li>• Clarification et purification des vins</li><li>• Décoloration des huiles</li><li>• Filtration des bières</li></ul>
Industrie pharmaceutique et cosmétique	<ul style="list-style-type: none"><li>• Liant des pommades</li><li>• Adsorbant des matières pharmaceutiques</li></ul>
Industrie textile	<ul style="list-style-type: none"><li>• Epaisseur des tissus</li><li>• Traitement antistatique</li><li>• Décoloration des effluents de l'industrie textile</li></ul>
Industrie des colorants	<ul style="list-style-type: none"><li>• Vernis et lutte thixotropie</li></ul>
Industrie chimique	<ul style="list-style-type: none"><li>• Support des pesticides</li></ul>
Engrais	<ul style="list-style-type: none"><li>• Additif d'engrais</li></ul>
Production végétale	<ul style="list-style-type: none"><li>• Amélioration du rendement de sol</li></ul>
Matériaux de construction	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ingrédient du ciment</li></ul>
Pétrochimie	<ul style="list-style-type: none"><li>• Catalyseur dans le raffinage du pétrole et les lubrifiants</li><li>• Dessiccation des gaz et des vapeurs</li></ul>
Industrie de papier	<ul style="list-style-type: none"><li>• Papier pour impression et production spéciale</li></ul>
Fonderie	<ul style="list-style-type: none"><li>• Moule</li></ul>

### I.3 LES EFFLUENTS DE L'INDUSTRIE TEXTILE

Les articles textiles subissent au cours de leurs transformations et traitements, plusieurs opérations utilisant de différents produits chimiques et colorants sous deux formes : solubles tels que les colorants directs, acides, cationiques, métallifères, au chrome, réactifs et leuco-esters de colorant de cuve et insolubles dans l'eau- les colorants pigmentaires, les colorants azoïques insolubles. Ces produits chimiques génèrent des effluents ayant une forte pollution organique. Dans les teintureries/imprimeries, la couleur pose un problème supplémentaire. Cette pollution extrêmement visible ne peut être partiellement éliminée que par un traitement spécifique, en particulier pour les colorants solubles.

Certains produits chimiques utilisés en teinture des fibres textiles ainsi que leur présence dans l'effluent, même à faible concentration, exerce une action toxique sur le milieu récepteur. Toute substance ne devient toxique, qu'au-delà d'un certain seuil dit « seuil de toxicité ». Il dépend essentiellement de la concentration dans l'eau. Des expériences de HASELMOFF et HUNNEMAIER sur des poissons ont montré que le colorant « noir de luxanthol » utilisé pour la teinture de la viscose est déjà toxique à 5mg/l pour les « Guppies » certains colorants à la concentration de 1mg/l, exercent un effet de ralentissement sur l'activité vitale des algues du genre *scenedesmus* et à partir de 2mg/l pour les crustacés, les chiffres correspondantes pour le rouge « Congo », sont de 0,6mg/l pour les algues et 4mg /l pour les crustacés [39].

Tableau N°.4 : caractérisation des eaux résiduaires de teinture des fibres et file en laine, teinture et finissage des tissus en laine [40].

Eau résiduaire Paramètres	teinture des fibres et fils en laine	teinture et finissage des tissus en laine
	RANG CONCENTRATION	RANG CONCENTRATION
pH	10-12	6-7
DCO mg/l	500-900	300-1 500
DBO <sub>5</sub> mg/l	150-300	250-500
MES mg/l	50-100	100-150
Couleur mg Pt- Co/l	300-1 000	500-1 500
M.I. equitox/m <sup>3</sup>	3-10	5-25
Conductivité µS/cm	3 000-6 000	2 200-3 000

#### I.3.1 LES DIFFERENTS TYPES DE POLLUANTS DES EFFLUENTS DE L'INDUSTRIE TEXTILE

##### I.3.1.1 Matières décantables

Les quantités de matières décantables habituellement mesurées dans les eaux résiduaires varient considérablement ; elles dépendent de plusieurs facteurs, tels le procédé d'ennoblissement, le type de fibres, le conditionnement des fibres, et varient aussi selon que le procédé est à marche continue ou discontinue. Parfois, les matières non dissoutes restent en suspension et un filtrage est insuffisant.

### **I.3.1.2 Métaux lourds**

L'état actuel de la technique permet de limiter la charge en métaux lourds dans les effluents des usines textiles. Certains procédés de teinture peuvent entraîner la présence de chrome, de cobalt et de cuivre dans les eaux résiduaires, et les traitements d'apprêt.

### **I.3.1.3 Hydrocarbures**

Les hydrocarbures constituent une charge polluante plus préoccupante. Ils sont surtout apportés lors de l'opération de huilage qui confère aux filés des propriétés de lissage. D'autres particules viennent des résidus des apprêts (imprégnation).

### **I.3.1.4 Composés organo-halogénés**

Les composés organochlorés sont un autre polluant sérieux. Le paramètre total AOX (composés organiques halogénés adsorbables) regroupe des substances dont les propriétés écologiques et toxicologiques ne sont guère comparables entre elles.

Les sources principales du paramètre total AOX sont les chlorures blanchissants, les apprêts antifeutnants de la laine, les véhiculeurs utilisés pour la teinture des fibres synthétiques, les réactifs chlorés et les savons contenant des solvants dérivés des hydrocarbures chlorés, que l'on utilise aussi dans le "nettoyage à sec" pour déshuiler les articles en polyester.

### **I.3.1.5 Agents de surface/détergents**

Les matières des agents de surface, appelés composés tensioactifs ou détergents, constituent une charge polluante non moins négligeable. Il s'agit des agents de lavage, des émulsionnants et des mouillants, des additifs augmentant le lissage et la douceur des fibres, utilisés en grandes quantités qui ne sont pas biodégradables à 100% [41].

La charge polluante des eaux imputable aux composés tensioactifs n'est pas seulement due à sa charge organique, elle provient aussi de son effet tensioactif, qui tend à réduire le pouvoir d'auto-épuration des cours d'eau et met en péril la vie des micro-organismes et des poissons.

### **I.3.1.6 Coloration**

Les colorants solubles dans l'eau constituent une source de pollution spécifique à l'ennoblissement textile. En cas de forte coloration, qui toutefois disparaît généralement des effluents de l'industrie textile après un traitement biologique, les plantes ne reçoivent plus suffisamment de lumière.

Des procédés ayant apporté la preuve de leur efficacité est le traitement anaérobie partiel par dosage de sels de fer en liaison avec de la chaux, le traitement biologique sur charbons actifs ou, depuis une époque récente, le procédé de filtration sur membrane (ultrafiltration, osmose inverse). Dans certains cas spécifiques, la filtration

sur membrane permet une récupération partielle des colorants, ainsi qu'un recyclage des eaux de procédé [42].

D'autres facteurs peuvent constituer des charges polluantes à s'avoir :

- **Température de l'eau**

Les opérations de teinture s'accompagnent de déversements d'eau chaude en telle quantité que l'effluent total peut atteindre des températures supérieures à 40°C, alors que la température maximum autorisée est de 35°C [42].

- **pH**

En Allemagne, comme dans la plupart des autres pays européens, un pH entre 6 et 9 est prescrit pour les eaux sortant de la station d'épuration [42].

Selon la phase de production et le procédé retenu, les effluents provenant de la laine présentent un excédent d'acide qui doit être neutralisé avec de l'alcali, le pH des eaux résiduelles du coton est généralement alcalin. Après neutralisation réciproque partielle des différents effluents, l'eau est acheminée dans la station d'épuration en quantité régulière avec un pH corrigé.

### **I.3.2 METHODES UTILISEES POUR LA DECOLORATION DES EAUX DE REJETS TEXTILES**

L'importance de plus en plus grande qu'on attache aujourd'hui à la protection du milieu naturel et à l'amélioration de la qualité de l'eau, ont fait que la recherche accorde un intérêt certain, aux voies et moyens à mettre en œuvre pour l'élimination des colorants dans les eaux de rejets.

Toute étude doit être orientée vers l'exploitation d'un procédé qui permet l'élimination de la couleur par la dégradation complète de la molécule du colorant et non la destruction du colorant, en l'occurrence les groupements chromophores, car une destruction partielle peut donner naissance à d'autres substances plus ou moins toxiques [43].

Dans cet ordre d'idées, plusieurs méthodes ont été utilisées.

#### **I.3.2.1 La coagulation- floculation**

La coagulation chimique est l'un des moyens de décoloration parmi les plus efficaces. C'est un procédé qui favorise l'agglomération de très petites particules en un précipité lourd et volumineux (floc), extrait par décantation.

En pratique Les coagulants [44] les plus connus sont :

- La chaux
- Les sels d'alumine tels que le sulfate d'alumine
- Les sels ferriques

Ce procédé est très efficace pour les colorants ayant une faible solubilité. Il se produit en conséquence de très grandes quantités des boues induites par la dose élevée de l'électrolyte (600 mg/l) [45]

Les colorants acides, directs, de cuve, métallifères et réactifs coagulent le plus souvent mais le floc obtenu est de mauvaise qualité et décante très mal, même après l'ajout d'un floculant. Un traitement de coagulation-floculation donnera donc des rendements médiocres. Les colorants au soufre et dispersés coagulent bien et leur décantation est aisée du fait qu'un floc de bonne qualité se forme. La décoloration obtenue est pratiquement complète. L'efficacité de la coagulation-floculation est donc excellente pour ce type de colorant [46].

### **I.3.2.2 Le traitement biologique**

Les méthodes biologiques sont largement utilisées pour le traitement des eaux usées urbaines et industrielles. Les plus connues sont le lagunage, les filtres biologiques et les boues activées. Mais si ces méthodes sont assez efficaces pour réduire la **DCO**, la **DBO** et le taux de **MES** des effluents de teinturerie, ils sont en revanche peu efficaces pour leur décoloration, La plus part des colorants synthétiques résistent en effet à la dégradation biologique [47].

### **I.3.2.3 Les résines échangeuses d'ions**

Cette technique de purification est déjà ancienne, mais son utilisation pour le traitement des eaux est relativement récente. La plupart des résines utilisées à l'échelle industrielle sont des polyélectrolytes insolubles cationiques ou anioniques [48].

### **I.3.2.4 Procèdes membranaires**

De nos jours, de nombreux procédés à membrane s'imposent dans le domaine de l'eau potable et même des eaux résiduaires. L'élément de base c'est la membrane, cette dernière est une paroi mince, liquide ou solide qui oppose une résistance sélective au transfert des différents constituants d'un fluide.

Les membranes utilisées de nos jours, sont celles de deuxième génération ou asymétriques. Elles sont formées d'une couche filtrante souvent nommée peau d'une épaisseur de 0.1 à 0.5  $\mu\text{m}$ , déposée sur une sous couche poreuse servant de support. Si les deux couches fabriquées à partir du même matériau, on a affaire à une membrane homogène. Dans le cas contraire, il s'agit de membrane composite.

Les membranes sont fabriquées avec des matériaux organiques ou minéraux, la séparation des composés de l'eau dans le traitement des eaux usées peut se faire sous l'influence d'une pression hydraulique [6].

Dans l'optique du recyclage de l'eau est promise à un bel avenir. Les tests de microfiltration, d'ultrafiltration et de nanofiltration sont faits sur des filtres de 0,45  $\mu\text{m}$ . Les résultats obtenus sont:

- Les colorants dispersés et les colorants de cuves sont fortement arrêtés par une membrane de microfiltration. Les autres colorants sont peu ou pas stoppés [46].
- Avec l'ultrafiltration les décolorations obtenues sont complètes pour tous les colorants.

Les principaux handicaps de ce procédé restent le coût élevé de l'exploitation qui augmente très rapidement avec l'augmentation du débit des effluents à traiter [43]

### **I.3.2.5 L'oxydation**

Les procédés d'oxydation sont très souvent utilisés pour la décoloration des effluents, mais ils sont généralement utilisés en combinaison avec d'autres procédés. Les méthodes les plus connues sont la chloration et l'ozonation.

Généralement très gênée par le pH s'agissant des colorants azoïques [49,50] Ce procédé est souvent associé à un traitement par rayonnement (UV) pour l'élimination des colorants acides, basiques, et réactifs [51]. Elle peut d'ailleurs donner naissance, lors de l'oxydation des colorants réactifs, à des substances toxiques [50].

### **I.3.2.6 La chloration**

La chloration est utilisée directement soit avec du chlore liquide, soit des solutions d'hypochlorite ou de dioxyde de chlore [48]. Elle présente un succès certain pour la biodégradation des colorants, mais elle est toutefois inefficace contre les colorants dispersés [52].

### **I.3.2.7 L'ozonation**

La couleur de l'eau est causée par des molécules organiques à longues chaînes carboniques, avec des doubles liaisons conjuguées. Les molécules de ce type absorbent certaines radiations de la lumière dans le visible et l'ultraviolet et émettent d'autres, en particulier dans le visible.

L'ozone a une action oxydante et attaque préférentiellement les molécules colorantes au niveau de leur double liaison. La décoloration des colorants acides, métallifères, cationiques, directs, réactifs et au soufre est le plus souvent très efficace avec des doses en ozone raisonnable (50 à 100mg/l). Les colorants dispersés et de cuve sont difficilement décolorés par l'ozone même avec des doses importantes [46].

### **I.3.2.8 Traitement physico –chimique : l'adsorption**

Le procédé d'adsorption est largement utilisé dans les techniques de séparation et c'est le seul pratiqué dans l'industrie des boissons gazeuses. Son principal atout pour l'élimination des colorants réside dans le fait qu'il élimine toute la particule du colorant.

Le charbon ordinaire est utilisé depuis longtemps comme agent de décoloration. Le procédé au charbon actif est cependant plus récent et représente actuellement l'une des méthodes les plus efficaces pour le traitement des effluents industriels.

SINGER et TATKEN [53] ont étudié l'adsorption de trois colorants basiques et deux colorants réactifs différents; les remarques ont été faites:

- L'adsorption des colorants basiques augmente avec la surface des particules de charbon actif.
- La plupart des isothermes d'adsorption ne correspondent pas au modèle de Langmuir.
- Les colorants cationiques, métallifères et acides sont très bien décolorés par les charbons actifs avec des rendements supérieurs à 90%. Les colorants directs, au soufre, dispersés et réactifs sont moyennement décolorés (supérieur à 40%) ou le sont avec des doses massives en charbon actif. Pour les colorants de cuve, la décoloration est très faible (inférieure à 20%) [46].

### Conclusion:

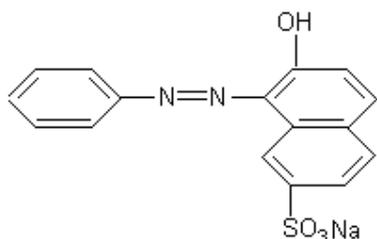
Les différents procédés qu'on vient de citer montrent que la décoloration des effluents textiles reste la plus difficile à satisfaire, étant donné qu'on ne trouve pas actuellement de procédé de décoloration satisfaisant pour toutes les classes de colorants.

## I.4 APPLICATION DES COLORANTS ACIDES

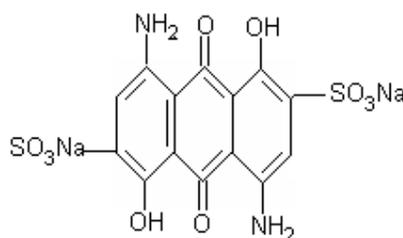
### I.4.1 Définition

Les colorants acides sont des colorants ioniques solubles dans l'eau et destinés à la teinture des fibres protéiniques et de polyamide de formule générale  $COL-(SO_3Na)_n$ . Selon leur structure chimique, ces colorants appartiennent aux colorants azoïques, diazoïques, anthraquinoniques et rarement dérivés de triphénylméthane. Ces colorants possèdent une gamme étendue de couleurs très vives.

*Exemples :*



*Colorant acide orange G*



*Colorant acide bleu anthraquinoniques*

En qualité de groupes auxochromes sont introduits : -OH, -NH<sub>2</sub>, -NHR et des groupes donneur- accepteurs polaires. En comparaison avec les colorants directs,

ces colorants possèdent une faible masse moléculaire (300-500), il n'est pas donc nécessaire d'introduire dans leurs molécules un grand nombre de groupes solubilisant ( $-\text{SO}_3\text{Na}$  ou  $-\text{COONa}$ ) pour leur donner une grande solubilité.

En milieu acide les fibres protéiniques et le polyamide acquièrent une charge positive et l'anion de colorant ( $\text{COL-SO}_3^-$ ) est fixé dans la fibre par une liaison ionique. Un tel mécanisme d'action est caractérisé par :

- La capacité de la liaison ionique à s'hydrolyser en milieu aqueux (faible résistance aux épreuves humides),
- L'apparition instantanée de l'affinité du colorant pour la fibre, provoquant un mauvais unisson des teintures, en particulier pour la fibre de polyamide.

#### 1.4.2 Caractéristiques des colorants acides

Selon l'affinité de colorant pour la fibre c'est-à-dire, de sa capacité de migrer, les colorants acides sont classés en trois groupes, différents par leurs propriétés et par les conditions d'emplois en teinture.

Tableau N°.I. 5 : Caractéristiques des colorants acides [54].

Paramètres	Colorant à pouvoir égalisant élevé (I)	Colorant à pouvoir égalisant moyen (II)	Colorant à pouvoir égalisant faible (III)
Solidité des teintures au mouillé	faible	bonne	Très bonne
PH du milieu (acide ou sel acide)	2 - 4 $\text{H}_2\text{SO}_4$	3 - 6 $\text{CH}_3\text{COOH}$	6 - 7 $\text{CH}_3\text{COONa}$
Caractéristiques des colorants	Faible masse moléculaire ; solubilité élevée ; solution réelle de teinture ; affinité faible ; vitesse de diffusion élevée	Masse moléculaire moyenne; solubilité faible; agrégés en solution; affinité élevée ; vitesse de diffusion faible	Masse moléculaire élevée ; mauvaise solubilité; agrégé en solution; affinité élevée; vitesse de diffusion très faible

D'après ce tableau, on remarque que les colorants du premier groupe forment des solutions réelles même aux basses température par contre, les colorants du troisième groupe sont fortement associés à la température de 25°C (le degré d'association de certains colorants est  $n \sim 500$ ),  $n \sim 50$  à la température de 60°C et  $n \sim 2$  à la température de 90°C.

