



Faculté Des Sciences Exactes

Département De Chimie

Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de master en Chimie

Spécialité : Chimie Analytique

Thème :

Caractérisation d'un adsorbant minéral
« La Célestine SrSO_4 »

Réalisé par : M^{elle} AINSERI Sylia

Soutenu le : 25/10/2020

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Département d'affiliation	Qualité
M ^{me} DJERADA Farida	Département de Chimie	Présidente
M ^{me} AIT AHMED Nadia	Département de Chimie	Examinatrice
M ^{me} AIT BRAHAM Laila	Département de Chimie	Promotrice

Année Universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier avant tout le bon Dieu qui m'a donné la volonté et le courage pour réaliser ce travail.

Ma profonde gratitude va à ma promotrice M^{me} AIT BRAHAM pour m'avoir confié ce travail et de m'avoir donné ses précieux conseils.

DEDICACES

**Toutes les lettres ne sauraient trouver les
mots qu'il faut... Tous les mots ne
sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le
respect, la reconnaissance... Aussi, c'est
tout simplement que**

Je dédie ce mémoire...

À mes chers parents aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien-être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Puisse Dieu, le très haut, vous accorde santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À mes grandes mères.

À mon cher frère Djahid et à mes adorables sœurs Nadjat, Melaz, Sonia et Abla.

À mes cousins et cousines.

À mes oncles et tantes.

À ma belle-famille.

À tous mes camarades de la promotion Chimie analytique et à tous mes amis

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Colorant rouge Congo. -----	16
Figure I.2 Colorant Bleu Méthylène. -----	17
Figure I.3 Divers pigments colorés sur un marché en Inde.-----	17
Figure I.4 Colorant Mordant Blue 9.-----	18
Figure I.5 Colorants azoïques insolubles dans l'eau.-----	18
Figure I.6 Un groupement chromophore.-----	19
Figure I.7 Structure chimique de l'indigo. -----	19
Figure I.8 Vert de malachite.-----	20
Figure I.9 Structure chimique de la fluorescéine.-----	20
Figure I.10 Nitrés, composés aromatiques.-----	21
Figure I.11 Structure chimique de l'Azobenzène.-----	21
Figure I.12 Rhodamine B.-----	25
Figure I.13 Solubilité de la Rhodamine B. -----	25
Figure II.1 Domaines d'existence d'un soluté lors de l'adsorption sur un matériau microporeux.-----	39
Figure II.2 Les classes principales des isothermes d'adsorption. -----	42
Figure II.3 Présentation de modèle de Langmuir, l'isotherme d'adsorption. -----	44
Figure II.4 Classification de MENDELIEV pour les éléments chimiques. -----	48
Figure II.5 Flux issus de la séparation minéralurgique d'un minerai. -----	49
Figure II.6 Célestine en pierre dans la race une fin -----	53
Figure II.7 Cristaux hexagonaux de Strontianite-----	53
Figure II.8 La situation géographique de gisement de Beni Mansour.-----	55
Figure II.9 Relief de la région Beni Mansour. -----	55
Figure II.10 Un gisement de gypse à Beni Mansour. -----	57
Figure II.11 Un rochet du minerai situé à Beni Mansour.-----	57
Figure II.12 Les marnes à Beni Mansour. -----	57
Figure II.13 La poudre de Célestine de Beni-Mansour concentré de table après un procédé gravimétrique des tables de secousses. --	58
Figure II.14 La table de secousses.-----	58
Figure II.15 L'aspect du concentré marchand et des rejets de tables. Granulométrie : 0-2mm-----	59
Figure II.16 L'aspect du minerai après broyage.-----	59
Figure II.17 Mine de Célestine de Beni-Mansour visualisée avec le MEB. -----	60
Figure III.1 Schéma représentatif du principe de la DRX.-----	64
Figure III.2 Spectre d'un échantillon du minerai de Célestine de Beni Mansour par diffractomètre à rayon X de l'échantillon initial interprété avec Origine Pro. -----	65
Figure III.3 Image MEB de la surface de l'échantillon étudié, avec un agrandissement (1200 x). -----	66
Figure III.4 Image MEB de la surface d'échantillon étudié avec un agrandissement (8000 x). -----	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Les groupements chromophores et auxochromes. -----	21
Tableau I.2 Taux de fixation sur textile pour différentes classes de colorants. -----	30
Tableau II.1 Principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique. -----	38
Tableau II.2 : Les teneurs des éléments après le concassage et le broyage et l'enrichissement gravimétrique du minerai. -----	59
Tableau III.1 Résultats d'analyse granulométrique du minerai de Célestine de Beni Mansour par FX. -----	67

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

DEDICACES

LISTE DES FIGURES----- 5

LISTE DES TABLEAUX----- 6

TABLE DES MATIERES ----- 7

INTRODUCTION GENERALE----- 11

CHAPITRE I Les Colorants----- 14

I.1 Généralités sur les colorants----- 15

I.2 Définition des colorants ----- 15

I.3 Classification des colorants textiles ----- 16

I.3.1 Classification tinctoriale ----- 16

I.3.1.1 Les colorants acides ou anioniques ----- 16

I.3.1.2 Les colorants basiques ou cationiques----- 17

I.3.1.3 Les colorants de cuve ----- 17

I.3.1.4 Les colorants dispersés----- 17

I.3.1.5 Les colorants à mordants ----- 18

I.3.1.6 Les colorants développés ou azoïques insolubles (pigments)----- 18

I.3.2 Classification chimique----- 18

I.3.2.1 Les colorants indigoïdes ----- 19

I.3.2.2 Les Phtalocyanines----- 19

I.3.2.3 Les colorants triphénylméthanes----- 19

I.3.2.4 Les colorants xanthines----- 20

I.3.2.5 Les colorants anthraquinoniques----- 20

I.3.2.6 Les colorants nitrés et nitrosés----- 21

I.3.2.7 Les colorants azoïques ----- 21

I.4 L'Utilisation des colorants----- 22

I.5 Aperçu sur les colorants alimentaires----- 22

I.5.1 Histoire des colorants alimentaires artificiels----- 23

I.5.2 Objet des colorants alimentaires----- 23

I.5.3 Aperçu sur la Rhodamine B----- 24

I.5.4 L'utilisation de la Rhodamine B----- 24

1.5.5	La solubilité de la Rhodamine	25
1.5.6	Structure de la Rhodamine B	25
1.5.7	Propriétés physicochimiques de la Rhodamine B	25
1.5.8	Toxicité de la Rhodamine	26
1.6	Toxicité des colorants synthétiques	26
1.6.1	Toxicité des colorants indigoïdes	26
1.6.2	Toxicité des triphénylméthanes	26
1.6.3	Toxicité des Xanthines	26
1.6.4	Toxicité des colorants azoïques	27
1.7	Toxicité et impact environnemental	27
1.8	Le danger des rejets textiles	28
1.8.1	Les dangers évidents	28
1.8.1.1	Eutrophisation	28
1.8.1.2	Sous-oxygénation	28
1.8.1.3	Couleur, Turbidité, Odeur	29
1.8.2	Les dangers à long terme	29
1.8.2.1	La persistance	29
1.8.2.2	Bioaccumulation	29
1.8.2.3	Cancer	29
1.8.2.4	Sous-produits de coloration (SPC)	30
1.9	Méthodes de traitements des colorants (Actions curatives)	30
1.9.1	Les méthodes biologiques	31
1.9.1.1	Traitement aérobie	32
1.9.1.2	Traitement anaérobie	32
1.9.1.2.1	Avantages et inconvénients	32
1.9.2	Les méthodes physiques	33
1.9.2.1	Méthode physico-chimique : coagulation/floculation	33
1.9.2.2	Filtration sur membrane	33
1.9.2.3	Adsorption sur un support solide	34
1.9.3	Les méthodes chimiques	34
1.9.3.1	La Peroxonation (O_3/H_2O_2)	34
1.9.3.2	L'Ozonation (O_3)	34
CHAPITRE II Le Phénomène d'Adsorption		36
II.1	Historique	37
II.2	Principe	37
II.3	Caractéristiques de l'adsorption	37
II.3.1	Adsorption physique ou physisorption	37
II.3.2	Adsorption chimique ou chimisorption	38

II.4	Mécanisme d'adsorption	38
II.5	Facteurs Influçant le phénomène d'adsorption	39
II.5.1	L'adsorbant	39
II.5.2	Dimension des pores	39
II.5.3	Nature de l'adsorbant	40
II.5.3.1	Adsorbants polaires	40
II.5.3.2	Adsorbants apolaires	40
II.5.4	Adsorbat	40
II.6	Les conditions opératoires	40
II.7	La cinétique d'adsorption	41
II.8	Définition d'une isotherme d'adsorption	41
II.8.1	La quantité d'adsorbat	41
II.8.2	Calcul de la capacité d'adsorption	41
II.9	Classification des isothermes d'adsorption	42
II.9.1	Les hypothèses de classification	42
II.9.2	Les classes des isothermes	42
II.10	Les modèles d'isothermes	44
II.10.1	Modèle de Langmuir	44
II.10.2	Modèle de Freundlich	45
II.11	Application industrielle d'adsorption	45
II.12	Les propriétés des adsorbants	46
II.13	Les adsorbants	46
II.13.1	Introduction	46
II.13.2	Les adsorbants minéraux	46
II.13.2.1	Définition des minéraux	46
II.13.2.2	Méthode de nettoyage	47
II.13.2.3	Le bon nettoyage	47
II.13.2.4	La nature de minéral à nettoyer	48
II.13.2.5	La valorisation des minerais	48
II.13.2.6	Enrichissement des minéraux	49
II.13.2.7	Techniques de traitement du minerai	49
II.14	Aperçu sur l'adsorbant « Célestine »	50
II.14.1	Introduction	50
II.14.2	Origine de la Célestine	51
II.14.3	Les caractéristiques physico-chimiques de la poudre minérale de la Célestine	51
II.14.4	Purification	51
II.14.4.1	Purification à l'eau salée	52
II.14.5	Lavage de la poudre minérale	52

II.14.6	Utilisations de la Célestine	52
II.15	Présentation du secteur des mines en Algérie	53
II.15.1	Introduction	53
II.15.2	Le gisement de Célestine du Trias extrusif de Béni-Mansour (Béjaïa, Algérie)	54
II.15.2.1	Situation géographique et géologique du gisement	54
II.15.2.2	L'historique du minerai de Célestine de Beni Mansour	55
II.15.2.3	L'exploitation de gisement de Célestine à Beni Mansour	57
II.15.2.3.1	La table de secousse	58
II.15.2.3.2	Avantage des tables de secousses	58
II.15.2.4	Le rôle de concassage et le broyage	59
CHAPITRE III	Caractérisation d'un Adsorbant (Partie expérimentale)	61
III.1	Introduction	62
III.2	L'objectif de cette étude	62
III.3	Les variables étudiées	62
III.4	Matériels et méthodes	63
III.4.1	L'adsorbant	63
III.4.2	Préparation de l'adsorbant	63
III.5	Méthodes de caractérisation	63
III.5.1	Diffraction des rayons X	63
III.5.2	Analyse par MEB	64
III.6	Résultats et discussion	64
III.6.1	Caractérisation par DRX	64
III.6.2	Caractérisation par MEB	65
III.6.3	Analyse chimique granulaire des principaux éléments du minerai de Célestine de Beni Mansour par l'analyse FX	67
III.7	Conclusion	67
CONCLUSION GENERALE		69
LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		72

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est le cadeau le plus merveilleux de la nature. L'eau est le composé le plus utile et le plus abondant dans le monde. L'eau est non seulement essentielle pour la vie humaine, les animaux et les plantes, mais elle revêt également une importance unique dans les industries. L'industrie textile utilise cette ressource naturelle de manière très intensive pour appliquer des teintures et diverses finitions qui ont une forte teneur en matières en suspension, la chaleur, la couleur, la demande chimique en oxygène, l'acidité et de nombreuses autres substances solubles. Cela constitue d'énormes nuisances pour la santé humaine.

De manière générale, les colorants synthétiques sont des molécules comprenant un assemblage de structures aromatiques conjuguées (cycles benzéniques, anthracène, ...etc.), de groupes chromophores et auxochromes dont les principaux sont regroupés dans les chapitres suivants. En particulier, les différents colorants utilisés causent de sérieux problèmes en raison de leur stabilité et de leur faible biodégradabilité¹.

Ainsi, les réglementations environnementales ont amené les industries textiles à rechercher des solutions de traitement des eaux empoisonnées innovantes, avancées et efficaces.

Il existe certains procédés pour éliminer toutes les impuretés des eaux usées. Le processus principal comprend les procédés d'oxydation avancés, la coagulation chimique et la floculation mécanique et les techniques biologiques.

Une de ces techniques très fréquemment adoptée pour le traitement de l'eau et des effluents industriels est l'adsorption. Son principe repose sur la propriété qu'ont les solides à fixés sur leurs surfaces certains polluants tels que les colorants et les métaux lourds [1].

C'est dans ce contexte nous somme proposer de faire une étude sur l'adsorption et la capacité d'un adsorbant minier à fixer sur sa surface l'adsorbat. Elle s'agit d'une technique de séparation bien établie qui consiste à éliminer les polluants dilués dans des solutions aqueuses. Elle est adaptée comme une unité d'épuration des eaux usées.

Le minerai étudié s'agit de la Célestine (SrSO_4) qui dérive de la famille des sulfates, de structure chimique proche de celle de la Barytine, et composé essentiellement de l'élément Strontium qui est très utilisé dans différentes applications industrielles. La caractérisation de ce

¹ Décomposition de la matière organique par des micro-organismes comme les bactéries, les champignons et les algues.

minéral par les différentes méthodes d'analyse permet d'avoir des renseignements sur ces propriétés de surface et d'interface.

Ce mémoire se présente en deux parties, la première étant une synthèse bibliographique renfermant deux chapitres essentiels : le premier est consacré pour un aperçu sur les colorants synthétiques, le deuxième discute le phénomène d'adsorption et sa modélisation. Quant à la deuxième, elle est réservée à la caractérisation d'un adsorbant minéral qui s'agit de la Célestine par les méthodes d'analyse suivantes : DRX¹, FX² et MEB³ réalisée par ma promotrice au niveau de centre de recherche scientifique et technique en analyse physico-chimique (CRAPC) à Alger.

Cela nous permet de mieux aborder en conclusion un bilan de ce travail.

¹ Diffraction des rayons X.

² Fluorescence X.

³ Microscopie électronique à balayage.