Les colorants du troisième groupe présente un grand intérêt du point de vue des solidités des teintures aux épreuves humides. Dans le cas où la destination de la marchandise exige des teintures solides, on recourt surtout à ce colorant. Pour la résolution du problème de l'unisson, on procède au choix des recettes et au régime de teinture optimal.

### I.4.3 CINETIQUE DE LA TEINTURE

Des recherches effectuées sur des acides aminés (types de fibres protéiniques et de polyamide) ont montré que, dans les solutions neutres, ils existent sous une forme bipolaire (I). En présence des acides ils se transforment dans la forme (II) et en milieu alcalin il se trouve dans la forme (III). L'existence des acides aminés sous une forme non ionisée (IV) est peut probable (fig.I.14).

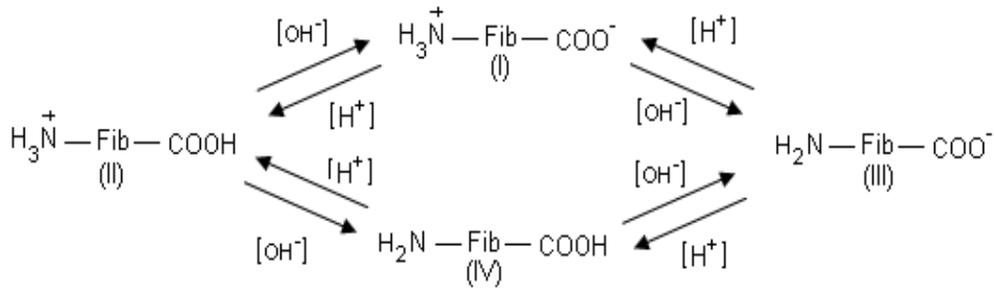


Fig.I.14: Schema du changement de la charge des fibres protéiniques et du polyamides en fonction du PH

La fig.I.15 montre que la vitesse de diffusion des ions  $\text{H}^+$  et  $\text{Cl}^-$  dans la fibre est supérieure à celle des anions de colorant avec de grandes dimensions. Les groupes carboxyliques ionisés sont rapidement neutralisés par les protons  $\text{H}^+$  et les ions  $\text{Cl}^-$  sont fixés sur les centres actifs  $-\text{NH}_3^+$  chargé positivement de la fibre.

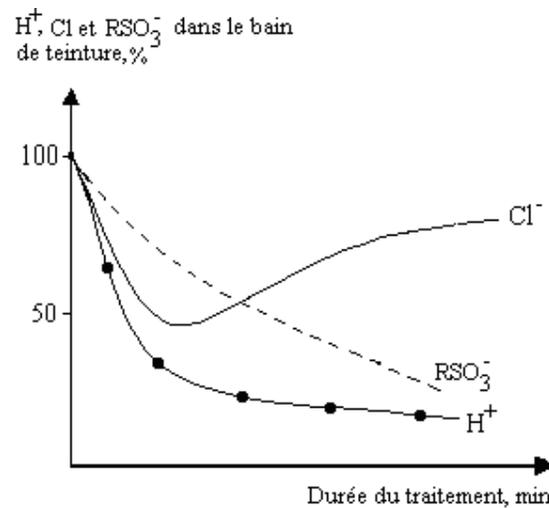
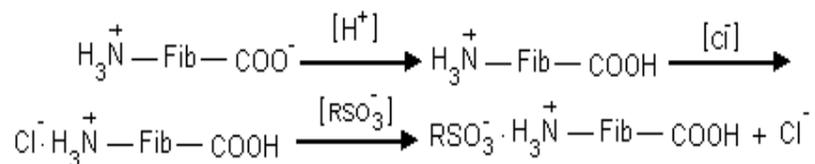


Fig.I.15: Influence du temps sur les concentrations des ions de chlore, hydrogène et anion de colorant dans le bain de teinture de la laine avec les colorants acides [55]

Les anions de colorant entrent lentement en réaction avec les groupes aminés chargés positivement de la fibre en déplaçant les ions  $\text{Cl}^-$ , étant donné qu'ils ont plus grande affinité pour la fibre que les anions du chlore. Pendant un temps suffisamment grand de teinture un équilibre s'établira dans le système de teinture et les concentrations de tous les ions dans la solution seront constantes. C'est seulement après toutes ces transformations (réaction ci-dessous) que la liaison

saline se formera entre l'anion du colorant et le groupe aminé chargé positivement de la fibre.



L'acide joue le rôle d'activateur du processus de teinture en transformant la fibre dans un état très actif, nécessaire à la sorption des colorants. En rapport avec ceci, les électrolytes sont utilisés comme égalisant.

Des études sur la fixation des colorants acides dans les fibres protéiniques et de polyamide ont montré que la quantité de colorant fixée dans la fibre est équivalente à la quantité de l'acide liée par la fibre :

- Laine 0,8 – 0,9 éq-g. /kg
- Soie naturelle 0,2 – 0,3 éq-g. /kg
- Polyamide 0,004 – 0,06 éq-g. /kg

La vitesse de diffusion des colorants acides diffère d'une fibre à une autre. La couche écailleuse de la laine s'oppose à la diffusion du colorant et peut provoquer un mauvais unisson des teintures. La résolution de ce problème est possible soit par la destruction de cette couche par chloration ; soit par l'introduction dans le bain de teinture des substances organiques, par exemple des alcools (benzylique, propylique ...) qui provoquent le gonflement de la couche écailleuse et l'extraction des substances hydrophobes.

METHODES ET MOYENS

D'ANALYSES

## **II METHODES ET MOYENS D'ANALYSES**

### **II.1 MATIERES UTILISEES**

#### **II.1.1 Bentonite**

Pour l'élaboration du sujet traité, nous avons étudié la bentonite de type montmorillonite provenant du gisement de Maghnia sous forme de masses poudreuses compactes de couleur blanche à beige avec un éclat terne.

#### **II.1.2 Colorants [56]**

Les colorants Bemacid sont des colorants acides, solubles dans l'eau destinés à la teinture des fibres protéiniques (laine et soie naturelle), les polyamides et les cuirs.

##### **II.1.2.1 Colorant Rouge Bemacid CL-BN 200**

Colorant ayant d'excellentes propriétés de migration et d'unisson d'où leur appartenance au premier groupe des colorants acides, appliqués en milieu fortement acide.

- Solubilité : 25 g/l

##### **II.1.2.2 Colorant Jaune Bemacid CM-3R**

Colorants ayant de faibles propriétés d'unisson d'où leur appartenance au troisième groupe des colorants acides, appliqués en milieu faiblement acide.

- Solubilité : 20 g/l

### **II.2 PRODUITS CHIMIQUES**

Produits Chimiques	Formule chimique	Aspect	Producteur	Pureté	Utilisation
Citrate de sodium	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Solide	Panreac	95%	Dissoudre les oxydes de fer de la bentonite
Bicarbonate de sodium	$\text{NaHCO}_3$	Solide	Reachim	99,8%	Dissoudre les oxydes de fer de la bentonite
peroxyde d'hydrogène	$\text{H}_2\text{O}_2$	Liquide	Panreac	30%	Détruire la matière organique présente dans la bentonite
Chlorure de sodium	$\text{Na Cl}$	Solide	Panreac	99%	Mise en forme sodique de la bentonite.
Acide chlorhydrique	$\text{HCl}$	Liquide	Prolabo	37%	Lavage des sulfures de fer, hydroxydes et oxydes d'aluminiums
Hydrosulfite de sodium	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$	Solide	Panreac	92%	Destruction des oxydes de fer
Acide sulfurique	$\text{H}_2\text{SO}_4$	Liquide	Panreac	98%	Activateur de teinture
Acétate se sodium	$\text{CH}_3\text{COONa}$	Solide	Prolabo	82,03%	Acide latent dans la teinture de la laine
Sulfate de soude	$\text{Na}_2 \text{SO}_4$	Solide	Reachim	96%	Egalisant

## II.3 METHODES

### II.3.1 PREPARATION DE L'ADSORBANT

#### *Purification de la bentonite*

Toutes les expériences dans ce travail ont été réalisées sur un même lot de bentonite provenant du gisement de Maghnia-Algérie.

La bentonite de Maghnia a été purifiée selon la technique suivante :  
Après broyage des morceaux la poudre d'argile, dont les particules présentent un diamètre moyen d'environ 40 micromètres, a été traitée par une solution tampon au

citrate de sodium donné à la fig.II.1, afin de dissoudre les oxydes de fer qui forment des agrégats avec les particules d'argiles [57,58]. Les sulfures de fer, hydroxydes et oxydes d'aluminiums déposés sont éliminés par lavage à l'acide chlorhydrique.

Une oxydation par  $H_2O_2$ , permet ensuite de détruire la matière organique. L'échantillon ainsi obtenu est mis en forme sodique par suite d'un échange d'ions, avec une solution de NaCl (0,5M) à trois reprises. La fraction d'argile est séparée par sédimentation [59].

- **Mode opératoire**

120 grammes d'argile sont dispersés dans un bêcher de 5l contenant 1,5 l d'eau distillée. Maintenir le mélange sous agitation pendant 15 minutes et ajouter ensuite une solution tampon [220,5 g de citrate de sodium ( $Na_3C_6H_5O_7 \cdot 2H_2O$ )], 126 g de bicarbonate de sodium et 175,5 g de chlorure de sodium à PH=7,3.

Le mélange est chauffé sous agitation à une température de 75°C pendant 15 à 20 minutes. Ensuite ajouter lentement 15 grammes d'hydrosulfite de sodium ( $Na_2S_2O_4$ ). Après 15 minutes d'agitation, l'autre moitié d'hydrosulfite est ajoutée, soit 15 grammes.

Le mélange refroidi est centrifugé à 9000 trs/min dans une centrifugeuse modèle SIGMA 3K30. Pendant 15 minutes. Le culot d'argile est lavé deux fois par HCl à 0,05 M (1,5 l) pendant 3 à 4 heures. Après centrifugation, l'argile est redispersée dans 2,5 l d'eau oxygénée à 30 volumes pendant une nuit, puis chauffée à 70°C pendant 30 minutes pour éliminer la matière organique.

L'échantillon ainsi purifié est lavé 3 fois avec NaCl 0,5 M. par échange d'ion on obtient la montmorillonite sodique. Les ions  $Cl^-$  gênant sont éliminés par lavage à l'eau permutée (3fois).

La fraction d'argile est recueillie par sédimentation au bout de huit heures, les particules plus lourdes (impuretés) sédimente plus vite (lois de Stokes). La bentonite sodique recueillie est séchée à 80°C à l'étuve pendant 3 jours puis stockée pour usage ultérieur.

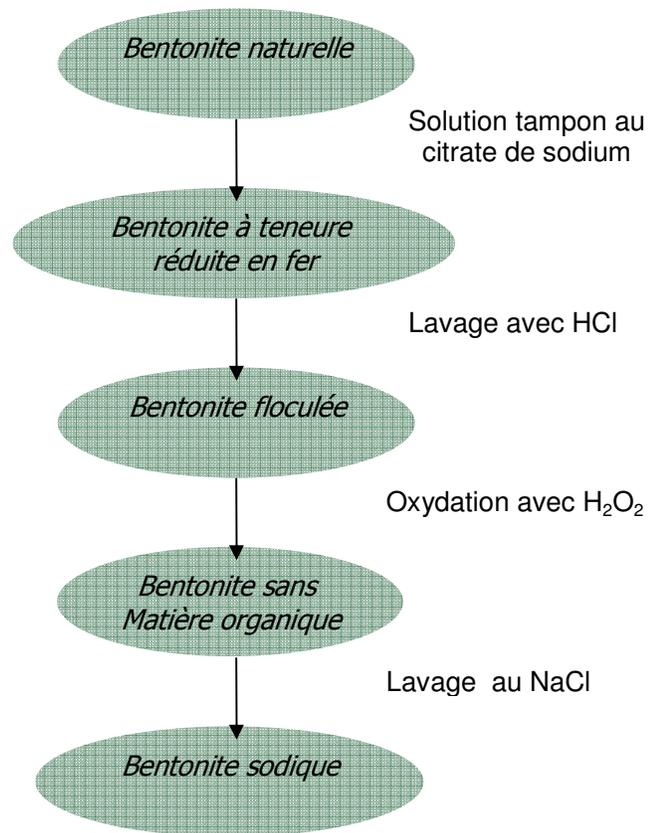


Fig.II.1 : Préparation de la bentonite sodique

## II.3.2 PREPARATION DES EFFLUENTS DE TEINTURE

### II.3.2.1 Détermination de la classe des colorants

Teindre les échantillons de fibres de laine dans des bains de teinture de constitution suivante (en % de la masse de l'échantillon), dans l'appareil universel Linitest de marque Mathis uniprogrammable.

- Colorant rouge BEMACID CL-BN 200

Bain I		Bain II		Bain III	
Colorant	4	Colorant	4	Colorant	4
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3	CH <sub>3</sub> COONa	3,5	CH <sub>3</sub> COOH	3,5

- Colorant jaune BEMACID CM-3R

Bain IV		Bain V		Bain VI	
Colorant	4	Colorant	4	Colorant	4
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3	CH <sub>3</sub> COONa	3,5	CH <sub>3</sub> COOH	3,5

- *Régime de teinture*

Commencer la teinture à la température de 30 à 40 °C, introduire dans le bain l'électrolyte, l'acide ou l'agent acide et traiter dans cette solution pendant 10 à 15 minutes. Ajouter ensuite progressivement dans le bain la solution de colorant pendant 30 à 45 minutes. Chauffer le bain jusqu'à l'ébullition et teindre encore pendant 60 minutes. Le bain ensuite est refroidit et le substrat est soumis à un lavage soigneux.

Le groupe auquel il appartient est déterminé selon leur taux d'épuisement.

### **II.3.2.2 Teinture des fibres de laine**

Après détermination du groupement de colorants et teinture de fibres de laine dans des bains spécifiques aux colorant de I et de III groupe, on récupère l'eau après la teinture pour usage ultérieure (bains résiduaire).

### **II.3.2.3 Détermination de la concentration des effluents de teinture**

La concentration des effluents de teinture est déterminée à partir des courbes d'étalonnage des deux colorants obtenus à l'aide se spectrophotomètre UV/Visible de type UNICAM.UV/VIS dans un domaine de longueurs d'onde du visible (400 à 700 nm).

## **II.3.3 CARACTERISATION PHYSICO- CHIMIQUE DE LA BENTONITE**

La bentonite à analyser doit subir une préparation préliminaire de traitement thermique dans une étuve à 105°C jusqu'à stabilisation de son poids, suivie d'un broyage et d'un tamisage.

### **II.3.3.1 Détermination de la granulométrie**

L'analyse granulométrique a été effectuée au Laboratoire Géologique du CRD/Sonatrach à l'aide d'un granulomètre Laser de marque MASTERSIZER.

Le granulomètre à LASER est un kit comprenant : un analyseur de type (banc long) composé essentiellement d'un générateur de source LASER (He-Ne 633 nm), de différentes lentilles interchangeables relatives aux largeurs de gammes granulométriques (0.05µm à 900µm, 0.5µm à 900µm, 5µm à 3.5mm), 44 détecteurs et une carte électronique d'interface.

Un logiciel MALVERN, caractérisé par la théorie de Mie sur toute la gamme, reproductibilité inférieure à 0.3%, nombre de classes égale à 100 et le temps de mesure minimum, 4 ms.

- principe

La granulométrie laser c'est une technique basée sur la diffraction de la lumière, et qui permet la mesure de la taille des particules, ou plus exactement de leurs rayons, et qui permet également de déterminer leur fréquence statistique en fonction de leur taille.

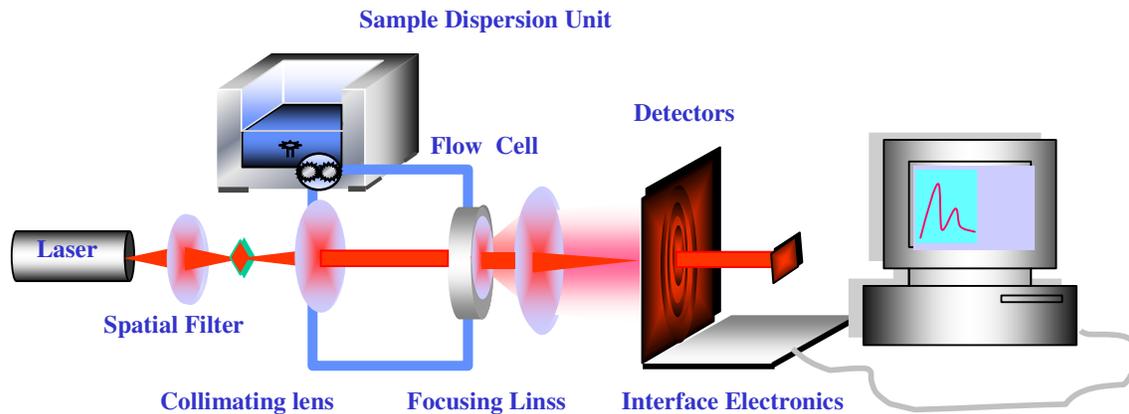


Fig.II.2 : schéma simplifié de granulomètre laser

- Préparation des échantillons.

La préparation de la bentonite brute subit un ensemble d'opérations à savoir :

- le concassage,
- le rinçage jusqu'à l'obtention d'un pH neutre
- la désagrégation avec un pilon en caoutchouc spécial afin de ne pas casser les grains de quartz.

Par contre la bentonite sodique est mise en suspension dans l'eau sous agitation afin d'éviter toute sédimentation des produits denses.

Les résultats se présente sous forme d'échelle logarithmique l'abscisse indique le diamètre des grains en  $\mu\text{m}$ , et l'ordonnée avec deux échelles : l'échelle de droite est relative aux pourcentage des fractions lues sur la courbe de fréquence, l'échelle de gauche, indiquant le pourcentage (%) cumulé.

### II.3.3.2 Détermination de la composition chimique

#### II.3.3.2.1 Détermination de la composition chimique par la fluorescence X

La composition chimique de la bentonite à été déterminée à l'aide de spectromètre à fluorescence X à dispersion d'énergie de marque PHILIPS Magix PW : 24.24.

L'analyse par fluorescence x est une méthode d'analyse élémentaire fondée sur des principes physiques. Elle est basée sur l'excitation des raies spectrales X caractéristiques des atomes; et permet de les identifier et de déterminer leur concentration dans l'échantillon.