CHAPITRE | **Les Colorants**

I.1 Généralités sur les colorants

Les colorants sont utilisés par de nombreux secteurs industriels (papier, textile, cuire, alimentaire) malgré les effluents dégagés contenant de forte concentration en colorants. Cela reste source de pollution souterraine et atmosphérique [2].

L'être humain depuis longtemps été fasciné par la couleur. Notion indispensable dans les domaines de l'art, de décoration, de l'artisanat et de la teinturerie. Il a d'abord utilisé des pigments¹ de terre colorée comme : l'oxyde de manganèse, l'hématite et l'ancre. Puis ceux de fibres végétales comme : Garance, Indigo, Gaude, campêche et d'autres animales (Cochenille) [3].

La coloration des substances résulte d'une absorption sélective de certaines radiations composant la lumière blanche, cette absorption est due à la présence d'une molécule de colorant de groupements fonctionnels insaturés appelés chromophores absorbant la lumière. Ces derniers sont insuffisants pour faire apparaître la coloration, ils absorbent dans l'UV² mais ils doivent être conjugués avec d'autres groupements chromophores pour que la molécule soit colorée. D'autres groupements fortement polaires acides ou basiques, amines, carboxyles, sulfonés et hydroxyles, appelés auxochromes. Leurs existences dans les molécules des colorants fait déplacer la longueur d'onde d'absorption vers les plus faibles énergies et ainsi rendent la coloration de ces composés plus visible [4].

La réduction voire l'élimination de ces colorants est nécessaire car ils sont source de toxicité. Pour cela des méthodes de traitements opérationnelles au niveau laboratoire et industriel existent déjà. Elles incluent des procédés physicochimique (adsorption, filtration, membranaire, méthodes de séparation solide-liquide, précipitation, coagulation et floculation, décantation) ou chimiques (résine échangeuse d'ions, oxydation par oxygène ou ozone), ou biologiques par traitement aérobie ou anaérobie [5].

I.2 Définition des colorants

Un colorant est une matière chimique organique ou minérale capable de se fixer sur un support (aliment, textile et papier) et possède outre sa couleur propre, la propriété de teindre. Cette propriété résultante d'une affinité particulière entre le colorant et la fibre [6]. La coloration plus ou moins intense des différentes substances est liée à leur constitution chimique, cela est particulièrement développé pour les colorants qui possèdent un caractère acide ou

¹ Substance chimique colorante insoluble dans le milieu qu'elle colore.

² Ultra-Violet

basique accentué. Les colorants sont des composés aromatiques dont les électrons très délocalisés peuvent absorber la lumière pour certaines longueurs d'ondes [7].

En général, les produits utilisés comme colorants sont des composés organiques insaturés et aromatiques.

A l'heure actuelle, la plupart des colorants employés sont des dérivés des hydrocarbures contenus dans le goudron de la houille.

I.3 Classification des colorants textiles

I.3.1 Classification tinctoriale

Les auxochromes définissent différentes catégories tinctoriales¹ en fonction de la solubilité dans le bain de teinture, L'affinité vis-à-vis la fibre choisie et le mode de fixation [8]. Ils sont principalement cités, comme suit :

I.3.1.1 Les colorants acides ou anioniques

Ils contiennent des groupes sulfonates ou carboxylates qu'ils les rend solubles dans l'eau, ils sont utiles pour teindre quelques fibres acryliques modifiées² en bain légèrement acide et ainsi les fibres animales (soie et laine). Des liaisons ioniques entre la partie acide sulfonique du colorant et les groupes amino (-NH₂) des fibres textiles sont à l'essentiel de l'affinité colorant-fibre [9].

Le pH des colorants acides (en dilution aqueuse) varie généralement entre 6 et 10. Certains colorants acides présentent une bonne stabilité en milieu.

A titre d'exemple la figure I.1 montre la formule développée du rouge Congo.

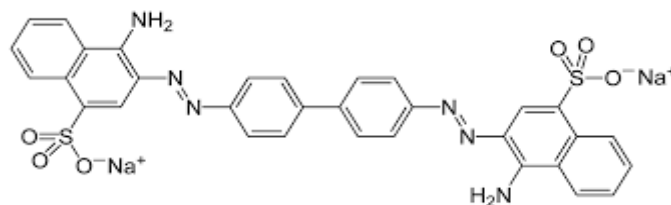


Figure I.1 Colorant rouge Congo.

¹ Par teinte.

² (Polyamide, Nylon).

I.3.1.2 Les colorants basiques ou cationiques

Les colorants basiques ou cationiques sont des cations colorés, ce sont des sels d'amines organiques et dérivés mono ou diazoïques et dérivés azino, ce qui leur donne le caractère de solubilité dans l'eau et les alcools. Ce type de colorants sont utilisés dans la teinture de la soie, la laine, quelques nylons et polyesters. Ces colorants marquent l'apparition des fibres acryliques permettant des nuances résistantes et vives. La figure I.2 montre des nuances de bleu de méthylène [10].

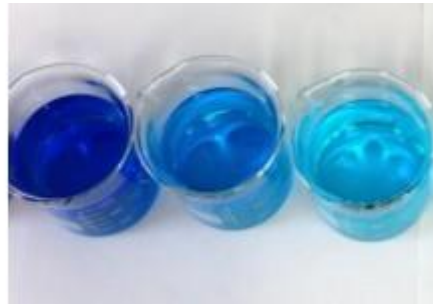


Figure I.2 Colorant Bleu Méthylène.

I.3.1.3 Les colorants de cuve

Ils sont insolubles dans l'eau, ils sont utilisés sur le lin, le coton, à l'image de l'indigo pour la teinture des articles de jean et autre fibres cellulosiques. Ils ont une bonne résistance aux agents de dégradation¹ [11].

I.3.1.4 Les colorants dispersés

Ils sont connus sous le nom plastosolubles², ils sont très peu solubles dans l'eau. Ils s'agissent d'une poudre fine dispersée dans le bain de teinture. Ils permettent de teindre l'acétate de cellulose. Les éléments violets, sur les fibres d'acétate de cellulose, ont tendance à changer de nuance sous l'effet de la chaleur [12]. La figure I.3 représente les divers pigments colorés sur un marché en Inde.



Figure I.3 Divers pigments colorés sur un marché en Inde.

¹ (Lavage, Rayons solaires).

² Sert à teindre les fibres artificiels et synthétiques.

I.3.1.5 Les colorants à mordants

Différents complexes colorés avec le textile sont formés grâce aux ligands fonctionnels contenant dans ces colorants qui sont aptes de réagir fortement avec le sel de cobalt, de chrome, d'aluminium, de nickel ou de fer. La figure I.4 représente la structure chimique de colorant mordant Blue 9 [13].

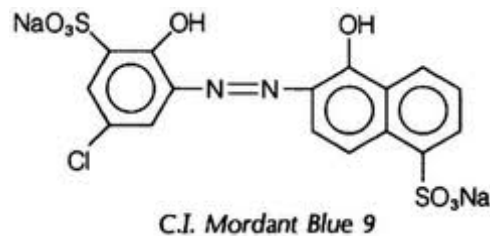


Figure I.4 Colorant Mordant Blue 9.

I.3.1.6 Les colorants développés ou azoïques insolubles (pigments)

Ils sont insolubles dans l'eau ce qui nécessite d'ajouter des liants pour assurer la cohésion avec le support. Ils sont utilisés beaucoup plus dans les colorations des peintures et des matières plastiques.