#### ▪ Préparation de l'échantillon

Sécher l'échantillon de bentonite dans une étuve à température de  $120^{\circ}\text{C}$  jusqu'à l'obtention d'un poids constant, Prendre 1,5 gr de bentonite ajouter 7,63 gr du fondant le titra borate de lithium ( $\text{Li}_2 \text{B}_4 \text{O}_7$ ). Mélanger bien ces deux substances

dans un creusé en platine, et le mettre dans le four à température de 1000°C pendant 30 min. verser le liquide obtenu dans la coupelle et à température ambiante il devient solide. L'échantillon est prêt à analyser.

### II.3.3.2 Analyse par spectrophotométrie infrarouge

La caractérisation par spectrophotométrie infrarouge à été réalisée au Laboratoire Géologique du CRD/Sonatrach à l'aide d'un spectrophotomètre « Magna IR. 560 E.S.P » sur une gamme d'ondes de 400 à 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Les échantillons ont été conditionnés sous forme de dispersion dans une pastille de KBr (1/200 en poids).

Ce spectrophotomètre MAGNA 560 E.S.P couplé à un micro-ordinateur, utilisant un logiciel interactif d'acquisition et de traitement IRTF.

- *Préparation de l'échantillon*

Les pastilles sont généralement faites d'un mélange de bentonite sous forme de poudre mélangée à du Bromure de potassium (KBr) qui est transparent aux rayonnement IR (à raison de 1-2 %) dans la zone 400  $\text{cm}^{-1}$  à 4000  $\text{cm}^{-1}$ , le tout finement broyé et mélangé dans un mortier de manière à être homogène. Le mélange est pressé sous vide à environ 10 tonnes dans un moule spécial, pour obtenir une pastille transparente.



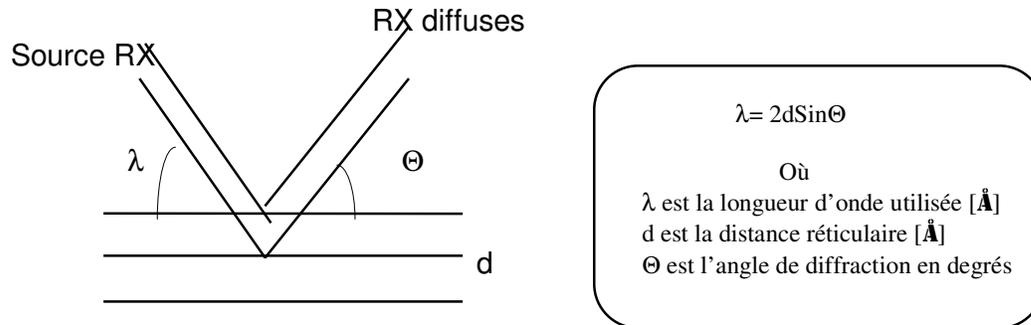
*Fig.II.3: spectrophotomètre infrarouge*

### II.3.3.3 Analyse minéralogique

La diffraction par rayons X a été utilisée dans le but d'identifier les différentes phases de nos échantillons. Cette identification a été réalisée au niveau de Laboratoire Géologique du CRD/Sonatrach à l'aide d'un diffractomètre de marque PHILIPS de type PW 1710. Travaillant sur la radiation monochromatique  $K\alpha_1$  du cuivre (1,5418Å) et comprenant un monochromateur arrière en graphite, un détecteur à gaz proportionnel. La vitesse goniométrique est de 0,035  $^{\circ}2\theta/s$ .

Le domaine observé de l'angle  $2\theta$  est compris entre 2 et 30  $^{\circ}$

La technique d'analyse par diffractométrie des rayons X est utilisée pour la détermination des minéraux non-argileux, et de la fraction fine extraite des roches sédimentaires, représentée par les minéraux argileux. Elle est basée sur la diffusion d'un faisceau de rayons X monochromatique par les plans réticulaires des cristaux contenus dans l'échantillon, selon la loi de BRAGG (voir fig.II.4).



*Fig.II.4 : Illustration de la Loi de Bragg*

#### ▪ Préparation de l'échantillon

L'analyse de l'échantillon nécessite au préalable une préparation particulière. Une prise d'essai de 4gr d'échantillon de bentonite additionné à 1 gr de liant (la cellulose), et mélangé jusqu'à l'obtention d'une poudre homogène. Le montage de la poudre se fait manuellement par simple pression à 100 KN sur un porte échantillon métallique qui sera introduit par la suite dans le diffractomètre de rayons X pour l'analyse.



*Fig.II.5 : le diffractomètre de rayon X*

## II.3.4 ADSORPTION DES COLORANTS ACIDES PAR LES BENTONITES

L'étude du processus d'adsorption des colorants textiles sur la bentonite est essentiellement effectuée pour déterminer les conditions optimales au bout duquel l'équilibre d'adsorption est atteint.

Pour cela deux types de colorant ont été pris en compte:

- Le colorant acide du 1<sup>er</sup> groupe : Rouge BEMACID CL-BN 200;
- Le colorant acide du 3<sup>eme</sup> groupe : Jaune BEMACID CM-3R.

La quantité de colorant adsorbée (x/m) est calculée en déterminant la concentration résiduelle d'équilibre (Ce). Celle-ci est obtenue par spectrophotométrie à 490nm pour le colorant du 1<sup>er</sup> groupe «rouge Bemacid CL-BN 200 » et 430 nm pour Le colorant du 3<sup>eme</sup> groupe « le jaune Bemacid CM-3R ».

### II.3.4.1 Mode opératoire

Dans une série de petits flacons en verre de 50 ml, une masse de 0,1 gr d'adsorbant est mise en contact avec 20ml de solution de colorant à traiter de concentration initiale constante Ci d'un bain épuisé après teinture. La concentration initiale est de 0,0030 g/l et un pH de 2,7 pour le colorant Rouge Bemacid CL-BN 200, et 0,0264 g/l et un pH de 4,11 pour le colorant jaune Bemacid CM-3R. A la température ambiante ces flacons fermés sont agités à 240 rpm pendant un certain temps par un agitateur magnétique. Les deux phases sont séparées par centrifugation à 9000rotation par minute pendant 15 minutes dans une centrifugeuse modèle SIGMA 3K30. Le surnageant ainsi obtenu est ensuite analysé par spectrophotomètre UV/VIS de type UNICAM.UV/VIS pour déterminer la concentration résiduelle à l'équilibre (Ce) d'adsorbât.

### II.3.4.2 Calcul des quantités adsorbées

La relation suivante (9) permet de calculer, pour chaque prélèvement, la quantité de colorant adsorbé exprimée en mg de soluté par gramme de solide adsorbant.

$$X = (Ci - Ce) \frac{V}{m} \quad (9)$$

Où:

- Ci : concentration initiale (g/l);
- Ce : concentration résiduelle à l'équilibre (g/l); obtenue à partir de la courbe d'étalonnage (voir fig.1 et fig.2 en annexe B)
- V : Volume de la solution à traiter (ml);
- m : Poids de l'adsorbant (g);
- X : Quantité de colorant adsorbée par unité de masse de l'adsorbant (exprimée en mg/g de bentonite)

### II.3.5 DETERMINATION DE LA DBO<sub>5</sub>

La demande biochimique en oxygène (DBO<sub>5</sub>), c'est la quantité d'oxygène consommée dans les conditions d'essai, c'est à dire après incubation durant 5 jours, à 20°C dans l'obscurité par certaines matières présentes dans l'eau, principalement pour assurer leur dégradation par voie biologique.

L'analyse de la (DBO<sub>5</sub>) est réalisée a l'aide de DBO mètre de marque OXITOP BOX 6 poste agités 340 x 212 x 282 mm/6,5 g/l.

Placer l'échantillon sous agitation dans un flacon incubateur, hermétiquement fermé relié à un manomètre à mercure lors de la biodégradation des matières organiques, les microorganismes consomment de l'oxygène contenu dans l'air du flacon, et libèrent de gaz carbonique CO<sub>2</sub>, de ce fait la pression au dessus de l'échantillon diminue et on pourra lire cette dépression sur l'échelle manométrique, le CO<sub>2</sub> libéré est absorbé par la soude.

Expression des résultats : La valeur de la DBO<sub>5</sub> (au bout de 5 jours) = valeur lue \* le facteur (mg/l).

Tableau N°.II.1 : Intervalle de mesure de la DBO<sub>5</sub> en fonction du volume d'échantillon

Intervalle de mesure	Volume de l'échantillon (ml)	Facteur f
0 - 40	432	1
0 - 80	365	2
0 - 200	250	5
0 - 400	164	10
0 - 800	97	20
0 - 2000	43,5	50

# *PARTIE EXPERIMENTALE*

### III.PARTIE EXPERIMENTALE

#### III.1 PREPARATION DES EFFLUENTS DE TEINTURE

##### III.1.1 Détermination de la classe des colorants

Dans cette partie du travail, on a déterminé la classe de colorants et les groupes auxquels ils appartiennent, en se basant sur l'épuisement des colorants dans différents bains (neutre, fortement ou faiblement acide). Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau N°.III.1

Tableau N°.III.1 : caractéristiques des colorants et leurs appartenances

Colorant Caractéristiques	Colorant rouge Bemacid CL BN200			Colorant jaune Bemacid CM-3R		
	Groupe I	Groupe II	Groupe III	Groupe I	Groupe II	Groupe III
Recette (en % de la masse de l'échantillon)	Colorant : 4 NaSO <sub>4</sub> : 10 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 3	Colorant : 4 NaSO <sub>4</sub> : 10 CH <sub>3</sub> COOH :3,5	Colorant : 4 NaSO <sub>4</sub> : 10 CH <sub>3</sub> COONa:3,5	Colorant : 4 NaSO <sub>4</sub> : 10 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : 3	Colorant : 4 NaSO <sub>4</sub> : 10 CH <sub>3</sub> COOH :3,5	Colorant : 4 NaSO <sub>4</sub> : 10 CH <sub>3</sub> COONa :3,5
Epuisement de colorant	Bon	Faible	Faible	Faible	Faible	Bon
Appartenance	Appartient aux colorant du premier groupe à pouvoir égalisant élevé			Appartient aux colorant du troisième groupe à pouvoir égalisant faible.		

##### III.1.2 Détermination de la concentration des effluents de teinture

Les effluents de teinture constituent les restes des bains après teinture des échantillons de laine selon le régime technologique décrit dans le chapitre II.3.2.1. La concentration des bains résiduels est déterminée à partir de la courbe d'étalonnage de ces deux colorants (voir fig. N°1 et fig. N°2 en annexe A).

- 0,0030 g/l pour le colorant Rouge BEMACID CL-BN 200
- 0,0264 g/l pour le colorant Jaune BEMACID CM-3R

#### III.2 PREPARATION DE L'ADSORBANT

La bentonite sodique est obtenue selon la technique décrite dans la partie II.3.1.

#### III.3 CARACTERISATION PHYSICO CHIMIQUE DE LA BENTONITE

##### III.3.1 Détermination de la granulométrie

Les résultats obtenus sont présentés sous forme des courbes de distribution granulométrique qui sont présentées dans la fig.III.1 et la fig.III.2 et les tableaux N°.III.2 et N°.III.3.

A partir de ces résultats on constate que le diamètre de particules à 10%, 50%, 90 % ainsi que le diamètre moyen de la bentonite sodique est inférieur a celui de la bentonite brute (voir tableau N°.III.2 et N°.III.3). Ceci est dû à la purification de la bentonite par élimination de grandes particules en particulier les feldspaths et le quartz.

On remarque que la courbe de distribution de la bentonite sodique est plus large que la bentonite brute. Ceci est expliqué par la présence d'une large gamme des particules de tailles différentes mais avec des diamètres proches (voir fig.III.1 et fig.III.2).

Aussi nous remarquons que la taille des particules inférieures à 2,28µm passe de 8,56% pour la bentonite brute à 40,95% pour la bentonite sodique. Ceci est dû à la purification de la bentonite.

Tableau N°.III.2 : Granulométrie de la bentonite brute

Result: Analysis Table							
ID: Montmorilloite brute		Run No: 1		Measured: 14/6/105 18:20			
File: KHOUDJ		Rec. No: 12		Analysed: 14/6/105 18:20			
Path: A:\		Source: Analysed					
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm		Sampler: MS17		Obs: 8.0 %	
Presentation: 30HD		Analysis: Polydisperse		Residual: 0.433 %			
Modifications: None							
Conc. = 0.0078 %Vol		Density = 1.000 g/cm <sup>3</sup>		S.S.A. = 1.2437 m <sup>2</sup> /g			
Distribution: Volume		D[4, 3] = 26.87 µm		D[3, 2] = 4.82 µm			
D(v, 0.1) = 2.62 µm		D(v, 0.5) = 21.31 µm		D(v, 0.9) = 59.41 µm			
Span = 2.665E+00		Uniformity = 8.556E-01					
Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%	Size (µm)	Volume Under%
0.05	0.00	0.67	2.65	9.00	28.74	120.67	99.77
0.06	0.00	0.78	2.95	10.48	31.74	140.58	100.00
0.07	0.00	0.91	3.32	12.21	34.97	163.77	100.00
0.08	0.01	1.06	3.80	14.22	38.51	190.80	100.00
0.09	0.02	1.24	4.40	16.57	42.44	222.28	100.00
0.11	0.04	1.44	5.16	19.31	46.86	258.95	100.00
0.13	0.08	1.68	6.10	22.49	51.81	301.68	100.00
0.15	0.14	1.95	7.23	26.20	57.32	351.46	100.00
0.17	0.24	2.28	8.56	30.53	63.37	409.45	100.00
0.20	0.38	2.65	10.11	35.56	69.96	477.01	100.00
0.23	0.59	3.09	11.86	41.43	76.58	555.71	100.00
0.27	0.86	3.60	13.80	48.27	82.82	647.41	100.00
0.31	1.17	4.19	15.92	56.23	88.28	754.23	100.00
0.36	1.49	4.88	18.20	65.51	92.68	878.67	100.00
0.42	1.80	5.69	20.64	76.32	95.89		
0.49	2.09	6.63	23.21	88.91	97.99		
0.58	2.37	7.72	25.90	103.58	99.19		

Tableau N°.III.3 : Granulométrie de la bentonite brute

ID: Bentonite sodique		Run No: 6		Measured: 26/12/2005 12:01			
File: TOUILEB		Rec. No: 1		Analysed: 26/12/2005 12:01			
Path: D:\SIZERS\DATA\				Source: Analysed			
Range: 300RF mm		Beam: 2.40 mm		Sampler: MS17			
Presentation: 30HD		Analysis: Polydisperse		Obs': 21.1 %			
Modifications: None				Residual: 0.861 %			
Conc. = 0.0072 %\vol		Density = 1.000 g/cm <sup>3</sup>		S.S.A= 6.0144 m <sup>2</sup> /g			
Distribution: \volume		D[4, 3] = 6.95 um		D[3, 2] = 1.00 um			
D(v, 0.1) = 0.33 um		D(v, 0.5) = 3.58 um		D(v, 0.9) = 16.97 um			
Span = 4.648E+00		Uniformity = 1.611E+00					
Size (um)	\volume Under%	Size (um)	\volume Under%	Size (um)	\volume Under%	Size (um)	\volume Under%
0.05	0.00	0.67	21.97	9.00	76.02	120.67	100.00
0.06	0.01	0.78	24.46	10.48	80.15	140.58	100.00
0.07	0.04	0.91	26.86	12.21	83.83	163.77	100.00
0.08	0.10	1.06	29.20	14.22	86.98	190.80	100.00
0.09	0.20	1.24	31.49	16.57	89.63	222.28	100.00
0.11	0.39	1.44	33.77	19.31	91.81	258.95	100.00
0.13	0.71	1.68	36.07	22.49	93.58	301.68	100.00
0.15	1.22	1.95	38.44	26.20	95.03	351.46	100.00
0.17	2.00	2.28	40.95	30.53	96.21	409.45	100.00
0.20	3.14	2.65	43.70	35.56	97.21	477.01	100.00
0.23	4.68	3.09	46.74	41.43	98.05	555.71	100.00
0.27	6.66	3.60	50.12	48.27	98.74	647.41	100.00
0.31	8.99	4.19	53.87	56.23	99.28	754.23	100.00
0.36	11.53	4.88	57.94	65.51	99.67	878.67	100.00
0.42	14.13	5.69	62.29	76.32	99.91		
0.49	16.76	6.63	66.84	88.91	100.00		
0.58	19.40	7.72	71.53	103.58	100.00		