Ils sont directement formés sur la fibre. Lors de la première étape, le support textile est imprégné d'une solution de naphthol (copulant). Pour que la molécule se diffuse dans les pores, ses précurseurs sont suffisamment petits et les fibres sont ensuite traitées avec une solution de sel de diazonium en entraînant un développement immédiat du colorant azoïque [14]. La figure I.5 représente la structure chimique des colorants azoïques insolubles dans l'eau.

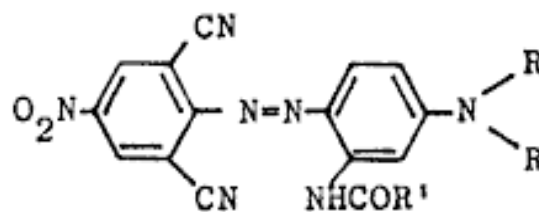


Figure I.5 Colorants azoïques insolubles dans l'eau.

I.3.2 Classification chimique

La structure chimique des colorants renseigne sur le classement des colorants qui se repose essentiellement sur le groupement chromophore.

Un chromophore est un groupement d'atomes comportant une ou plusieurs doubles liaisons, et formant avec le reste de la molécule une séquence de doubles liaisons conjuguées, c'est-à-dire une alternance de doubles et de simples liaisons. La figure I.6 montre la structure chimique d'un groupement chromophore [15].

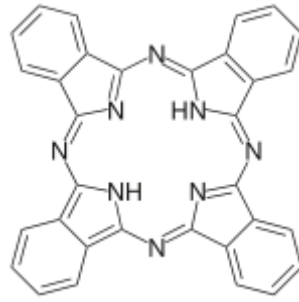


Figure I.6 Un groupement chromophore.

I.3.2.1 Les colorants indigoïdes

Ils dérivent de l'indigo, le composant le plus important de ces colorants, les homologues sélénisés soufré et oxygéné du bleu indigo provoquent d'importants effets hypochromes [16].

Propriétés chimiques de l'indigo :

- Formule brute : $C_{16}H_{10}N_2O_2$
- Masse molaire : $262,2628 \pm 0,0145$ g/mol

Propriétés physiques de l'indigo :

- T° fusion : 390 à 392 °C (sublimation) ;
- Solubilité : 990 $\mu\text{g/l}$ à 25 °C (insoluble) dans l'eau, insoluble dans l'éthanol ou l'éther à 20 °C.

La figure I.7 montre la structure chimique de l'indigo.

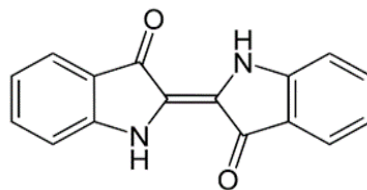


Figure I.7 Structure chimique de l'indigo.

I.3.2.2 Les Phtalocyanines

Dans ce type de colorants, une structure complexe basée sur l'atome de cuivre, tel que les colorants sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Ni, Pt, Cu, Co, ...) [17].

I.3.2.3 Les colorants triphénylméthanés

Les colorants triphénylméthanés ont une coloration bien intense dérivée de large système conjugué de l'ion cationique. La charge positive est fortement délocalisée grâce au carbocation central qui est en conjugaison avec les trois noyaux benzéniques [18]. Ils

constituent le type le plus ancien des colorants synthétiques, Comme le vert malachite. La figure I.8 montre la structure chimique du vert de malachite.

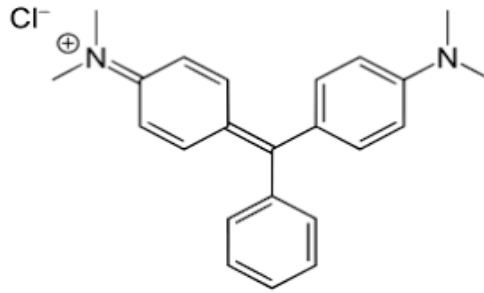


Figure I.8 Vert de malachite.

I.3.2.4 Les colorants xanthes

Ces colorants sont caractérisés par leur intense fluorescence. Le composé le plus connu est la fluorescéine qui peut être utilisée en tant que teinture marqueur et traceur d'écoulement pour des rivières souterraines [19]. La figure I.9 représente la structure chimique de la fluorescéine.

La fluorescéine :

- Formule : $C_{20}H_{12}O_5$
- Masse molaire : 332,31 g/mol
- Spectre d'absorption : λ_{max} 494 nm
- Formule brute : $C_{20}H_{12}O_5$

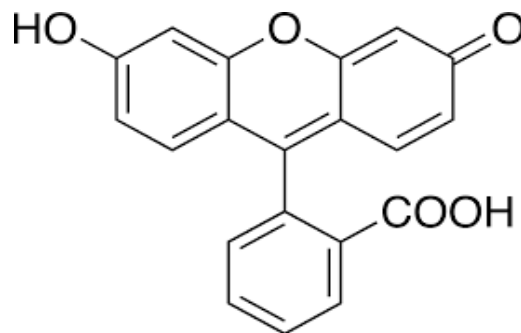


Figure I.9 Structure chimique de la fluorescéine.

I.3.2.5 Les colorants anthraquinoniques

La formule générale dérivé de l'anthracène montre que le chromophore est un noyau quinonique sur lequel s'attache des groupements amines ou hydroxyles. Ces produits sont utilisés pour la coloration des fibres polyesters, acétate et triacétate de cellulose [20].

I.3.2.6 Les colorants nitrés et nitrosés

Ils ont une structure moléculaire qui comporte un groupe nitro(-NO₂) en position ortho d'un groupement électro donneur (groupes amines ou hydroxyles). Ces colorants forment une classe très limitée en nombre et relativement ancienne [21]. La figure I.10 montre la structure chimique d'un composé aromatique.

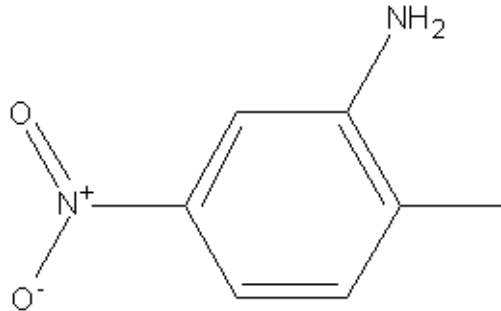


Figure I.10 Nitrés, composés aromatiques.

I.3.2.7 Les colorants azoïques

Ils se trouvent au sein de la molécule d'un groupement azoïque (-N=N-) reliant deux noyaux benzéniques. L'Azobenzène est la plus petite molécule dans cette famille [22]. La figure I.11 montre la structure chimique de l'Azobenzène.

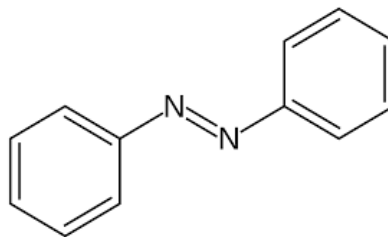


Figure I.11 Structure chimique de l'Azobenzène.

Le tableau I-1 ci-dessous représente les différents groupements chromophores et auxochromes.

Tableau I.1 Les groupements chromophores et auxochromes.

Groupements chromophores	Groupements auxochromes
Azo (-N=N-)	Amino (-NH ₂)
Nitroso (-NO ou -N-OH)	Méthylamino (-NHCH ₃)
Carbonyl (=C=O)	Diméthylamino (-N(CH ₃) ₂)
Vinyl (-C=C-)	Hydroxyl (-HO)
Nitro (-NO ₂ ou =NO-OH)	Alkoxy (-OR)
Sulfure (>C=S)	Groupes donneurs d'électrons

I.4 L'Utilisation des colorants

Les grands domaines d'application des colorants y compris sous la forme de pigments sont les suivants :

- Textiles : 60%
- Papier : 10%
- Matière plastique et élastomères : 10%
- Cuirs et fourrures : 3%

Les autres applications aussi sur le bois, la photographie et la peinture de bâtiments [23].

Le domaine de teinturerie est un colorant soluble qui donne sa couleur à la solution. Son application à un support nécessite un mordant qui le transforme en pigment alors que la solution imprègne les fibres, ou un fixateur qui le relie chimiquement au support.

En pharmacie, une teinture est une « solution médicamenteuse obtenue par action prolongée de l'alcool sur des substances », qu'elle soit colorée comme la teinture d'iode ou non.

En biologie, un pigment est une molécule organique qui communique sa couleur à divers tissus et liquides organiques (chlorophylle, hémoglobine, ...).

On appelle « colorant » un produit de coloration qu'on ajoute aux préparations à étudier au microscope.

I.5 Aperçu sur les colorants alimentaires

Colorant alimentaire ou additif de couleur, tout colorant ou pigment ou une substance qui confère une couleur quand il est ajouté à la nourriture ou la boisson.

Les colorants sont des additifs alimentaires tout comme les conservateurs, les antioxydants, les émulsifiants, les acidifiants, les arômes, les exhausteurs de goût et pour finir les édulcorants. La lettre « E » associée à un numéro, variant entre 100 et 199, sont attribués à chaque colorant, ce qui permet de les classer et les reconnaître.

Ils se présentent sous plusieurs formes composées de liquides, poudres, gels et pâtes. Un colorant alimentaire est utilisé à la fois dans la production alimentaire et commerciale dans la cuisine domestique. Ils sont aussi utilisés dans une variété d'applications non alimentaires, y compris les cosmétiques, les produits pharmaceutiques, des projets d'artisanat à domicile, et des dispositifs médicaux [24].

I.5.1 Histoire des colorants alimentaires artificiels

L'ajout des colorants à des aliments est sensé s'être produit dans les villes égyptiennes dès 1500 avant JC, lorsque les fabrications des bonbons ajoutés des extraits naturels, du vin et les rendre plus épais. Le safran, colorant végétal de couleur jaune, était déjà utilisé par eux pour colorer les aliments. Au cours de Moyen Age, l'économie dans les pays européens est basée sur l'agriculture et les paysans avaient l'habitude de produire leur propre nourriture locale ou le commerce dans les communautés villageoises, les aspects esthétiques ne sont pas considérés. Au début de l'être moderne, alors que le commerce a émergé, en particulier l'importation des épices précieuses et des couleurs. Il était l'objet d'un commerce actif en Provence, ou les Phocéens avaient importé le safran d'Asie. Le reverdissage des légumes est largement pratiqué en Europe, les aliments sont plus estimés quand ils possèdent une belle couleur verte, notamment les haricots verts et les cornichons [25].

En 1856, le premier colorant artificiel fut découvert par hasard par William Henry Perkin (mauvéine). C'est grâce à cette découverte que l'industrie des colorants a été lancée. Les premières utilisations des colorants artificiels étaient destinées à la coloration d'habits et au fil du temps, on les utilise également pour les denrées alimentaires. Au début de la révolution industrielle, les gens sont devenus dépendants des aliments produits par d'autres. Ces citoyens ont demandé la nourriture à faible coût.

L'utilisation abusive des colorants artificiels (certains pouvant être potentiellement dangereux) a obligé le législateur à publier une réglementation qui limite le nombre de colorants autorisés et leurs concentrations dans les denrées. D'ailleurs certains colorants ont même été interdits dans certains pays. La Tartrazine (E102) et le Rouge Allura AC (E129), deux colorants parmi les plus toxiques, sont interdits en Amérique et leur usage est très réglementés en France. Ces colorants provoquent généralement de l'hyperactivité chez les enfants cette maladie est de plus en plus présente [26].

I.5.2 Objet des colorants alimentaires

Les gens associent certaines couleurs avec certaines saveurs, et la couleur des aliments peuvent influencer le goût perçu dans quoi que ce soit de bonbons à vin. Parfois, le but de simuler une couleur qui est perçue par le consommateur comme naturelle, comme de l'ajout de colorant rouge glacé cerises, mais il est parfois pour effet, comme le vert ketchup que Heinz a lancé en 1999 [27]. Les additifs colorants sont utilisés dans les aliments pour de nombreuses raisons, notamment :

- Pour rendre la nourriture plus attrayante, appétissante, et instructive compenser la perte de couleur due à la lumière, l'air, des températures externes, les conditions d'humidité et de stockage. Corriger les variations naturelles de couleur.
- Améliorer les couleurs qui se produisent naturellement.
- Donner de la couleur à l'incolore et « fun » aliments.
- Permettre aux consommateurs d'identifier les produits à vue, comme des arômes de bonbons ou les doses de médicaments.

La couleur la plus ancienne est la C-X-Rose colour Index de 1924 ; est apparue ensuite de Schultz en 1931 et enfin celle de le D.F. G en 1957. Actuellement, les pays de la communauté européenne 89/107/CEE ont intégré les colorants dans la classification générale des additifs. Ils sont numérotés de 100 à 199 et sont précédés des deux lettres CE (par exemple CE.100 à 199) [28]. Leur utilisation touche des domaines tels que :

- La liquorerie telles que les liqueurs verts, mauves, roses, ...etc.
- La confiserie pour les bonbons, dragées, pâtes des fruits.
- La siroperie et la limonaderie.
- La pâtisserie tant pour les gâteaux et les tartes que pour les biscuits secs.
- La fromagerie, le beurre et la margarine (coloration en jaune).

I.5.3 Aperçu sur la Rhodamine B

La Rhodamine B est un composé organique colorant (teinture) fluorescente détectables par des fluoromètres [29].

I.5.4 L'utilisation de la Rhodamine B

Comme les autres rhodamines, elle est souvent utilisée comme colorant traceur dans l'eau pour déterminer le volume, débit et direction d'écoulement et de transport.

Elle est utilisée en microbiologie comme colorant fluorescent histologique. Elle émet vers 610 nm quand elle est utilisée dans un laser à colorants.

Elle est utilisée pour l'impression du papier, la teinture des textiles, les industries de cuir et de peinture.

La Rhodamine est utilisée comme colorant alimentaire et additif dans plusieurs aliments comme les saucisses traditionnelles, le poivron rouge. Elle est difficilement identifiable et qui n'a aucun intérêt hygiénique connu autre qu'esthétique [30].

I.5.5 La solubilité de la Rhodamine

La solubilité de la Rhodamine B dans l'eau est de 50g /l. Cependant la solubilité dans une solution aqueuse d'acide acétique à 30% en volume est de 400 g /l. Une eau du robinet chlorée décompose la Rhodamine B. Les plastiques absorbent la Rhodamine B de ces solutions ainsi celles-ci doivent être gardées dans des récipients en verre. Elle est aussi soluble dans le méthanol et l'éthanol [31].