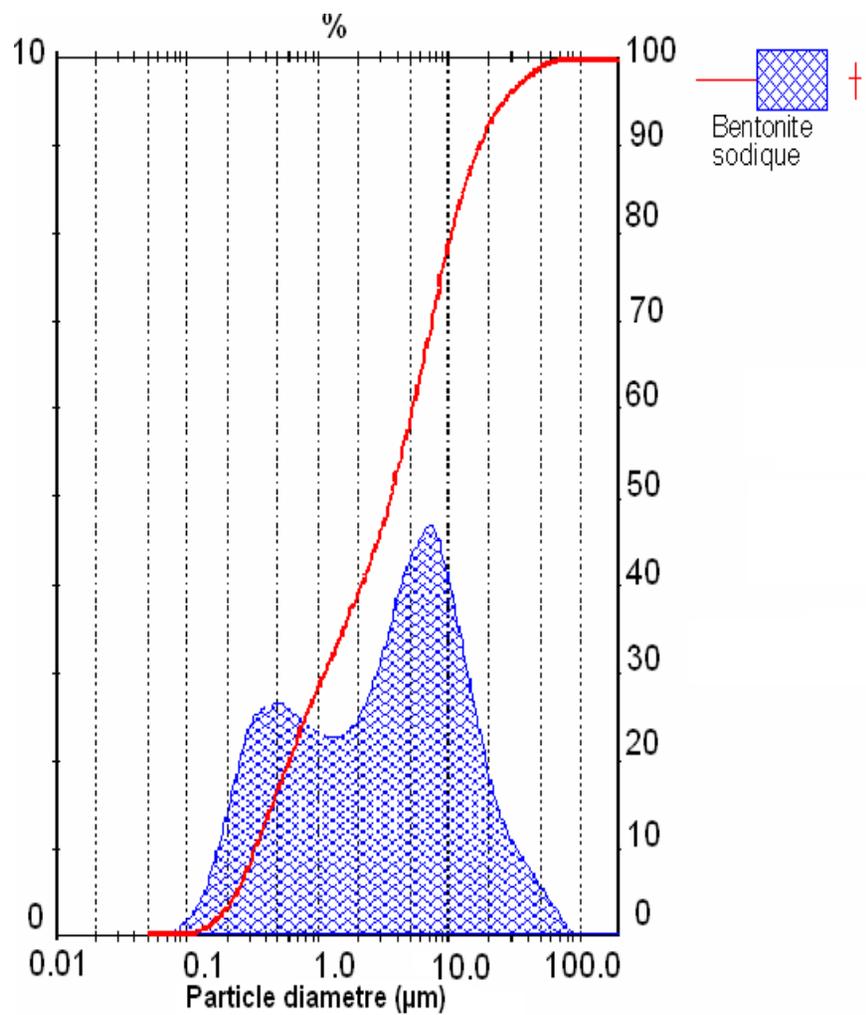


Fig.III.1 : Courbe de distribution granulométrique de la bentonite sodique

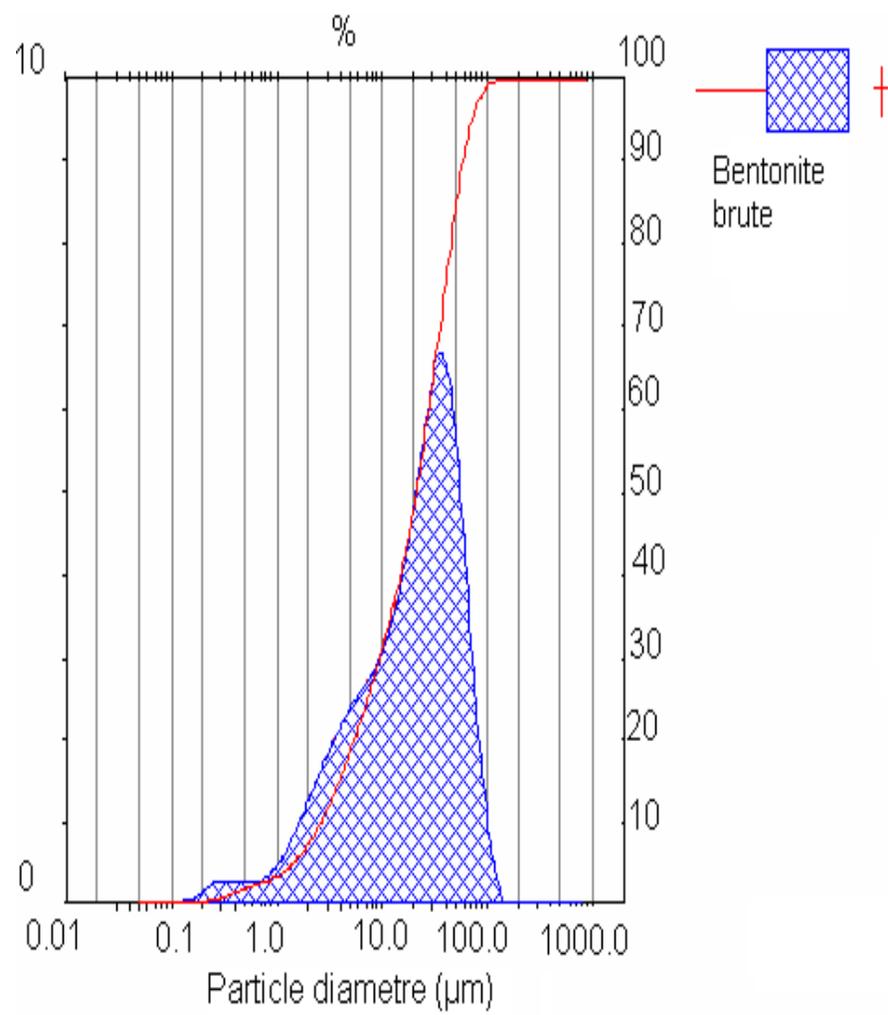


Fig.III.2 : Courbe de distribution granulométrique de la bentonite brute

### III.3.2 Détermination de la composition chimique

#### III.3.2.1 Détermination de la composition chimique par la fluorescence X

L'analyse par fluorescence aux rayons X a donné les résultats qui sont portés sur le tableau N°.III.4

Le tableau N°.III.4 : La Composition chimique de la bentonite

Oxydes	oxydes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Perte au feu
Bentonites										
Bentonite brute	%	62,53	20,65	2,11	0,62	3,82	0,09	0,67	1,84	7,61
Bentonite sodique	%	67,24	17,53	1,38	0,30	2,74	0,09	0,67	4,8	5,10

La composition chimique de la bentonite brute consignée au tableau N°.III.4, révèle son caractère montmorillonitique ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,03$ ) pour la bentonite brute ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,83$ ) pour la bentonite sodique [1]. Cette caractéristique permet de la classer parmi les argiles gonflantes, propriété très importante dans le cas de l'utilisation de l'argile comme adsorbant.

L'examen des résultats du tableau N°.III.4 qui donne à la fois la composition chimique et les cations échangeables fait ressortir :

- Une augmentation de la teneur en silice qui passe de 62,53 pour la bentonite brute à 67,24 % pour la bentonite sodique.
- une diminution de l'alumine dont la teneur est ramenée de 20,65 à 17,53 qui est due à l'élimination de l'aluminium au cours de la purification.
- Une diminution de la teneur en CaO, MgO, Fe<sub>2</sub>O qui est due aux cations échangeables au cours de la purification (remplacement par les cations de Na<sup>+</sup>).
- Une augmentation de la teneur en sodium et la diminution de la teneur de magnésium et de calcium et de fer prouvent clairement l'incorporation de sodium lors de la purification de la bentonite.
- Une diminution de perte au feu de la bentonite sodique par rapport à la bentonite brute ceci est due essentiellement à l'élimination de la matière organique lors de la purification.

#### III.3.2.2 Détermination de la composition chimique par spectrophotométrie IR

Les spectres IRTF obtenus sont présentés sur la fig.III.3

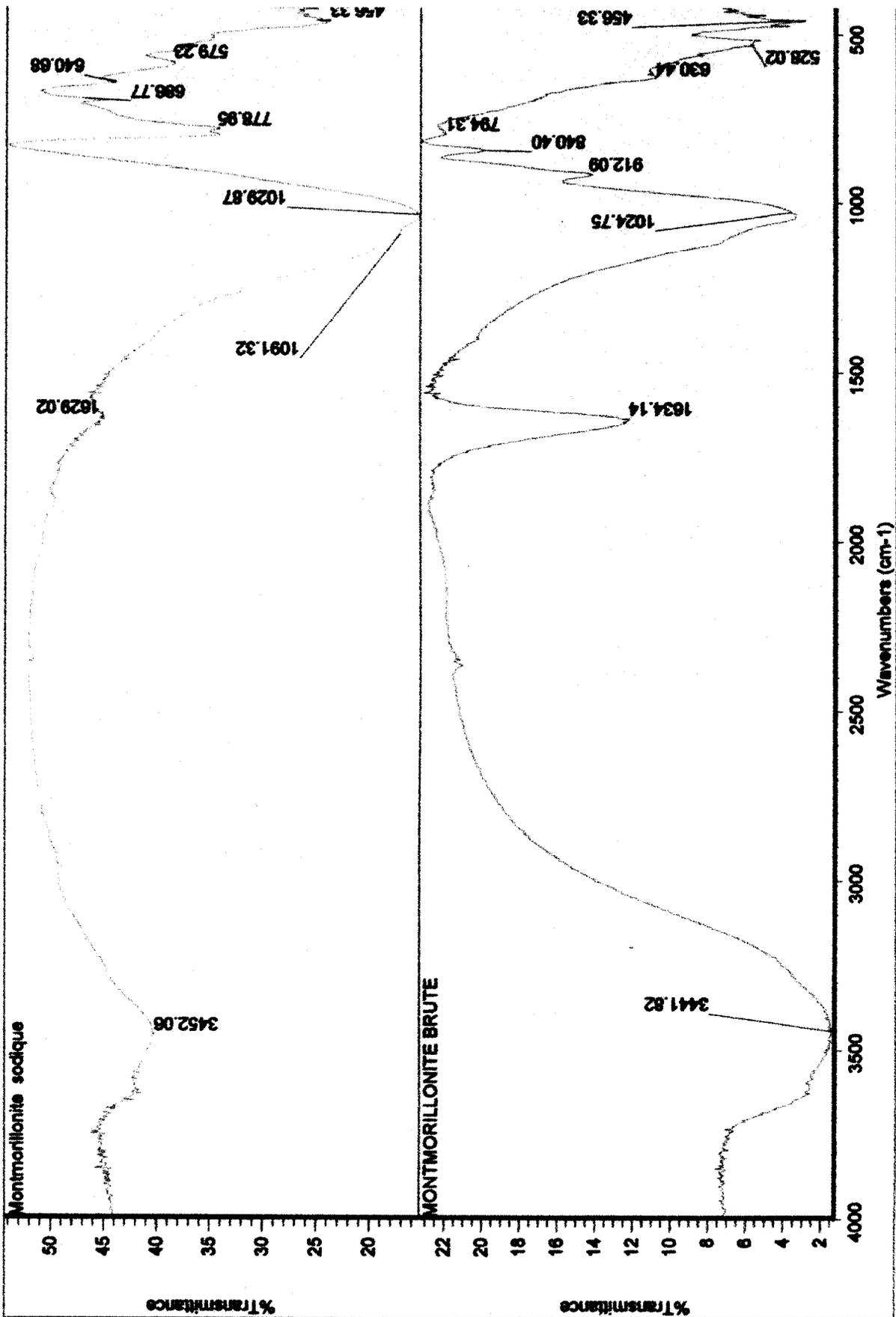


Fig.III.3 : Spectre infrarouge de la bentonite brute et sodique

L'examen de ces spectres fait apparaître des bandes d'absorption que nous présentons comme suit :

- *Groupements OH :*

Les spectres montrent deux bandes d'absorption situées entre 3200-3700  $\text{cm}^{-1}$  et entre 1600-1700  $\text{cm}^{-1}$ .

- la bande qui s'étale entre 1600-1700  $\text{cm}^{-1}$  est attribuée aux vibrations de valence du groupement OH de l'eau de constitution plus les vibrations de liaison de l'eau adsorbée.

- la bande centrée vers 1634  $\text{cm}^{-1}$  pour la bentonite brute et 1629  $\text{cm}^{-1}$  pour la bentonite sodique est attribuée aux vibrations de déformation des molécules  $\text{H}_2\text{O}$  adsorbées entre les feuillets.

- la bande située dans l'intervalle 3200-3700  $\text{cm}^{-1}$ , avec des épaulements à 3620 et 3300  $\text{cm}^{-1}$  caractérisant la montmorillonite, correspond aux vibrations d'élongation des groupements OH de la couche octaédrique coordonnée soit à 1 Al + 1 Mg (3640  $\text{cm}^{-1}$ ) soit à 2 Al (3620).

- les bandes 3452,06 et 3441,82 des bentonites brute et sodique caractérisent les vibrations de déformation des molécules d'eau.

- *Liaisons Si-O*

Les liaisons Si-O sont caractérisées par les bandes d'absorption suivantes:

- la bande intense située entre 900-1100  $\text{cm}^{-1}$  et centrée vers 1024  $\text{cm}^{-1}$  correspond aux vibrations de valence de la liaison Si-O. Dans la bentonite sodique, elle est située vers 1029  $\text{cm}^{-1}$

- les bandes situées à 528, 456  $\text{cm}^{-1}$  sont attribuées respectivement aux vibrations de déformation des liaisons Si-O-Al et Si-O-Mg.

### **III.3.3 analyse minéralogique**

Les résultats obtenus sont présentés dans la Fig.III.4 et Fig.III.5.

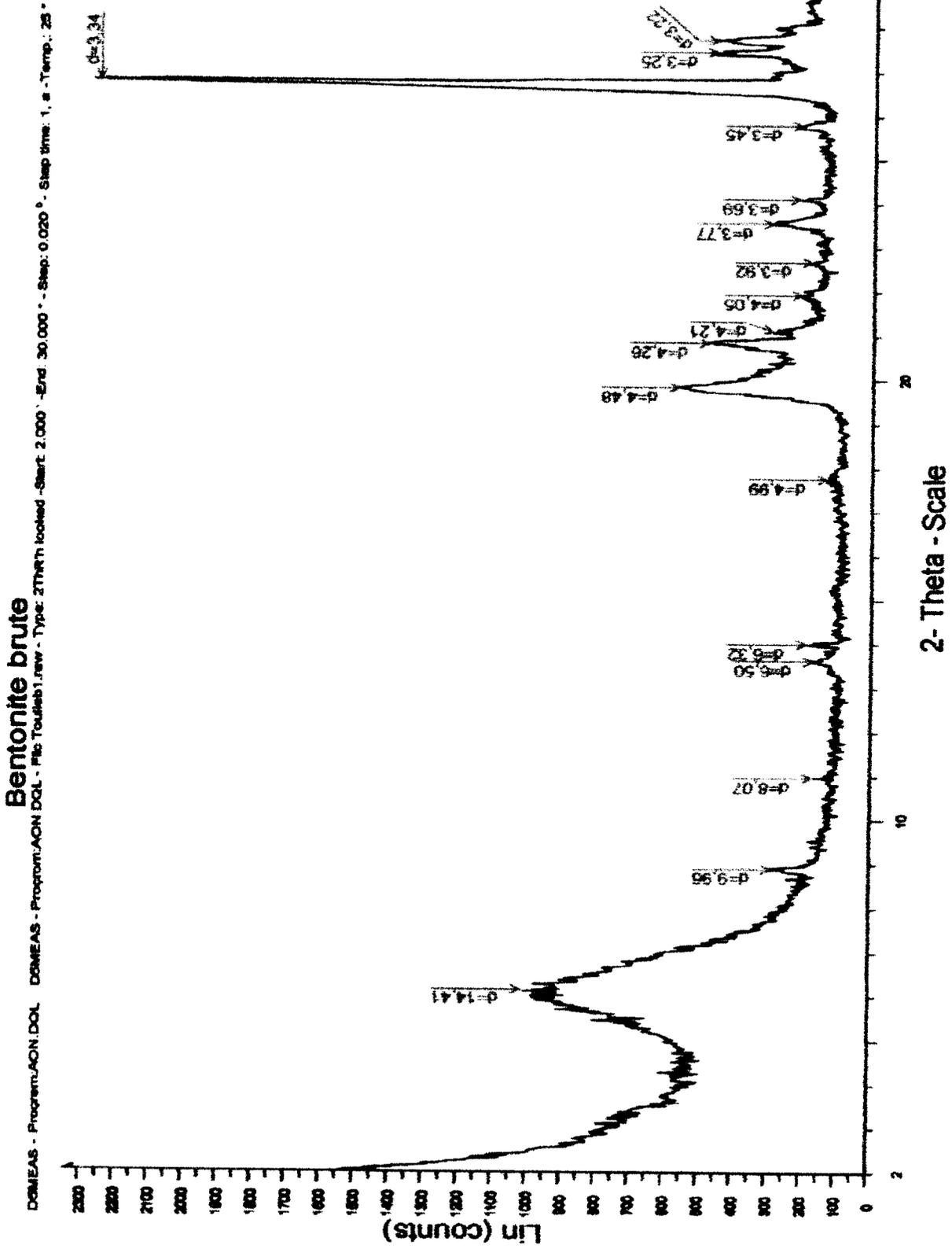


Fig.III.4 : Le diffractogramme de la bentonite brute

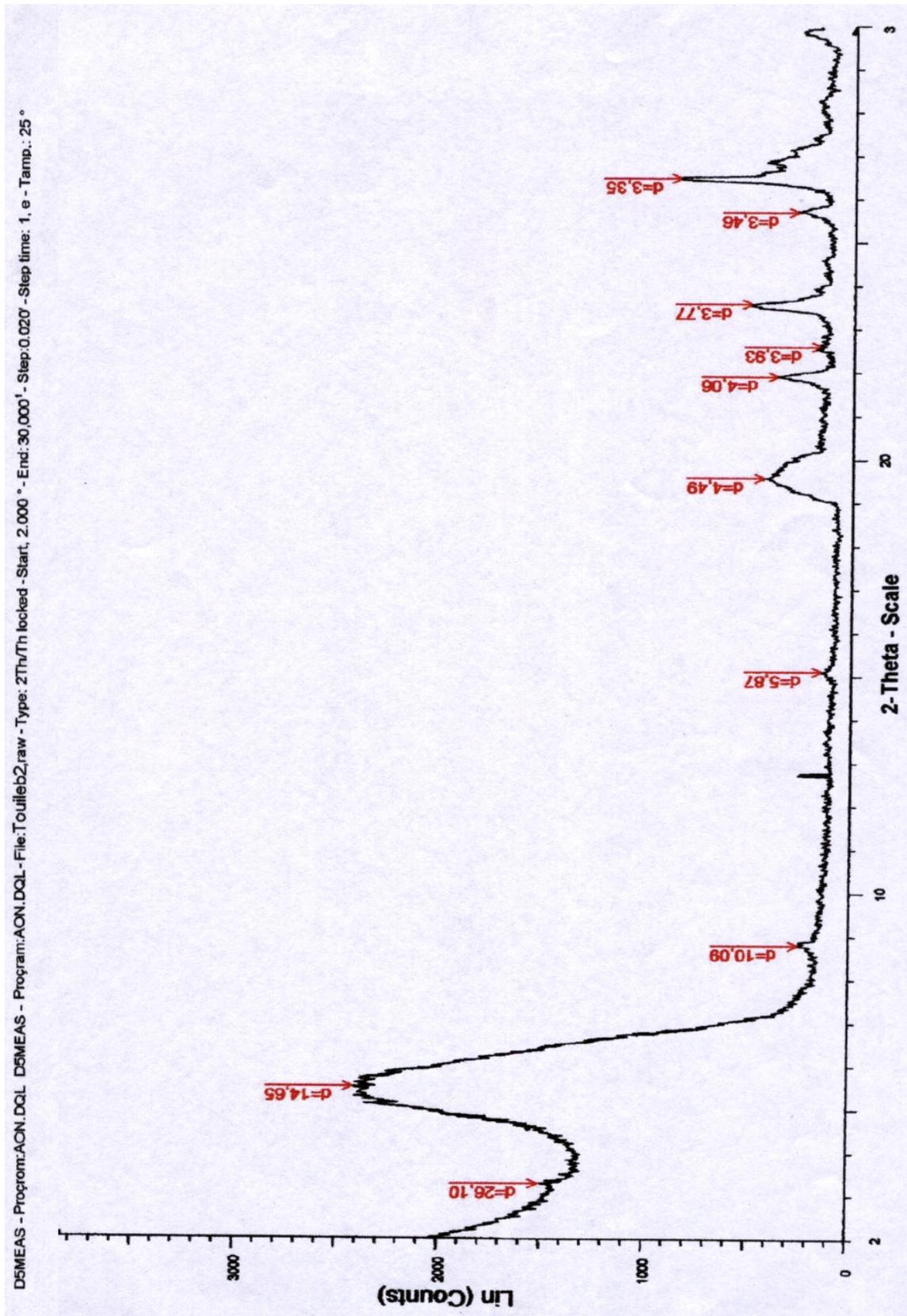


Fig.III.5 : Le diffractogramme de la bentonite sodique

L'analyse aux rayons X a donné les résultats consignés dans le tableau N°.III.5

Tableau N°.III.5 : résultats de l'analyse minéralogique des bentonites

	montmorillonite		illite		quartz		feldspaths	
	2 $\theta$ (°)	d (Å)	2 $\theta$ (°)	d (Å)	2 $\theta$ (°)	d (Å)	2 $\theta$ (°)	d (Å)
Bentonite brute	6,20	14,41	9	9,96	20,9	4,26	13,6	6,50
	19,70	4,48	19,70	4,48	26,6	3,34	27,5	3,25
Bentonite sodique	5,6	14,65	8,8	10,09	-	-	-	-
	19,6	4,49	19,6	4,49	26,6	3,35	-	-

Les diffractogrammes des bentonites brute et sodique présentés sur les fig.III.4 et fig.III.5 révèlent la présence des minéraux argileux et de phases cristallines essentiellement sous forme de tectosilicates (quartz, feldspath,...).