I.5.6 Structure de la Rhodamine B

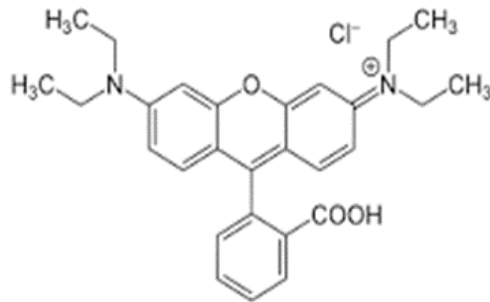


Figure I.12 Rhodamine B.

- **Formule brute** : $C_{28}H_{30}N_2O_3 \cdot HCl$
- **Autres dénominations** : Chlorure de 9-(2-carboxyphényl) -3,6-bis (diéthylamino) xanthylum, basic violet 10, tétraéthylrhodamine, rose brillant B.

I.5.7 Propriétés physicochimiques de la Rhodamine B

- Masse molaire : 479,01 g/mol
- Masse volumique: $g \cdot cm^{-3}$ 0,79
- Température de décomposition : 210-211 °C
- Solubilité : Eau : 50 g/l



Figure I.13 Solubilité de la Rhodamine B.

I.5.8 Toxicité de la Rhodamine

Irritant, dangereux et a un effet empoisonnant pour l'environnement. Risque de lésions oculaires graves et des allergies. Nocif pour les organismes aquatiques, peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique et perturbe son équilibre écologique [32].

En Californie, la Rhodamine B est classée comme composé suspecté d'être cancérigène et tous les produits en contenant doivent l'indiquer clairement.

I.6 Toxicité des colorants synthétiques

I.6.1 Toxicité des colorants indigoïdes

Ils sont très toxiques, cancérigènes et peuvent produire et /ou développer une toxicité neuronale aigüe et des tumeurs à l'emplacement de leur application. Lors de leur contact causent des irritations de peau et d'œil et des dommages à la cornée et sa conjonctivité. L'indigo carmine, en injection intraveineuse pour le diagnostic du système urinaire, peut provoquer des hypertensions graves, effets cardiovasculaires et respiratoires pour les patients. Comme il peut aussi causer des irritations gastro intestinales avec la nausée, vomissement et diarrhée. Il cause une toxicité à long terme chez les souris et une toxicité à court terme chez le porc, d'après les essais de toxicité du colorant [33].

I.6.2 Toxicité des triphénylméthanes

Ce sont des composés génotoxiques pour les cellules mammifères et bactériennes. Le vert de malachite est plus utilisé en industrie et comme antifongique, est un composé fortement cytotoxique pour les mammifères. Son homologue, le cristal violet, est dégradé par digestion bactérienne en une cétone de Mischler et p-diméthylaminophénol. Ces composés sont facilement transformés par biodégradation en amines cancérigènes. Un subissement de ces composés à un traitement biologique peut rendre la solution plus toxique que celle de départ [34].

I.6.3 Toxicité des Xanthines

L'érythrosine B, un colorant xanthine décrit chimiquement comme tétraiodofluorescéine¹, était phytotoxique pour le troisième étage des larves de ces parasites. Ces colorants, ont été montrés pour rehausser l'activité antivirale de quelques composés spécifiques.

¹ Composé chimique à base de Diode de formule brute : $C_{20}H_6I_4Na_2O_5$

L'effet toxique de ces colorants sur les organismes vivants est réalisé par la réaction de photooxydation légère dépendante ou encore appelé action photo dynamique [35].

I.6.4 Toxicité des colorants azoïques

Les colorants diazo et cationiques sont considérés comme ceux les plus toxiques. Les groupements azo génèrent des déficiences électroniques, d'où ils sont moins disposés au catabolisme oxydatif dans les milieux aérobies vessie. L'Azobenzène, l'amarante, la tartrazine et le rouge cochenille sont des composés génotoxiques néfaste pour l'être humain et ils ont été retirés des listes de colorants alimentaires dans plusieurs pays.

La toxicité des azoïques revient à la présence des substituants sur le noyau aromatique comme les groupes nitro(-NO) et halogènes (Cl) [36].

Selon l'EPA¹, l'estimation des risques de cancer impose de fixer une concentration limite de 3,1 µg/l en colorant azoïque dans l'eau potable.

L'exposition prolongée aux colorants azoïques provoque les cancers de la vessie. Les effets cancérigènes dues aux dérivés amines qui se transforment en amino cancérigène sous l'action enzymatique (enzyme azo-reductase P450) des organismes mammifères incluant l'homme.

I.7 Toxicité et impact environnemental

Les colorants sont largement utilisés dans les industries textiles pour leur stabilité chimique et la facilité de leur synthèse et leur variété de couleurs. Cependant, ces colorants sont à l'origine de la pollution une fois évacués dans l'environnement, la production mondiale est estimée à plus de 800 000 t/an et les colorants azoïques sont majoritaires et représentent 60-70%.

Les rejets d'effluents de ces industries, chargés en colorants, dans les rivières, peuvent nuire aux espèces végétales, animales et micro-organismes vivant des eaux. Cette toxicité, pourrait être liée à la diminution de l'oxygène dissout dans ces milieux. Leur très faible biodégradabilité, due à leur poids moléculaire élevé et à leur structures complexes, confère à ces composés un caractère toxique et une persistance dans le milieu qui perturbe les mécanismes naturels existant dans la flore (pouvoir d'autoépuration² des cours d'eau, inhibition de la

¹ Environmental Protection Agency.

² Ensembles des processus biologique, chimique et physique permettant à un sol ou un écosystème aquatique équilibré de transformer ou d'éliminer les substances qui lui sont apporté (pollution), de manière définitive (autoépuration vraie) ou temporaire.

croissance des végétaux aquatiques, ...) et dans la faune (destruction d'une catégorie de poissons, des microorganismes, ...). Les données bibliographiques ont mentionné que :

- Le colorant « noir de l'uxanthol G » est très nocif pour les jeunes guppies à la concentration de 5 mg/l [37].
- Le bleu méthylène est toxique pour les algues et les petits crustacés à partir des concentrations de 0,1 mg/l et de 2 mg/l respectivement [38].
- Les colorants cationiques (ou basiques) résistent à toute oxydation et très toxiques pour les micro-organismes.

Ainsi, plusieurs substances chimiques qui ont des impacts importants sur l'environnement sont dus aux sels, détergents et aux acides organiques. Le rejet de ces eaux dans l'écosystème source dramatique de pollution, d'eutrophisation et perturbation non esthétique dans la vie aquatique, cela présente un danger potentiel de bioaccumulation qui peut affecter l'homme par transport à travers la chaîne alimentaire.

Finalement, les activités textiles concernent les rejets dans l'eau, les émissions dans l'air ainsi que la consommation d'énergie.

I.8 Le danger des rejets textiles

I.8.1 Les dangers évidents

I.8.1.1 Eutrophisation

Différents ions peuvent être évacués dans le milieu naturel tel que le phosphate, utilisé comme détergent lors de processus d'ennoblissement ou le nitrate libéré sous l'action des microorganismes sur les colorants. Ces ions minéraux introduits en quantité trop importante peuvent devenir toxique pour la vie piscicole et altérer la production d'eau potable. Leur consommation par les plantes aquatiques accélère la prolifération anarchique¹ de celles-ci et conduit à l'appauvrissement en oxygène par inhibition de la photosynthèse dans les strates les plus profondes des cours d'eaux stagnantes [39].