L'examen de ces spectres confirme réellement une bonne purification de la bentonite avec:

- une disparition de certaines raies caractéristiques des phases cristallines sous forme d'impuretés, particulièrement celles du feldspaths située à ( $2\theta = 13,6^\circ$ ,  $2\theta = 27,5^\circ$ ) et celle du quartz ( $2\theta = 20,9^\circ$ ) avec une diminution de l'intensité correspondant à celle du quartz fractionné ( $2\theta = 26,6^\circ$ ).
- une intensification de raie caractérisant la montmorillonite ( $2\theta = 6,1$ ).

### III.4 ADSORPTION DES COLORANTS ACIDES PAR LES BENTONITES

Dans cette partie de travail, nous avons étudié l'influence de différents paramètres sur l'adsorption des colorants acides (rouge Bemacide CL-BN200 et le jaune Bemacid CM-3R) par les bentonites brute et sodique à savoir : le temps de contact, le pH et la température.

#### III.4.1 Influence du temps de contact

Pour l'étude de ce paramètre on a réalisé l'adsorption à différents temps de contact, les temps considérés sont de 30 minutes à 360 minutes.

Les résultats obtenus sont portés sur la fig.III.6 et la fig.III.7 et regroupés dans les tableaux N°1 et N°2 en annexe B.

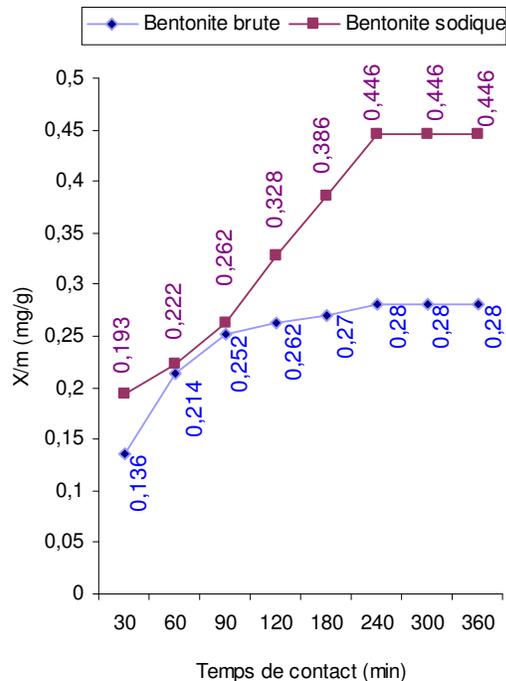
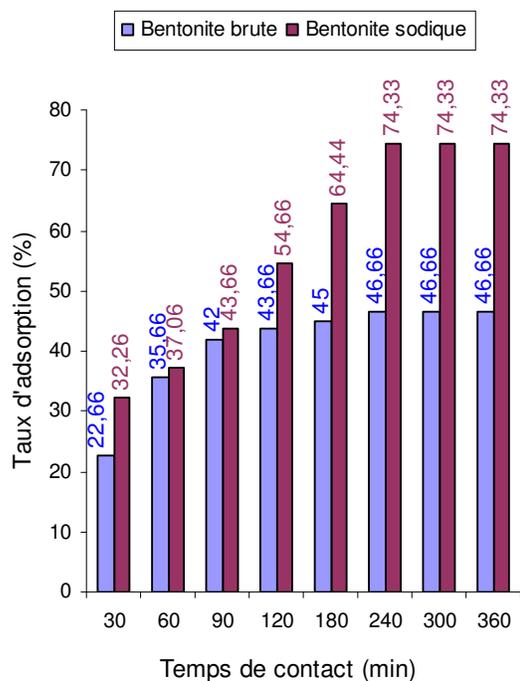


Fig.III.6 : Influence du temps de contact sur l'adsorption du colorant rouge Bemacid CL-BN200 par les bentonites brute et sodique

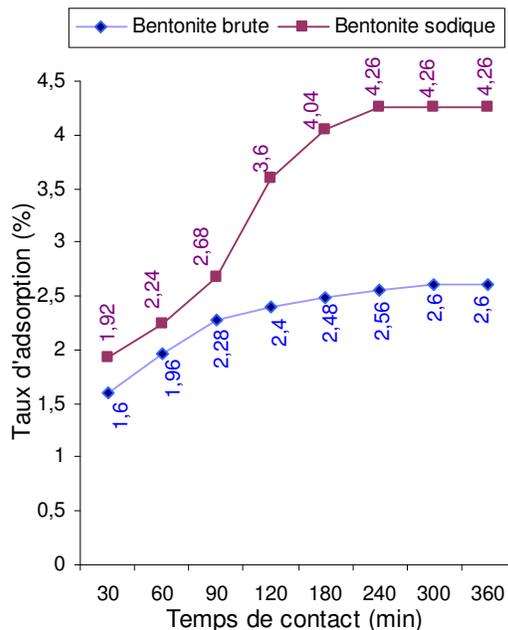
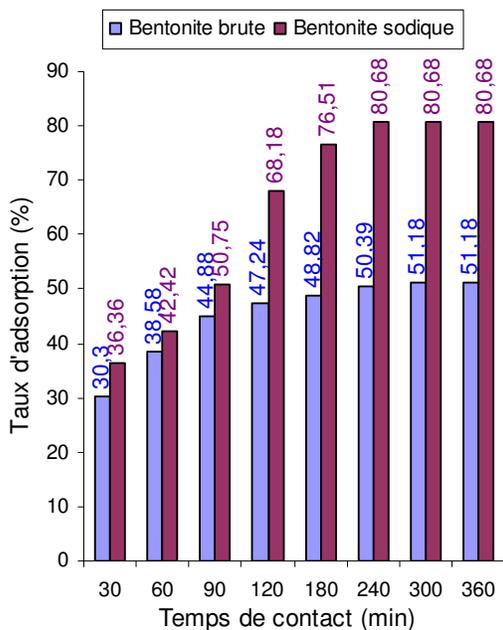


Fig.III.7 : Influence du temps de contact sur l'adsorption du colorant jaune Bemacid CM-3R par les bentonites brute et sodique

L'analyse de ces données montre que La quantité de colorant adsorbée augmente en règle générale avec le temps. Toutefois, cette influence ne se manifeste pas avec la même intensité sur les diverses parties de la courbe.

L'élévation du temps de contact provoque l'augmentation de l'adsorption des colorants pour atteindre un maximum de 46,66% et 74,33% pour le colorant rouge et 50,39% et 80,68% pour le colorant jaune respectivement par la bentonite brute et sodique au bout de 4h.

L'adsorption des colorants sur la bentonite sodique est relativement élevée par rapport à celui de la bentonite brute. Ceci est dû à l'hydratation du cation de sodium qui provoque la dispersion de la bentonite [60] et l'écartement des feuillets ce qui facilite la pénétration de l'eau dans l'espace interfoliaire de la bentonite en favorisant le phénomène d'échange entre la bentonite et la solution colorée.

L'adsorption est meilleure pour le colorant jaune que pour le colorant rouge, ce qui signifie que l'adsorption est d'autant plus facile que le colorant est moins soluble [11].

### III.4.2 Influence du pH

L'étude de l'adsorption des colorants par la bentonite est effectuée à des valeurs de pH comprises entre 2 et 8. Le choix de cette gamme de pH est effectué afin d'examiner l'évolution de l'adsorption du colorant en fonction du pH. Ce dernier est ajusté par l'hydroxyde de sodium (NaOH à 0,1N) ou l'acide chlorhydrique (HCl à 0,1N). Son évolution est contrôlée en fonction du temps

Les résultats sont représentés graphiquement sur les fig.III.8 et fig.III.9 et regroupés dans les tableaux N°3 et N°4 en annexe B.

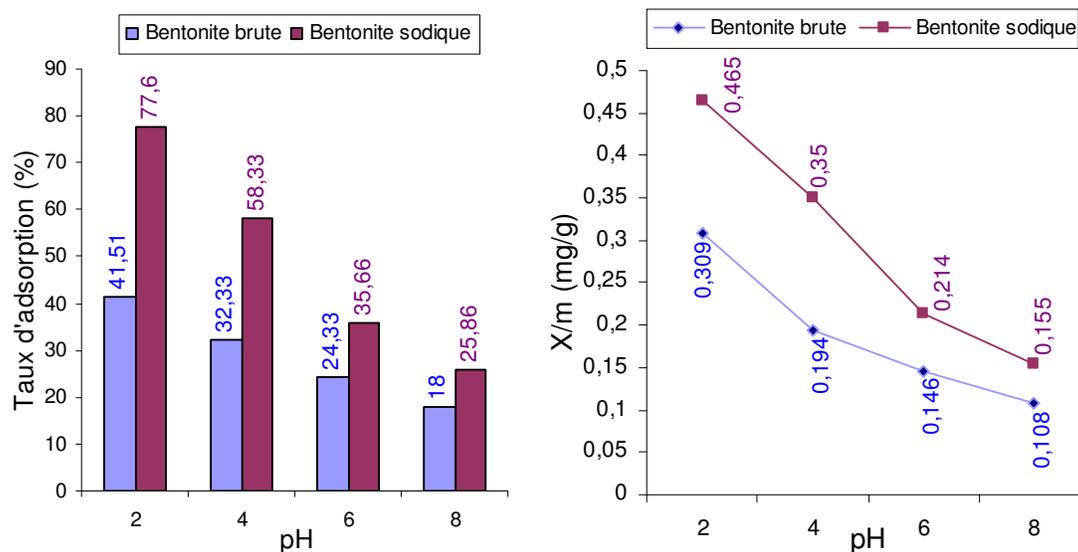


Fig.III.8 : Influence du pH sur l'adsorption du colorant rouge Bemacid CL-BN200 par les bentonites brute et sodique.

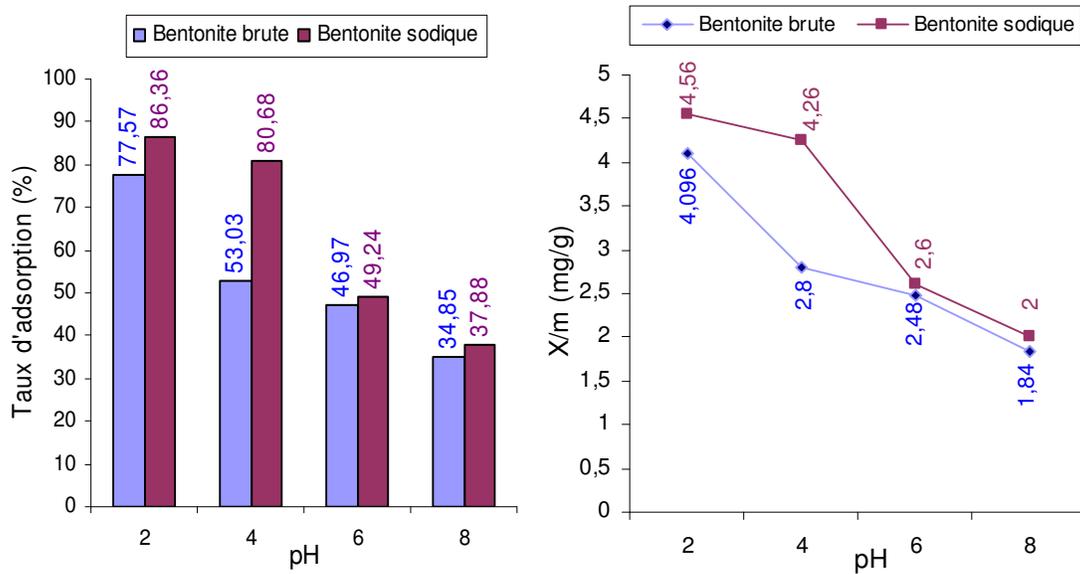


Fig.III.9 : Influence du pH sur l'adsorption du colorant jaune Bemacid CM-3R par les bentonites brute et sodique

L'analyse de ces données montre que l'augmentation de l'acidité du milieu provoque une augmentation de l'adsorption des colorants par la bentonite brute et sodique.

Le taux d'adsorption passe de 18% et 25,25% au pH=8 à 41% et 77,60% au pH=2 pour le colorant rouge, et de 34,85% et 37,88% au pH=8 à 77,57% et 86,36% au pH=2 pour le colorant jaune respectivement par la bentonite brute et sodique.

Ceci est dû à l'influence du cation  $H^+$  sur la micelle de la bentonite sodique (voir fig.III.10) qui provoque la fixation du colorant chargé négativement.

### III.4.3 Influence de la température.

Dans cette partie d'étude nous avons travaillé à trois températures : 19°C, 30°C et 50°C et nous avons analysé leurs influence sur l'adsorption des colorants par les bentonites.

Les résultats obtenus sont portés sur les fig.III.11 et fig.III.12 et dans les tableaux N°5 et N°6 en annexe B.

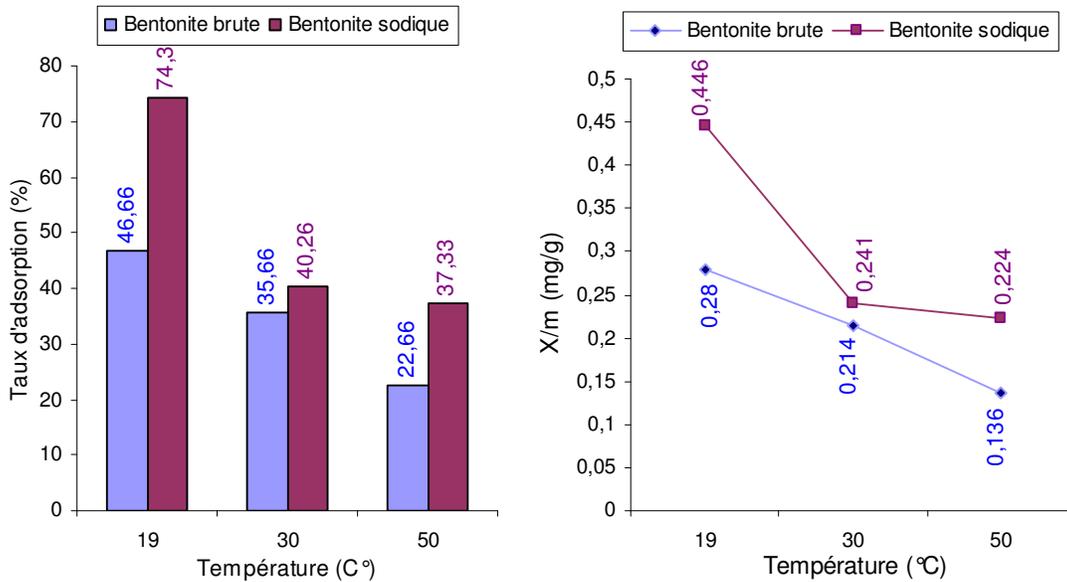


Fig.III.11 : Influence de la température sur l'adsorption du colorant rouge Bemacid CL-BN200 par les bentonites brute et sodique

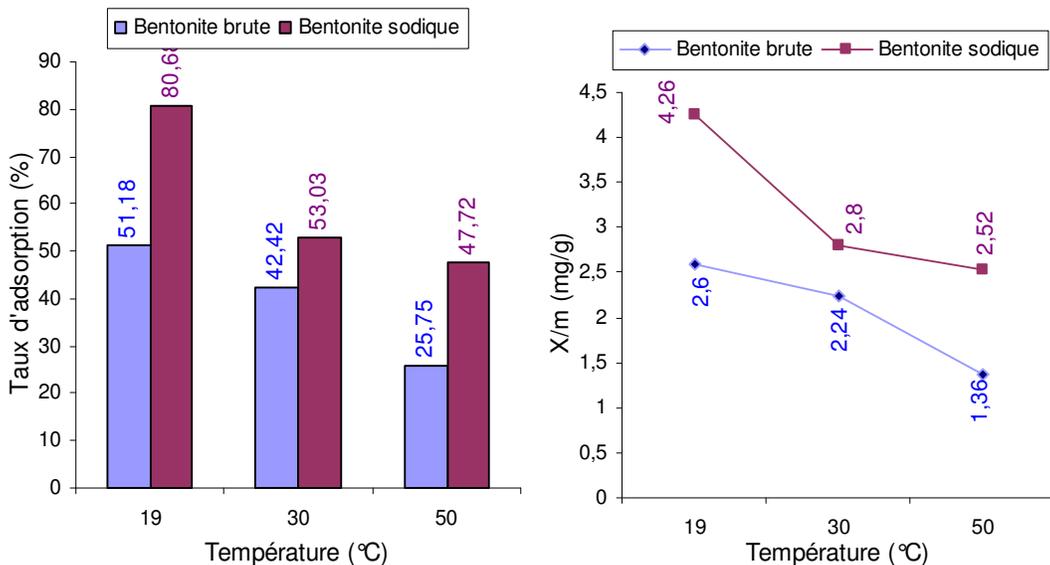


Fig.III.12 : Influence de la température sur l'adsorption du colorant jaune Bemacid CM-3R par les bentonites brute et sodique.