I.8.1.2 Sous-oxygénation

Les rejets ponctuels apportent des masses importantes de matière organique, les procédés naturels de régulation ne peuvent plus compenser la consommation bactérienne d'oxygène. L'étude faite par MANAHAN estime que la dégradation de 7 à 8 mg de matière

¹ Multiplication rapide d'êtres vivants, de choses : prolifération de cafards, suite de division cellulaires rapides.

organique par les microorganismes suffit pour consommer l'oxygène contenu dans un litre d'eau [40].

I.8.1.3 Couleur, Turbidité, Odeur

Willmott et al. ont estimé que l'être humain peut percevoir une coloration à l'ordre de $5 \cdot 10^{-6} \text{g/l}$, en dehors de l'aspect inesthétique, les agents colorants ont la capacité d'interférer avec la transmission de la lumière dans l'eau, ce qui bloque la photosynthèse des plantes aquatiques [41].

I.8.2 Les dangers à long terme

I.8.2.1 La persistance

L'épuration des colorants organiques synthétiques est impossible par dégradation biologique naturelle, cela est due aux raisons suivantes :

- Les alcanes sont moins persistants que les aromatiques ;
- Les composés insaturés sont moins persistants que les saturés ;
- La persistance des aromatiques augmente avec le nombre de substituants ;
- La persistance des colorants est augmentée plus par les substituants halogènes que par les groupements alkyles [42].

I.8.2.2 Bioaccumulation

Pour certains organismes qui ne disposent pas d'une capacité à absorber et concentrer dans tout ou une partie de leur organisme certaines substances chimiques afin de l'éliminer, ou empêcher sa résorption, ces substances s'accumulent. A titre d'exemple, les bio concentrateurs tels que les champignons sont des aliments recherchés ; quand ils sont récoltés dans l'environnement naturellement riches en métaux ou pollués par l'homme, ils sont une source d'éléments indésirables ou toxiques dans l'alimentation humaine. Le risque est particulièrement élevé dans les régions industrielles, autour des fonderies et sur les friches industrielles laissées par la métallurgie et certaines mines [43].

I.8.2.3 Cancer

La toxicité des divers colorants apparaisse significativement dans leurs métabolites. Tel qu'après la dégradation de la molécule initiale en sous-produits d'oxydation : amine cancérogène pour les azotiques, leuco-dérivé pour les triphénylméthanés, elles apparaissent leurs effets mutagènes, tératogène ou cancérogène [44].

I.8.2.4 Sous-produits de coloration (SPC)

Les SPC sont responsable de développement de cancer du foie, des poumons, des reins et de la peau chez l'homme. Ceci lorsque le chlore est utilisé pour but d'éliminer les microorganismes pathogènes réagit avec la matière organique pour former des THM¹ qui peuvent atteindre plusieurs centaines de mg /l [45].

I.9 Méthodes de traitements des colorants (Actions curatives)

Le secteur textile est une activité qui génère la moitié des flux industriels de pollution. Les effluents issus de ce secteur peuvent être très colorés et difficile à traiter. La coloration de ces eaux usées est de plus en plus perçue comme une nuisance importante. La plus grande part des effluents est représentée par l'ennoblissement qui englobe les prétraitements (désencollage, blanchissement), la teinture ou l'impression et les opérations qui confèrent aux fibres textiles des propriétés particulières. Le traitement de ces colorants semble présenter un intérêt scientifique majeur.

La majorité de ces traitements sont des grands consommateurs d'eau (200 l/Kg en moyenne) face aux quantités plus ou moins importantes de colorants qui sont perdus par manque d'affinité avec les surfaces à teindre ou à colorer et se retrouve dans les rejets toxiques.

Le tableau I-2 met en évidence le taux de fixation sur textile pour différentes classes de colorants.

Tableau I.2 Taux de fixation sur textile pour différentes classes de colorants.

<i>Classe de colorant</i>	<i>Fibre utilisé</i>	<i>Fixation</i>	<i>Rejet (%)</i>
Acides	Laine, nylon	80- 93	7- 20
Basiques	Acrylique	97- 98	2- 3
De cuve	Cellulose	80- 95	5-20
Directe	Cellulose	70- 95	5- 30
Dispersé	Synthétique	80- 92	8- 20
Réactif	Cellulose	50- 80	20- 50
Dispersé	Cellulose	60-70	30- 40

En effet, les colorants se fixent sur les fibres textiles par des liaisons de type Van der Waals, hydrogènes et interactions hydrophobes. Le lien très fort fibre – colorant au sein du

¹ Trihalométhanes.

complexe est renforcé par une interaction électrostatique additionnelle quand le colorant et la fibre présentent des charges opposées

Le traitement des rejets textiles prend en compte leur composition très hétérogène qui suggère une suite particulière de traitement. La première étape consiste à éliminer la pollution insoluble par l'intermédiaire de prétraitements (dégrillage, dessablage, déshuilage ...) et /ou de traitements physiques ou physico-chimiques assurant une séparation solide-liquide. Les techniques de dépollution adaptées en deuxième étape, se partage en trois étapes : Physique, chimique et biologique [46].

Biologique :

- Traitement aérobie ;
- Traitement anaérobie.

Physique :

- Méthode de précipitation (coagulation, floculation, sédimentation) ;
- Adsorption (sur charbon actif) ;
- Osmose inverse, filtration ;
- Incinération.

Chimique :

- Oxydation (oxygène, ozone, oxydants tel que NaOCl, H₂O₂) ;
- Réduction (Na₂S₂O₄) ;
- Méthode complexométrique ;
- Résine échangeuse d'ions.

Les procédés les plus couramment rencontrés seront abordés dans les paragraphes suivants. Nous prendrons soin d'évoquer leurs avantages et inconvénients vis-à-vis du traitement des colorants.

I.9.1 Les méthodes biologiques

Il apparait donc intéressant de mettre au point des traitements alternatifs, notamment par voie biologique, qui ont l'avantage d'être moins coûteux, moins polluants et plus efficaces car plus spécifiques. L'élimination des polluants organiques par les microorganismes est efficace pour l'épuration des milieux naturels et s'applique selon deux modes : traitement en aérobie ; en présence de l'oxygène et autre anaérobie ; en absence d'oxygène [47].

I.9.1.1 Traitement aérobic

La biodégradation de la matière organique est convertie en dioxyde de carbone et en eau, une adsorption des micropolluants se fait sur biofilm ou floc. Le procédé nécessite une biomasse aérobie active et un apport important d'oxygène dans le réacteur afin que le traitement puisse avoir lieu.

Des réacteurs dits « lits bactériens » fixés constitués d'une boue activée subissent des aérations forcées entraînant des flux. Après épuration, l'eau est rejetée en rivières, lac ou littoral, la boue est séparée des eaux usées par sédimentation dans un décanteur, et ainsi un recyclage partiel de l'eau. Les azoïques, les colorants réactifs et acides sont révélés persistants à ce mode de traitement [48].

I.9.1.2 Traitement anaérobie

L'assimilation anaérobie des composés organiques en l'absence de l'oxygène. Conduit à la formation du dioxyde de carbone, du méthane et de l'eau. La décomposition biologique anaérobie est utilisée pour traiter des effluents fortement chargés caractérisés par une DCO¹ élevée ainsi les boues produites par les procédés aérobie (digestion des boues) veulent dire production moindre de boues [49].