Les faibles températures favorisent la fixation des colorants sur les deux bentonites, par contre au hautes températures nous remarquons la diminution de l'adsorption du colorant dû au phénomène adsorption/ désorption. Ce qui suppose qu'on est en présence d'un phénomène exothermique [61].

Les forces d'attraction entre la bentonite et le colorant sont des forces de VAN DER WAALS et les liaisons d'hydrogène, ces dernières jouent un rôle important dans l'adsorption des composés neutres et faiblement ioniques de masses moléculaires élevées [11].

### III.4.4 Analyse de l'adsorption par rayons X

L'examen des raies de diffractogrammes des deux bentonites brute et sodique montre un déplacement important des équidistances de la raie  $d_{(001)}$ . L'équidistance de la raie  $d_{(001)}$  passe de 14,41 Å et 15,1820 Å pour la bentonite brute et 14,65 Å à 16,85 Å avant et après adsorption respectivement pour la bentonite brute et sodique (voir Fig.III.13 et Fig.III.14).

Ceci confirme l'écartement des feuillets de bentonite grâce à l'adsorption des colorants.

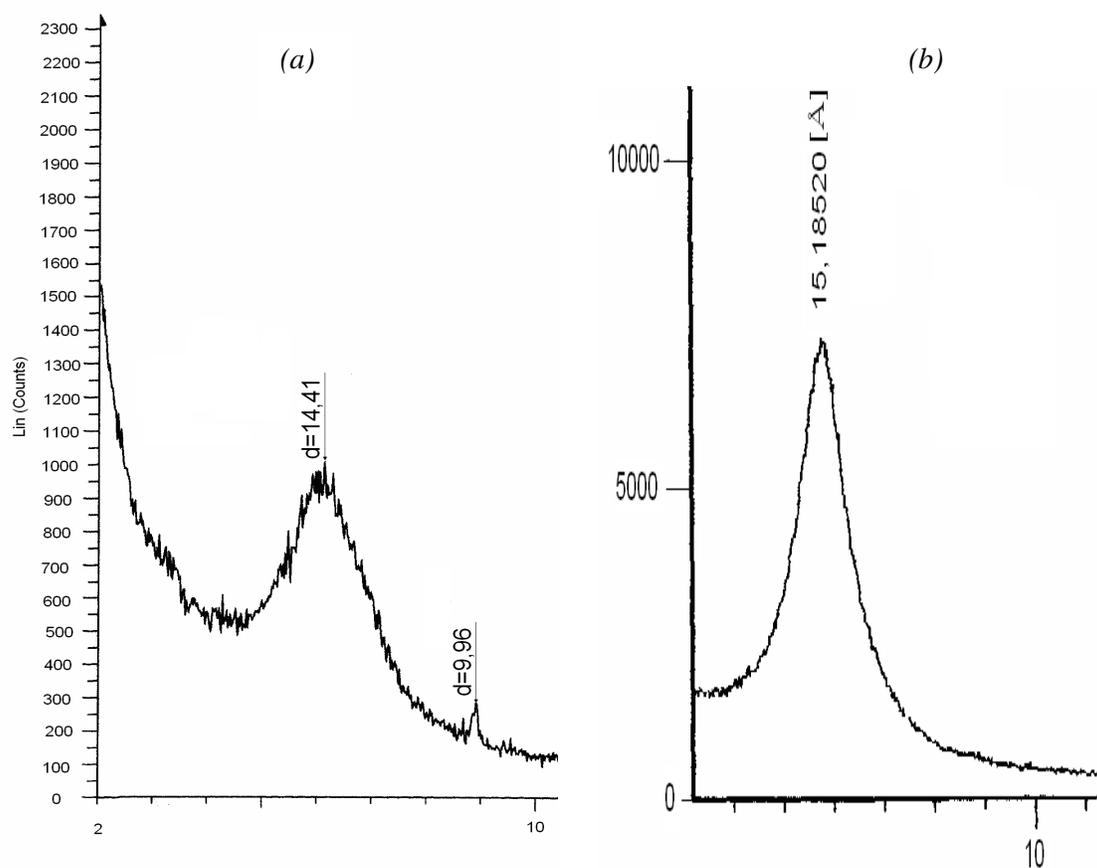


Fig.III.13 : Raies  $d_{(001)}$  des diffractogrammes de bentonite brute avant adsorption (a) et après adsorption (b) du colorant jaune Bemacid.

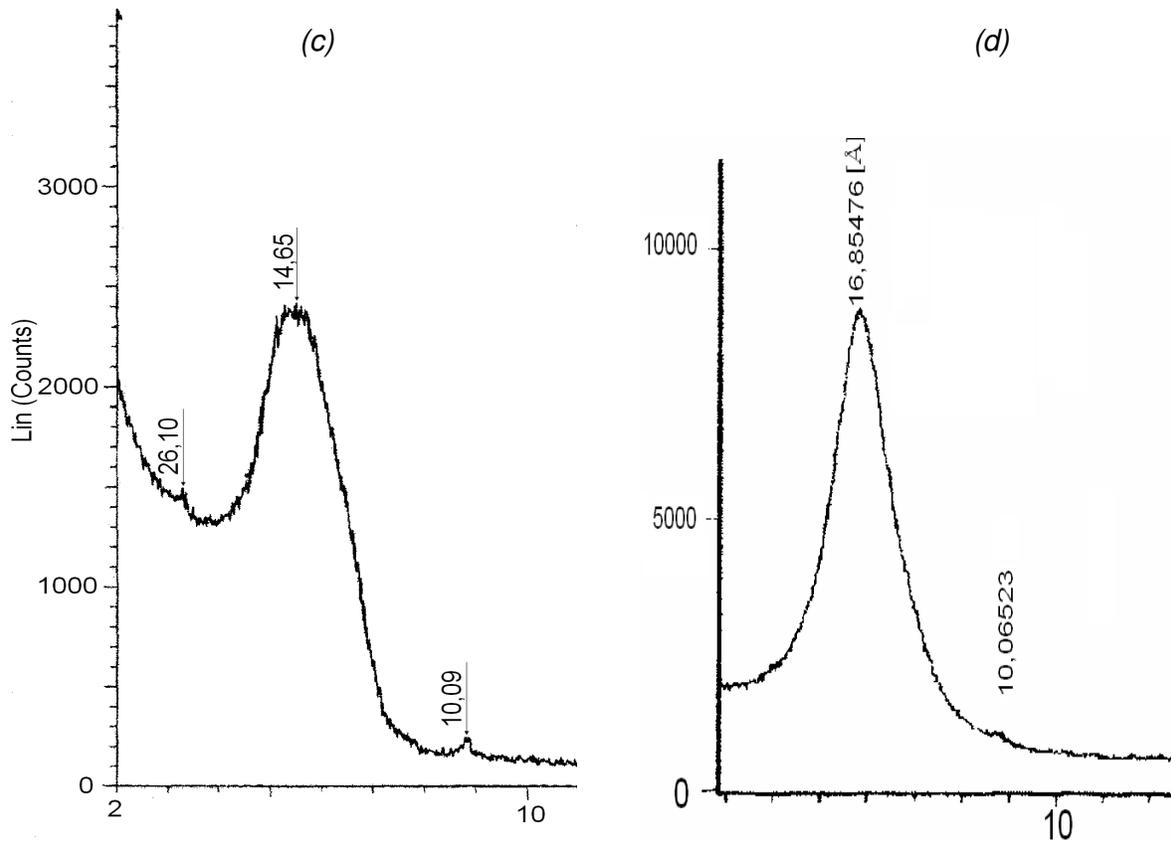


Fig.III.14 : Raies  $d_{(001)}$  des diffractogrammes de la bentonite sodique avant adsorption (c) et après adsorption (d) du colorant jaune Bemacid

### III.5 ETABLISSEMENT DES ISOTHERMES D'ADSORPTION

Pour l'établissement des isothermes d'adsorption, nous avons mis en contact différentes concentrations de colorant 0,0015 – 0,0030 – 0,0060 – 0,012 g/l pour le colorant rouge CL-BN200 Bemacid et de 0,0132 – 0,0264 – 0,0528 – 0,1056 g/l pour le colorant jaune Bemacid CM-3R. Pour cela on utilise des agitateurs thermostatés permettant de garder la température constante pendant l'expérience. Les températures considérées sont 19°C, 30°C et 50°C.

Afin d'étudier le pouvoir d'adsorption de nos échantillons, nous avons appliqué les modèles de Langmuir et de Freundlich.

Les résultats obtenus sont présentés sur les fig.III.15 et fig.III.16 et dans les tableaux N°7, N°8, N°9 et N°10 en annexe B.

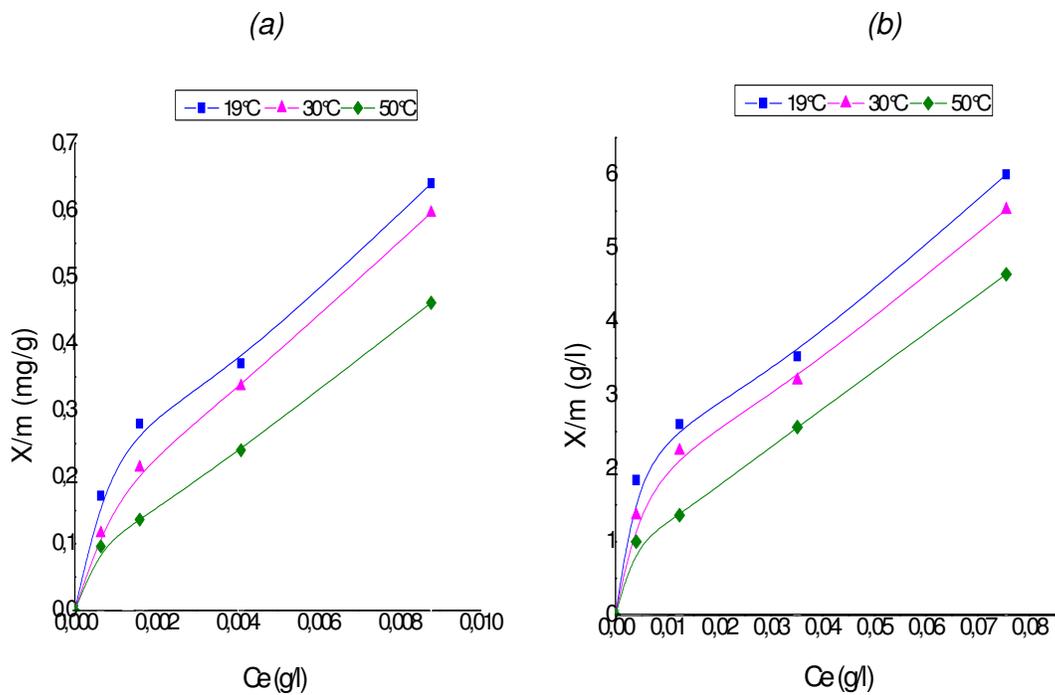


Fig.III.15 : Isothermes d'adsorption du colorant rouge Bemacid (a) et du jaune Bemacid (b) par la bentonite brute

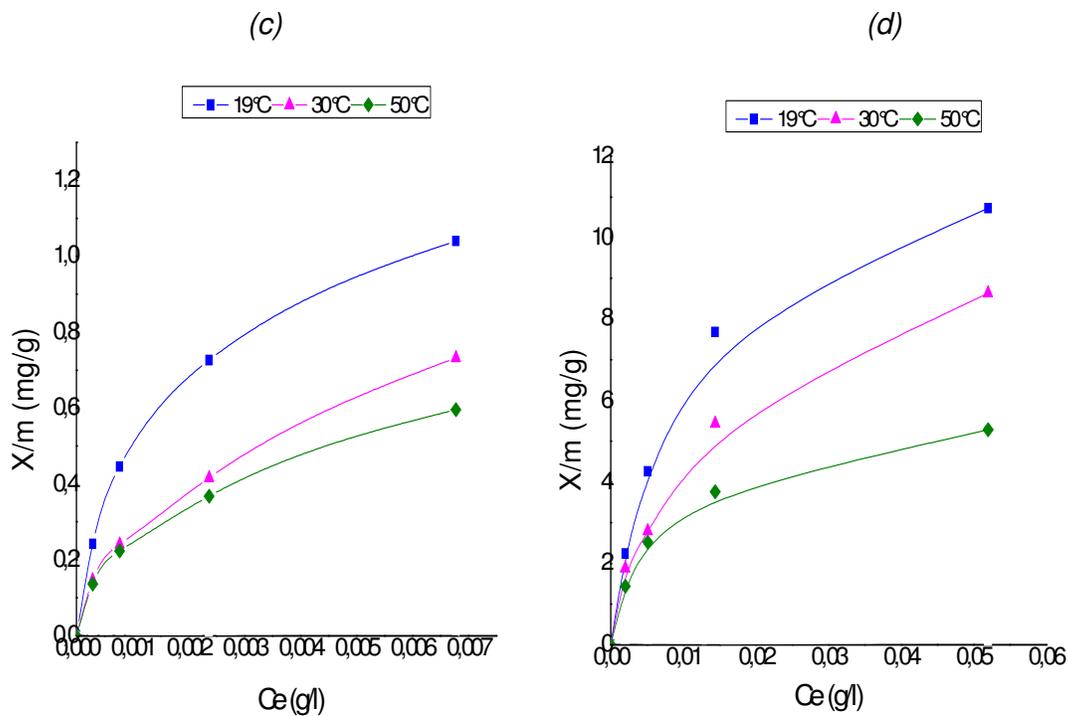


Fig.III.16 : Isothermes d'adsorption du colorant rouge Bemacid (c) et du jaune Bemacid (d) par la bentonite sodique.

### **III.5.1 Formes linéaires des isothermes d'équilibre**

La linéarisation des équations de Freundlich et de Langmuir consiste à déterminer la valeur des différentes constantes  $K$ ,  $1/n$  pour Freundlich,  $Q$  et  $b$  pour Langmuir. Ces constantes ont été déterminées graphiquement pour les différentes conditions expérimentales.

Les formes linéaires des isothermes d'équilibre de Freundlich et Langmuir pour les différentes températures sont représentées sur les tableaux N°11 – N°14 en annexe B.

- ***Détermination des Constantes de Langmuir et de Freundlich.***

Les constantes de Langmuir et de Freundlich de la bentonite brute et sodique sont présentées dans les tableaux N°.III.6 et N°.III.7

Tableau N°.III.6 : Résultats de la linéarisation obtenus à l'aide de l'équation de Langmuir et de Freundlich pour la bentonite brute.

Constantes Température	Colorant rouge Bemacid						Colorant jaune Bemacid					
	Langmuir			Freundlich			Langmuir			Freundlich		
	Q	b	r	K	$\frac{1}{n}$	r	Q	b	r	K	$\frac{1}{n}$	r
19°C	0,71	0,0020	0,981	0,14	0,48	0,988	5,88	0,008	0,957	1,45	0,38	0,977
30°C	0,66	0,0036	0,993	0,10	0,67	0,998	5,55	0,019	0,988	1,21	0,54	0,994
50°C	0,43	0,0037	0,966	0,06	0,70	0,986	4,54	0,031	0,948	0,78	0,68	0,984
19°C	X/m=0,0014 C/ (1+ 0,002C)			X/m=0,14 C <sup>0,48</sup>			X/m=0,047 C/ (1+ 0,008C)			X/m=1,45 C <sup>0,38</sup>		
30°C	X/m=0,0024 C/ (1+ 0,0036 C)			X/m=0,10 C <sup>0,67</sup>			X/m=0,105 C/ (1+ 0,019 C)			X/m=1,21 C <sup>0,54</sup>		
50°C	X/m=0,0016C/ (1+ 0,0037C)			X/m=0,06 C <sup>0,70</sup>			X/m=0,141 C/ (1+ 0,031 C)			X/m=0,78C <sup>0,68</sup>		

Tableau N°III.7 : Résultats de la linéarisation obtenus à l'aide de l'équation de Langmuir et de Freundlich pour la bentonite

	Colorant rouge Bemacid						Colorant jaune Bemacid					
	Langmuir			Freundlich			Langmuir			Freundlich		
Constantes Température	Q	b	r	K	$\frac{1}{n}$	r	Q	b	r	K	$\frac{1}{n}$	r
19°C	1,61	0,00160	0,999	0,22	0,73	0,985	25	0,008	0,999	2,14	0,48	0,978
30°C	0,91	0,0040	0,989	0,11	0,62	0,998	11,23	0,018	0,938	1,33	0,50	0,983
50°C	0,83	0,0043	0,990	0,10	0,67	0,999	6,25	0,020	0,998	1,25	0,56	0,992
19°C	$X/m=0,0025 C / (1+ 0,0016 C)$			$X/m= 0,22C^{0,73}$			$X/m=0,20 C / (1+ 0,008 C)$			$X/m= 2,14C^{0,48}$		
30°C	$X/m=0,0036 C / (1+ 0,0040 C)$			$X/m=0,11 C^{0,62}$			$X/m=0,20 C / (1+ 0,018 C)$			$X/m=1,33 C^{0,50}$		
50°C	$X/m=0,0035 C / (1+0,0043C)$			$X/m=0,10C^{0,67}$			$X/m=0,125 C / (1+0,020 C)$			$X/m=1,25 C^{0,56}$		

Les courbes des figures III.15 à Fig.III.18 sont, pour les températures étudiées, des isothermes de type L (dite de Langmuir) d'après la classification de GILLES et COLL, type caractéristique des adsorbants microporeux de diamètre inférieur à 25Å [11].

Les essais de modélisation de l'adsorption des colorants rouge et jaune Bemacid par les bentonites brute et sodique ont montré que l'adsorption de ces derniers obéit non seulement au modèle de Langmuir mais aussi au modèle de Freundlich (voir les coefficients de corrélation « r » tab N°III.6 et III.7).

Les isothermes obtenus sont de type L, donnent des coefficients ( $1/n < 1$ ). Ceci signifie que l'adsorption est plus importante pour des faibles concentrations [17].

Les tableaux N°III.6 et N°III.7 montrent des différences notables au niveau des capacités maximales d'adsorption. La bentonite sodique à la température de 19°C adsorbe quatre fois plus et deux fois plus que la bentonite brute respectivement pour le colorant jaune et rouge Bemacid.

Il apparaît de façon évidente que les deux bentonites n'adsorbent pas le colorant avec la même capacité sans atteindre la saturation. La bentonite sodique s'avère la plus efficace. A la température de 19°C la bentonite sodique adsorbe plus de 10,73 mg/g et plus de 1,04 mg/g respectivement pour le colorant jaune et rouge Bemacid contrairement à la bentonite brute : 5,83 mg/g et 0,64 mg/g respectivement pour le colorant jaune et rouge Bemacid.

Pour les échantillons de la bentonite, le plateau de saturation n'est pas parallèle à l'axe des abscisses se qui conduit à un accroissement de l'adsorption lorsque la concentration augmente [61].

L'affinité peut être appréciée par la valeur du coefficient K du modèle de Freundlich, la bentonite sodique apparaisse plus efficace à réagir avec le colorant que la bentonite brute.

Le maximum d'adsorption estimé par le coefficient Q de Langmuir illustre une grande adsorption de colorant jaune Bemacid par rapport au colorant rouge Bemacid respectivement par la bentonite sodique et brute.

### III.6 DETERMINATION DE LA DBO<sub>5</sub>

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau N°. III.8

Tableau N°.III.8 : résultats de la DBO<sub>5</sub> pour les deux bentonites.

Colorants \ DBO <sub>5</sub>	DBO <sub>5</sub> avant adsorption (mg/l)	DBO <sub>5</sub> bentonite brute après adsorption (mg/l)	DBO <sub>5</sub> bentonite sodique après adsorption (mg/l)
Colorant rouge	15	10	5
Colorant jaune	130	75	35

Les résultats obtenus ont montré qu'il est possible de ramener la DBO<sub>5</sub> de 15 à 5 mg/l pour le colorant rouge et de 130 mg/l à 35mg/l pour le colorant jaune respectivement avant et après adsorption par la bentonite sodique.

CONCLUSION

## **CONCLUSION**

La protection du milieu naturel et l'amélioration de la qualité des eaux ne cesse de croître et fut la préoccupation de plusieurs organismes à l'échelle mondiale.

Parmi les industries qui engendrent une pollution importante, l'industrie textile en particulier l'ennoblissement par utilisation de grande quantité de colorant qui présente dans leur molécules des composés aromatiques qui ont une toxicité certaine pour l'environnement.

Cette étude avait pour objectif principal l'augmentation des capacités sorptionnelles de la bentonite de Maghnia par la modification sodique de sa structure. Elle nous a permis de dégager quelques conclusions :

1. L'étude de la caractérisation physico- chimique de la bentonite, montre que la modification sodique de la bentonite favorise sa dispersion : (faible granulométrie  $16\mu\text{m}$ ), écartement des feuillets (espacement basal élevée  $\approx 17\text{\AA}$ ).
2. L'étude de processus d'adsorption des colorants acides par ces bentonites ont permis de tirer un certain nombre de renseignements.
  - ✓ L'élévation du temps de contact provoque l'augmentation de l'adsorption des colorants jusqu'à atteindre un maximum au bout de 4h.
  - ✓ L'augmentation de l'acidité du milieu provoque une augmentation de la quantité du colorant adsorbée.
  - ✓ L'adsorption des colorants est meilleure aux faibles températures.
3. L'établissement des isothermes d'adsorption montre que :
  - ✓ L'appartenance au type L de la classification de GILLES et COLL.
  - ✓ A la température  $19^{\circ}\text{C}$  la bentonite sodique adsorbe quatre fois plus et deux fois plus que la bentonite brute respectivement pour le colorant jaune Bemacid CM-3R et rouge Bemacid CL-BN200.
  - ✓ Le Plateau de saturation n'est pas atteint pour les deux colorants.

*PERSPECTIVES*

## ***PERSPECTIVES***

Dans la suite de l'étude, nous nous proposons de constituer une base de données pour une caractérisation complète de la bentonite :

- Détermination de la surface spécifique par la méthode BET afin de suivre l'évolution du réseau microporeux avant et après adsorption de la bentonite.
- Détermination de la capacité d'échange cationique C.E.C pour donner d'autres renseignements sur la quantité maximale d'ions de colorant pouvant être adsorbés par la bentonite (effet de saturation).

En outre, il serait intéressant de procéder à l'adsorption des bains résiduels plus concentrés par une bentonite sodique de granulométrie plus fine ( $\approx 2\mu\text{m}$ ).

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] S.KACHA, M.S.OUALI et S. ELMELLEH, Elimination des colorants des eaux résiduaires de l'industrie textile par la bentonite et des sels d'aluminium, revue des sciences de l'eau 2 (1997), p : 233-248.
- [2] M.L.LEMONNIER, M.VIGUIER, Les textiles et leur entretien, éditions Jaque Lanore, 1978, Paris
- [3] C.E.CHITOUR, Chimie des surface, Introduction à la catalyse, 2<sup>eme</sup> édition, 1981.
- [4] P.WVITHEIR, Le pétrole, raffinage et génie chimique, 2<sup>eme</sup> édition, Tome1, 1972.
- [5] F.EDELINE, Epuration physico-chimique l'eau, théorie et technologie, CEBEDOC, 2<sup>eme</sup> édition, SPRL, 1992.
- [6] C.CARDOT, Les traitement de l'eau, procédés physico-chimiques et biologiques cours et problèmes résolus, ellips édition 1999.
- [7] G. EMSH WILLER, Chimie physique, Equilibre en solution, phénomènes de surface, tome 2, 1961, Paris.
- [8] J.VANDER LAAN, Proc specialized symposium on the used of actived carbon in water treatment, WSA. Brussels Pergamon - press. Elmsford-New-York, 1979, p : 106.
- [9] M. MESSOUD-BOUREGDA, Valorisation d'un déchet alimentaire: le marc de café, traitement en charbon actif- étude de son comportement dynamique lors de l'adsorption des colorants textiles, thèse de magister 2001, université de Boumerdes, p :11.
- [10] R.J. NEWCORNB, R.M. WRICKETT, J. MWILSON, A. ARDENARO, Manipulation de chimie physique, traduction française par S. COURBET, 1964.
- [11] C.E. CHETOUR, Physico-chimie des surfaces, l'adsorption gaz- solide et liquide-solide, tome 2, 2004.
- [12] OREDLICH, OPETERSON, Ansuful adsorption, isotherm, phys, chem, 1959, p: 10, 24, 63.
- [13] RAYMOND DESJARDINS, Traitement des eaux, édition de l'école polytechnique de Montréal.

- [14] A.W. ADAMSON, Physical chemistry of surfaces, 3<sup>rd</sup> edition Willey, 1976, New York.
- [15] A. MELLAH, A. BOUALIA, KMENACER, T. AISSAOUI, A. SILEM, Adsorption of organic matter contained in industrial H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> auto bentonite bath contact time and kinetic study applied chey science”, Volume 7,1993, p : 431, 445.
- [16] P. SAVENKO, Chimie colloïdale, Cours pour les élèves technicien, 1974, p : 35 - 42.
- [17] O. BOURAS, Propriétés adsorbantes d’argiles pontées organophiles : Synthèse et caractérisation, thèse de doctorat n° 02-2003, université de Limoges.
- [18] F. Sekrane, M. Kadraoui, Z. Boubberka, A. Khenifi, Z. Derriche, Valorisation de certaines argiles algériennes : Application aux traitements des eaux polluées, Faculté des Sciences, USTMB, 2004, Oran.
- [19] Ys Choi, Jh Cho, source : Environmental technology, vol 17, n°11, 1996, p : 1169-1180
- [20] S. CAILLER, S.HENIN, M. RAUTUREAU, Les argile, édition SEPTIMA, 1989, Paris.
- [21] R.E. GRIM, Clay mineralogy, édité par R.R. Shrock (McGraw-Hill series in Geology, Londres), 1953.
- [22] F. BERGYA, Organisation des molécules polaires par la montmorillonite, Thèse de Doctorat d’Etat, 1978, université de Boumerdes.
- [23] S. CAILLERE, S. HENNIN, M. RAUTUR, Structure et propriétés physico-chimiques des argiles, tome 1, édition MASSON, 1982.
- [24] A. BARON, A. BERNARD, F. DELOYE, J. LOUVRIER, J. MILLET, R. SIERRA, R. STRUILLLOU, I. AVOÏNOVITCH, L’analyse minéralogique des sols argileux, édition Eyrolles, 1971.
- [25] R. HOUPERT, Mécanique des sols: introduction à la mécanique des sols, principaux types de sols, structure des sols, Mancy, 1967.
- [26] L. GORGEON, Contribution à la modélisation physico-chimique de la rétention de radioéléments à vie longue par des matériaux argileux, Thèse 1994, Université Paris.
- [27] G. SPOSITO, Surface reactions in natural aqueous colloidal systems, 1989, **43**, p :169-176.
- [28] JEAN SIGG, Les produits de terre cuite, matière première, fabrication, caractéristiques, applications, faïence et gres, éditon Septima, 1991, Paris.

[29] R.A. SCHOONHEYDT, Mineral Surfaces, édité par D.J. Vaughan et R.A.D. Patrick (Chapman & Hall, Londres), chapitre 9 (Clay mineral surfaces), 1995.

[30] R. CALVET, Hydratation de la montmorillonite et diffusion des cations compensateurs. I. Saturation par des cations monovalents, Ann. Agron, 1973, p : 24, 77-133.

[31] J. CUADROS, Interlayer cation effects on the hydration state of smectite, American Journal of Science, 1997, p : 297, 829-841

[32] D.W. RUTHERFORD, C.T CHIOU, D.D EBERL, Effects of exchanged cation on the microporosity of montmorillonite, Clays and Clay Minerals, 1997, **45**(4), p : 534 - 543

[33] C.T CHIOU, D.W RUTHERFORD, Effects of exchanged cation and layer charge on the sorption of water and EGME vapors on montmorillonite clays, Clays and Clay Minerals, 1997, **45**(6), p : 867 - 880

[34] E.S. BOEK, P.V. COVENEY, N.T. SKIPPER, Monte Carlo molecular modeling studies of hydrated Li-, Na- and K-smectites : understanding the role of potassium as a clay swelling inhibitor, J. Am. Chem. Soc. 1995, **117**, p : 12608-12617

[35] J. WAKIM, Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses, Thèse de Doctorat de l'école Nationale Supérieure des Mines, 2005, Paris.

[36] M.Lal. Shale stability, Drilling fluid interaction and shale strength, society of petroleum engineers, (54356), 1999.

[37] I. LEFVBRE ET A. LAJUDIE, Détermination des capacité d'échange des argiles, corrélation avec certaines propriétés physico-chimiques. SES d/87.11, 1987

[38] M.A DERIBERE, A. ESME, La bentonite, les argiles colloïdales et leurs emplois, DUNOD, 2<sup>ème</sup> édition, Paris, 1943, p : 175.

[39] G GKENDREY, F.JC. ROE: the lancet, 1979, 1, 1206.

[40] Centre d'activité régionales pour la production propre (Car/PP) plan d'action pour la Méditerranée, prévention de la pollution dans l'industrie textile dans la région méditerranéenne, 2002, p: 141,151.

[41] Gesetz über die Umweltverträglichkeit von Wasch- und Reinigungsmitteln vom 05.03.1987.

[42] International Textile Manufacturers Federation - International Textile Shipment Statistics, vol. 14, 1991

[43] J. OLIVER, HAO- HYUNOOK. KIM, Critical reviews in environmental science and technology, vol. 30, 2000, p: 449-480.

- [44] F. MEINCK, Les résiduaires industrielles, édition Masson
- [45] J. SAZARA, P. ROCUEM, Treatment of a waste water resulting from dye manufacturing with ozone and chemical coagulation, water research, vol. 32, issues 9, 1978, p : 2721-2727.
- [46] O. MARMAGNE, C. COSTE, J.C. JACQUART, A. BAILLI, E. THIEBLIN, La décoloration des effluents, Revue industrie textile, 7/8, N° 1278, 1996.
- [47] M.L. J. RICHARDSON, dyers colour, 1983, p : 7, 991, 197.
- [48] MEKHAZRZIA, La décoloration des effluents de teinturerie, 1978.
- [49] W. LITTLE L, J.C LAMB, W.B DURKIN, Toxicity of selected commercial dyes to the fathead minnow for reduction of toxicity, Proc 21<sup>eme</sup> Ind Waste conference, University of Oklahoma, 1974, P: 524-534.
- [50] A. UYGUR, An overview of oxidative and photo-oxidative decolourisation treatments of textile wastewater, Journal society, dyers discoloration, vol.113, issues 7 et 8, 1997, p: 211-217.
- [51] G.M WAKER, L.R WEAHERLY, Adsorption of acids dyes onto granular activated carbon in fixed bed, water research, vol.31,1997, p :2, 93.
- [52] D. BROWN, P. LABOURWR, The degradation of dyes stuffs, primary degradation of under anaerobic conditions, chemo sphere, vol.12, issues 3, 1983, pp:397-404.
- [53] P.C. SINGER, L. TATKIN, Adsorption of dyes from wastewater by activated carbon, Proc 5<sup>th</sup> annual wema and pollut. Conf, Atlanta, GA, 1977, pp: 391, 416.
- [54] Colour for textiles a user's handbook, society of dyers and colourists, 1993.
- [55] David M Lewis, Wool dyeing, society of dyers and colourists, 1992.
- [56] BEZIMA Colours and our passion, printed 3/2001, Suisse.
- [57] J.N. MUKHERJEE, B. CHATTERJEE, Liberation of H<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, and Fe<sup>3+</sup> ions from pure clay minerals on repeated salt treatment and desaturations, phys. Chem, 1948, p: 469- 481.
- [58] P. MEHRA, M.L.JACKSON, Iron oxide removal from soils and clay by a dithionite citrate buffered with sodium bicarbonate, clay and clay miner.17, 1960, p: 253-264.
- [59] M.ROBERT, D. TESSIER, Méthode de préparation des argiles des sols pour des études minéralogiques, Ann. Agron.25, N°6, 1974, p: 859-882.
- [60] CHAMELY, Clay sedimentology, Springer – Verlag, 1989.

[61] J. AVOM, J. KETCHA MBADCAM, M.R.L. MATIP, P. GERMAIN, Adsorption isotherme de l'acide acétique par des charbons d'origine végétale, université de Yaoundé Cameroun African Journal of Science and Technology (AJST) Science and Engineering Series Vol. 2, No. 2, décembre 2001, pp : 1-7

*ANNEXES*

## 1. TRACAGE DE LA COURBE D'ETALLONNAGE

Pour tracer la courbe d'étalonnage on utilise un photocolorimetre pour déterminer les densités optiques des solutions colorées.

### 1.1. Mode opératoire

Pour déterminer la concentration des solutions colorées, le photocolorimetre est préalablement étalonné à partir une série de solutions à concentration connue. Pour cela on prépare d'abord une solution mère concentrée

- 1g/l pour le colorant du 1<sup>er</sup> groupe : Rouge Bemacid CL-BN 200:.
- 1g/l pour le colorant du 3<sup>eme</sup> groupe : Jaune Bemacid CM-3R.

A partir de cette solution on prépare une série de solution fille par dilution de la solution étalon mère dans des fioles jaugées de 250 ml.

### 1.2. Choix du filtre

- Une fois la série de solution est préparées on choisie le filtre adéquat.
- On verse la solution colorée de la concentration intermédiaire dans la cuve et on détermine la densité optique avec tout les filtre (longueur d'onde) de photocolorimetre.
- On choisie le filtre avec le quel la densité optique à une valeur maximale.

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

- Le colorant du 1<sup>er</sup> groupe : Rouge Bemacid CL-BN 200

$\lambda$	430	470	<b>490</b>	520	540	580	600	710
DO	0,46	0,53	<b>0,70</b>	0,61	0,23	0,03	-0,06	-0,09

Le filtre qui convient pour le colorant Rouge Bemacid CL-BN 200 est de 490 $\mu$ m

- Le colorant du 3<sup>eme</sup> groupe : Jaune Bemacid CM-3R

$\lambda$	<b>430</b>	470	490	520	540	580	600	710
DO	<b>0,13</b>	0,07	0,07	0,03	-0,03	-0,05	-0,09	-0,11

Le filtre qui convient pour le colorant Jaune Bemacid CM-3R est de 430 $\mu$ m

### 1.3. Traçage de la courbe d'étalonnage

On mesure les densités optiques de toutes les solutions préparées et on trace la droite passant par l'origine et le nuage des points.

- Le colorant du 1<sup>er</sup> groupe : Rouge Bemacid CL-BN 200

	0,5 ml	1ml	1,5ml	2ml	2,5ml	3ml
DO	0,11	0,22	0,30	0,38	0,50	0,58
C (g/l)	0,005	0,001	0,015	0,020	0,025	0,030

- Le colorant du 3<sup>eme</sup> groupe : Jaune Bemacid CM-3R

	1ml	2ml	3ml	4ml	5ml	6ml	7ml
DO	0,08	0,12	0,20	0,26	0,30	0,42	0,43
C (g /l)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07

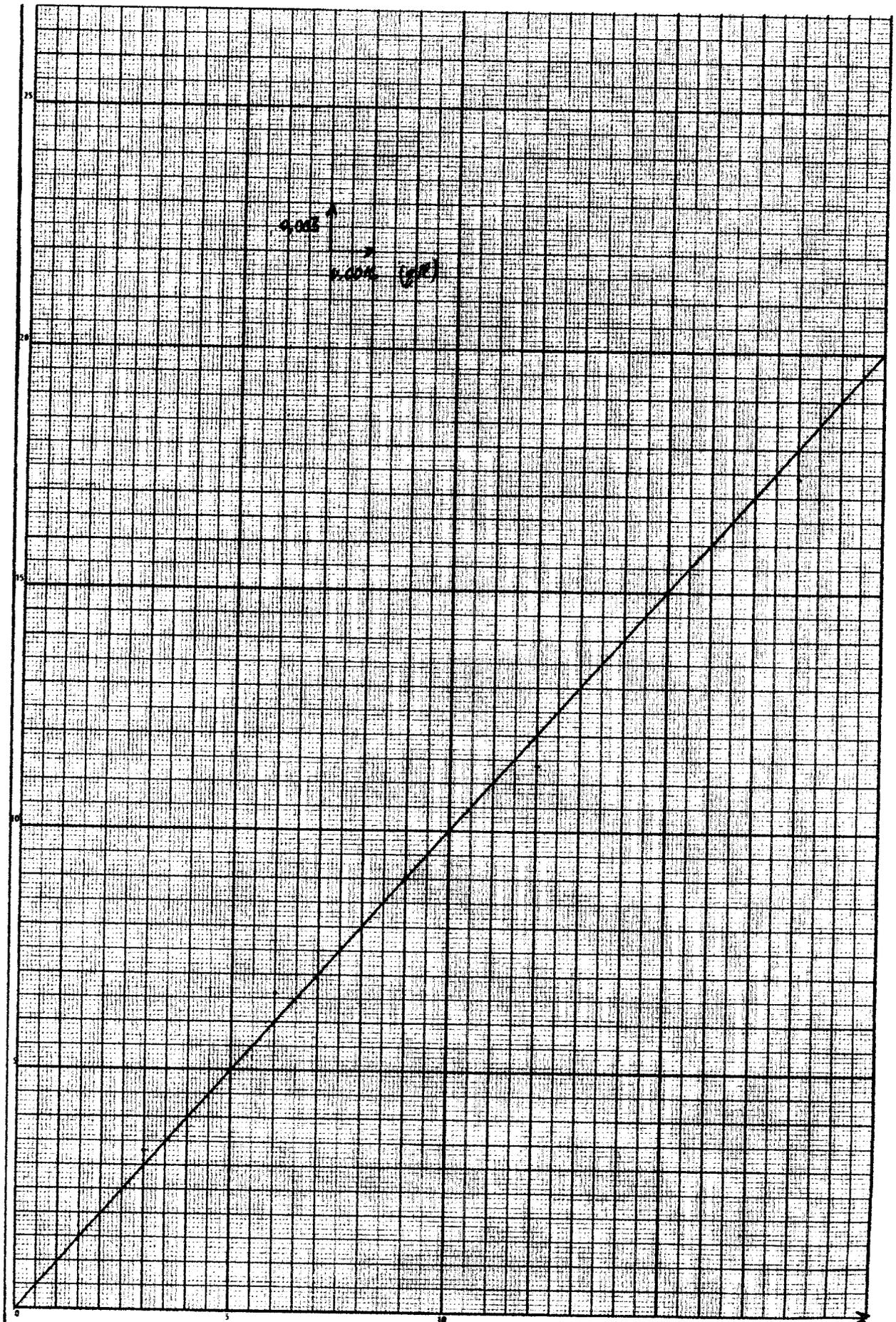


Fig.1 : La courbe d'étalonnage du colorant rouge Bemacid CL-BN200  $c$  (g/l)

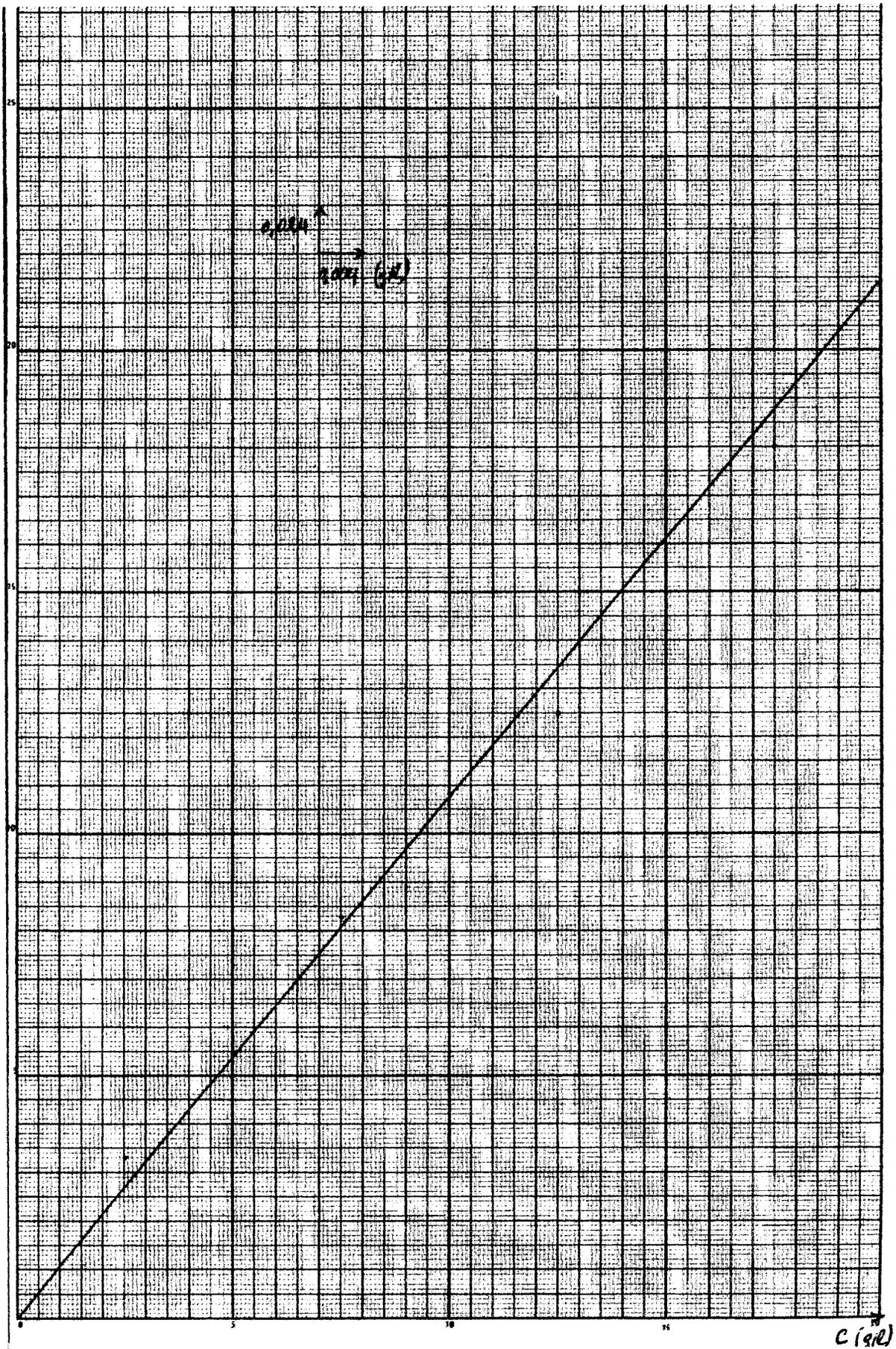


Fig.2 : La courbe d'étalonnage du colorant jaune Bemacid CM-3R

Tableau N°1 : Influence du temps de contact du colorant rouge Bemacid CL-BN200

Colorant rouge Bemacid CL-BN200								
Bentonite brute					Bentonite sodique			
Temps de contact (min)	DO	Ce (g/l)	X/m (mg/g)	$\eta$ (%)	DO	Ce (g/l)	X/m (mg/g)	$\eta$ (%)
30	0,048	0,00232	0,136	22,66	0,042	0,00203	0,193	32,26
60	0,040	0,00193	0,214	35,66	0,039	0,00188	0,222	37,06
90	0,036	0,00174	0,252	42,00	0,035	0,00169	0,262	43,66
120	0,035	0,00169	0,262	43,66	0,028	0,00136	0,328	54,66
180	0,034	0,00165	0,270	45,00	0,022	0,00106	0,386	64,44
240	0,033	0,00160	0,280	46,66	0,016	0,00077	0,446	74,33
300	0,033	0,00160	0,280	46,66	0,016	0,00077	0,446	74,33
360	0,033	0,00160	0,280	46,66	0,016	0,00077	0,446	74,33

Tableau N°2 : Influence du temps de contact du colorant jaune Bemacid CM-3R

Colorant jaune Bemacid CM-3R								
Bentonite brute					Bentonite sodique			
Temps de contact (min)	DO	Ce (g/l)	X/m (mg/g)	$\eta$ (%)	DO	Ce (g/l)	X/m (mg/g)	$\eta$ (%)
30	0,119	0,0184	1,60	30,30	0,109	0,0168	1,92	36,36
60	0,101	0,0156	1,96	38,58	0,100	0,0152	2,24	42,42
90	0,090	0,0140	2,28	44,88	0,085	0,0130	2,68	50,75
120	0,087	0,0134	2,40	47,24	0,055	0,0084	3,60	68,18
180	0,085	0,0130	2,48	48,82	0,038	0,0062	4,04	76,51
240	0,083	0,0126	2,56	50,39	0,033	0,0051	4,26	80,68
300	0,081	0,0124	2,60	51,18	0,033	0,0051	4,26	80,68
360	0,081	0,0124	2,60	51,18	0,033	0,0051	4,26	80,68

Tableau N°3 : Influence du pH du colorant rouge Bemacid CL-BN200

Colorant rouge Bemacid CL-BN200								
Bentonite brute					Bentonite sodique			
pH	DO	Ce (g/l)	X/m (mg/g)	η (%)	DO	Ce (g/l)	X/m (mg/g)	η (%)
2	0,030	0,00145	0,309	51,50	0,014	0,00067	0,465	77,60
4	0,042	0,00203	0,194	32,33	0,026	0,00125	0,350	58,33
6	0,047	0,00227	0,146	24,33	0,040	0,00193	0,214	35,66
8	0,051	0,00246	0,108	18,00	0,046	0,00222	0,155	25,86

Tableau N°4 : Influence du pH du colorant jaune Bemacid CM-3R

Colorant jaune Bemacid CM-3R								
Bentonite brute					Bentonite sodique			
pH	DO	Ce (g/l)	X/m (mg/g)	η (%)	DO	Ce (g/l)	X/m (mg/g)	η (%)
2	0,038	0,0059	4,096	77,57	0,025	0,0036	4,56	86,36
4	0,080	0,0124	2,80	53,03	0,033	0,0051	4,26	80,68
6	0,090	0,0140	2,48	46,97	0,087	0,0134	2,60	49,24
8	0,110	0,0172	1,84	34,85	0,106	0,0164	2,00	37,88

Tableau N°5 : Influence de la température du colorant rouge Bemacid CL-BN200

Colorant rouge Bemacid CL-BN200								
Bentonite brute					Bentonite sodique			
Température (°C)	DO	Ce (g/l)	X/m (mg/g)	η (%)	DO	Ce (g/l)	X/m (mg/g)	η (%)
19	0,033	0,00160	0,280	46,66	0,016	0,00077	0,446	74,33
30	0,040	0,00193	0,214	35,66	0,037	0,00179	0,241	40,26
50	0,048	0,00232	0,136	22,66	0,039	0,00188	0,224	37,33

Tableau N°6 : Influence de la température du colorant jaune Bemacid CM-3R

Colorant jaune Bemacid CM-3R								
Bentonite brute					Bentonite sodique			
Température (°C)	DO	Ce (g/l)	X/m (mg/g)	$\eta$ (%)	DO	Ce (g/l)	X/m (mg/g)	$\eta$ (%)
19	0,081	0,0124	2,60	51,18	0,033	0,0051	4,26	80,68
30	0,098	0,0152	2,24	42,42	0,080	0,0124	2,80	53,03
50	0,127	0,0196	1,36	25,75	0,089	0,0138	2,52	47,72

Tableau N°7 : Isotherme d'adsorption du colorant rouge Bemacid CL-BN200 par la bentonite sodique

température (°C) Concentration (g/l)		19°C	30°C	50°C
0,0015	DO	0,006	0,016	0,017
	Ce (g/l)	0,00029	0,000768	0,00082
	X/m (mg/g)	0,242	0,146	0,136
	$\eta$ (%)	80,66	48,88	45,33
0,0030	DO	0,016	0,037	0,039
	Ce (g/l)	0,00077	0,00179	0,00188
	X/m (mg/g)	0,446	0,241	0,224
	$\eta$ (%)	74,33	40,26	37,33
0,0060	DO	0,049	0,081	0,086
	Ce (g/l)	0,00237	0,00392	0,00416
	X/m (mg/g)	0,726	0,416	0,368
	$\eta$ (%)	60,50	34,66	30,66
0,012	DO	0,140	0,172	0,186
	Ce (g/l)	0,00678	0,00834	0,0090
	X/m (mg/g)	1,04	0,732	0,596
	$\eta$ (%)	43,33	30,50	24,83

Tableau N°8 : Isotherme d'adsorption du colorant jaune Bemacid CM-3R par la bentonite sodique

température (°C) Concentration (g/l)		19°C	30°C	50°C
0,0132	DO	0,016	0,025	0,039
	Ce (g/l)	0,0020	0,0038	0,006
	X/m (mg/g)	2,24	1,88	1,44
	η (%)	84,85	71,21	54,54
0,0264	DO	0,033	0,080	0,089
	Ce (g/l)	0,0051	0,0124	0,0138
	X/m (mg/g)	4,260	2,80	2,52
	η (%)	80,68	53,03	47,72
0,0528	DO	0,096	0,165	0,220
	Ce (g/l)	0,0144	0,0256	0,034
	X/m (mg/g)	7,68	5,44	3,76
	η (%)	72,72	51,51	35,60
0,1056	DO	0,312	0,401	0,511
	Ce (g/l)	0,052	0,0624	0,0792
	X/m (mg/g)	10,72	8,64	5,28
	η (%)	50,75	40,91	25,00

Tableau N°9 : Isotherme d'adsorption du colorant rouge Bemacid CL-BN200 par la bentonite brute

température Concentration (g/l) \ (°C)		19°C	30°C	50°C
0,0015	DO	0,013	0,018	0,021
	Ce (g/l)	0,00064	0,00086	0,00102
	X/m (mg/g)	0,172	0,116	0,096
	$\eta$ (%)	57,33	42,42	32,13
0,0030	DO	0,033	0,040	0,048
	Ce (g/l)	0,00160	0,00193	0,00232
	X/m (mg/g)	0,280	0,214	0,136
	$\eta$ (%)	46,66	35,66	22,66
0,0060	DO	0,085	0,090	0,099
	Ce (g/l)	0,0041	0,00432	0,0048
	X/m (mg/g)	0,370	0,336	0,240
	$\eta$ (%)	31,33	28,00	20,00
0,012	DO	0,181	0,186	0,200
	Ce (g/l)	0,0088	0,00902	0,00969
	X/m (mg/g)	0,640	0,596	0,461
	$\eta$ (%)	26,66	24,85	19,20

Tableau N°10 : Isotherme d'adsorption du colorant jaune Bemacid CM-3R par la bentonite brute

température Concentration (g/l) / (°C)		19°C	30°C	50°C
0,0132	DO	0,072	0,039	0,053
	Ce (g/l)	0,0040	0,0064	0,0082
	X/m (mg/g)	1,84	1,36	1,00
	η (%)	69,69	51,51	37,88
0,0264	DO	0,081	0,098	0,127
	Ce (g/l)	0,0124	0,0152	0,0196
	X/m (mg/g)	2,60	2,24	1,36
	η (%)	54,18	42,42	25,75
0,0528	DO	0,215	0,238	0,260
	Ce (g/l)	0,0352	0,0368	0,04
	X/m (mg/g)	3,52	3,2	2,56
	η (%)	33,33	30,30	24,24
0,1056	DO	0,484	0,500	0,530
	Ce (g/l)	0,0756	0,078	0,0824
	X/m (mg/g)	6,00	5,52	4,64
	η (%)	28,41	26,14	21,96

Tableau N°11 : Forme linéaire de l'isotherme de Langmuir de colorant rouge Bemacid

Bentonite		Bentonite brute				Bentonite sodique			
température									
Température 19°C	1/Ce	1562,5	625	243,90	113,64	3448,27	1298,70	421,94	147,79
	m/X	5,81	3,57	2,70	1,56	4,32	2,24	1,38	0,96
Température 30°C	1/Ce	1162,79	518,13	231,48	110,86	1302,08	558,66	255,10	119,90
	m/X	7,87	4,67	2,97	1,68	6,85	4,15	2,40	1,37
Température 50°C	1/Ce	980,39	431,03	208,33	103,19	1219,15	531,91	240,38	112,23
	m/X	10,41	7,35	4,17	2,40	7,35	4,46	2,12	1,62

Tableau N°12 : Forme linéaire de l'isotherme de Freundlich de colorant rouge Bemacid

Bentonite		Bentonite brute				Bentonite sodique			
température									
Température 19°C	In Ce	-7,35	-6,44	-5,49	-4,73	-8,14	-7,17	-6,04	-4,99
	In (x/m)	-1,76	-1,27	-0,99	-0,44	-1,42	-0,81	-0,32	0,04
Température 30°C	In Ce	-7,06	-6,25	-5,44	-4,71	-7,17	-6,32	-5,54	-4,78
	In (x/m)	-2,15	-1,54	-1,09	-0,52	-1,92	-1,42	-0,88	-0,31
Température 50°C	In Ce	-6,88	-6,06	-5,34	-4,64	-7,10	-6,27	-5,48	-4,71
	In (x/m)	-2,34	-1,99	-1,43	-0,77	-1,99	-1,49	-0,99	-0,52

Tableau N°13 : Forme linéaire de l'isotherme de Langmuir de colorant jaune Bemacid

Bentonite température		Bentonite brute				Bentonite sodique			
		1/Ce	250	80,64	28,41	13,33	500	196,08	69,44
Température 19°C	m/X	0,54	0,36	0,28	0,17	0,44	0,23	0,13	0,09
	1/Ce	156,25	65,79	27,17	12,82	263,16	80,64	39,06	16,02
Température 30°C	m/X	0,73	0,44	0,31	0,18	0,53	0,36	0,18	0,11
	1/Ce	121,95	51,02	25	12,13	166,66	72,46	29,41	12,62
Température 50°C	m/X	1	0,73	0,39	0,21	0,69	0,39	0,27	0,19

Tableau N°14 : Forme linéaire de l'isotherme de Freundlich de colorant jaune Bemacid

Bentonite température		Bentonite brute				Bentonite sodique			
		In Ce	-5,52	-4,39	-3,34	-2,59	-6,21	-5,28	-4,24
Température 19°C	In (x/m)	0,61	0,95	1,25	1,79	0,18	1,45	2,04	2,37
	In Ce	-5,05	-4,18	-3,30	-2,55	-5,57	-4,39	-3,66	-2,77
Température 30°C	In (x/m)	0,31	0,80	1,16	1,71	0,63	1,03	1,69	2,15
	In Ce	-4,80	-3,93	-3,22	-2,49	-5,11	-4,28	-3,38	-2,53
Température 50°C	In (x/m)	0	0,31	0,94	1,53	0,36	0,92	1,31	1,66