I.9.1.2.1 Avantages et inconvénients

Parmi ses avantages :

- Pas d'équipement d'aération (économie d'énergie 25%) ;
- Moins de boues à disposer (2 à 5 fois moins qu'en aérobie) ;
- Les boues n'ont pas besoin de stabilisation ;
- Traitement de fortes charges (1 à 30 g/l) ;
- Production de méthane pour fourniture d'énergie ;
- La biomasse peut demeurer sans alimentation en substrat jusqu'à 3 semaines ;
- Besoins en N, P² moindres ;
- Réduit fortement les pathogènes.

Parmi ses inconvénients :

- Temps de séjour important (grand volume de réacteur requis) ;
- Mauvaises odeurs (H₂S)³ ;

¹ Demande chimique en Oxygène.

² Azote, Phosphore.

³ Sulfure d'Hydrogène.

- Température élevées requise ;
- Sédimentation de biomasse anaérobie plus difficile que celle des boues activées (surface et coût plus élevé) ;
- Risque inhérent au biogaz (incendie, explosion) ;
- La réduction de coloration par ces procédés et estimée à seulement 10 à 20 %.

I.9.2 Les méthodes physiques

Les traitements physico-chimiques communs (adsorption, coagulation/floculation et précipitation, ...) sont couramment utilisés pour les effluents industriels. Malgré leur rapidité, ces méthodes se sont avérées peu efficaces compte tenu des normes exigées sur ces rejets [50].

I.9.2.1 Méthode physico-chimique : coagulation/floculation

Ce procédé d'épuration de l'eau, utilisé pour le traitement de potabilisation ou le traitement d'eau usée, son principe repose sur la difficulté qu'ont certaines particules à se décanter naturellement : les colloïdales. Elles facilitent leur élimination en les rassemblant sous forme de floc dont la séparation est ensuite effectuée par des systèmes de décantation, flottation et/ou filtration. La décoloration des effluents textiles contenant des colorants dispersés, de cuve et soufrés est satisfaisante en disposant des coagulants inorganiques tels que l'alun, elle est inefficace pour les colorants réactifs, azoïques, acides et basiques. Les colorants fortement solubles dans l'eau ne peuvent être traités par ce procédé [51].

I.9.2.2 Filtration sur membrane

Cette technique est utilisée dans le dessalement de l'eau de mer, où les polluants sont retenus par une membrane semi perméable dont le diamètre des pores est inférieur à celui des molécules à éliminer. Selon l'eau désirée, on distingue la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration ou encore l'osmose inverse.

La nanofiltration s'applique au traitement des bains de teinture de colorants réactifs tandis que la microfiltration retient les matériaux colloïdaux comme les colorants dispersés ou de cuve.

L'ultrafiltration s'applique uniquement à la réduction de la DCO et des solides en suspension.

Ces techniques restent limitées dans leurs applications car ils nécessitent des investissements importants [52].

I.9.2.3 Adsorption sur un support solide

L'adsorption est un phénomène physico-chimique définit la propriété de certains matériaux de fixer à leur surface des ions ou des molécules organiques.

Les adsorbants industriels comme le charbon actif sont considérés comme les plus efficaces. Ce mode reste très limité pour l'élimination de tous les colorants, ceux qui sont éliminés par cette technique sont les colorants à mordant, dispersés ou dits de cuve et réactifs.

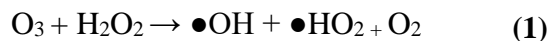
Enfin, l'adsorption des colorants alimentaires sur support solide qui fait l'objet de notre travail, sera abordé plus spécifiquement dans le deuxième chapitre [53].

I.9.3 Les méthodes chimiques

Parmi les procédés de traitement chimique, ceux d'oxydation. La décoloration et la dégradation des colorants gouvernés par les réactions oxydantes dont l'efficacité dépend de la concentration en oxygène. Le principal inconvénient est le manque de connaissance des produits de dégradation générés. Les produits finaux pouvant être plus toxique que les colorants de départ [54].

I.9.3.1 La Peroxonation (O_3/H_2O_2)

Les radicaux hydroxyles, principaux intermédiaires oxydants de la peroxonation, sont formés par réaction entre l'ozone et le peroxyde d'hydrogène [55] :



I.9.3.2 L'Ozonation (O_3)

L'ozone, oxydant puissant, se décompose rapidement en dioxygène et oxygène atomique. L'emploi de l'ozone sur les colorants a montré que les effluents chargés réagissent différemment selon leur composition. Les rejets contenant des colorants dispersés et soufrés sont particulièrement difficiles à décolorer, alors que ceux chargés de colorants réactifs, basiques, acides et directs le sont assez rapidement. Bien que le pouvoir oxydant de l'ozone soit élevé, une minéralisation complète par ozonation est très difficile. L'inconvénient de cette méthode, elle est limitée par la très faible solubilité de O_3 dans l'eau, et aussi impose des coûts élevés en énergie électrique consommée.

En revanche, ces deux méthodes présentent l'avantage, par rapport aux procédés avec irradiation UV, de pouvoir fonctionner dans une eau à forte turbidité, car le système ne dépend pas de la transmission des rayonnements dans l'effluent. Ainsi le peroxyde est un oxydant fort très employé dans le traitement des polluants organiques et inorganiques [56].

Comme telles techniques sont généralement utilisées pour :

- Le traitement des eaux usées chargées de constituants résistants aux méthodes de biodégradation ;
- Le traitement des impuretés organiques toxiques présents en faibles proportion ;
- En post-traitement pour réduire la toxicité aquatique ;
- Le prétraitement avant les procédés biologiques pour diminuer la charge polluante.

CHAPITRE II **Le Phénomène d'Adsorption**

II.1 Historique

L'adsorption présente le principe de base de procédé de séparation et la technique la plus adoptée pour le traitement de l'eau et les effluents industriels.

Ce phénomène était utilisé depuis très longtemps dans la vie pratique, il été observé initialement dans les liquides par Lowitz en 1785, ouvrant la voie à de nombreuses applications industrielles telles que la purification d'eau ou d'air. Ainsi, il est aussi réalisé dans une raffinerie de canne à sucre pour décolorer les sirops. En 1860, le charbon de bois a été utilisé pour éliminer le goût et les odeurs des eaux. Le terme adsorption a été proposé pour la première fois par Kayser en 1881 pour différencier entre une condensation de gaz à la surface d'un solide, et une adsorption de gaz, processus dans lequel les molécules de gaz s'adsorbent à la surface du solide. En 1909, Mc Bain a proposé le terme de sorption qui désigne le même procédé. En 1914, la première analyse théorique de fixation d'une monocouche d'adsorbat sur une surface homogène sous la forme d'une équation, l'isotherme de Langmuir [57].

II.2 Principe

L'adsorption est un phénomène de surface par lequel des molécules de gaz ou du liquide (adsorbats) se fixent sur les surfaces solides des adsorbants selon divers processus plus au moins intenses : on distingue souvent la chimisorption et la physisorption. Le phénomène inverse par lequel les molécules se détachent est « la désorption ».

De plus, l'adsorption est un phénomène spontané et se produit dès qu'une surface solide est mise en contact avec un gaz ou un liquide. On appelle généralement « adsorbat » la molécule qui s'adsorbe et « adsorbant » le solide sur lequel se fixe la molécule.

Les interactions entre adsorbant et adsorbat sont le plus souvent de nature électrostatique, donc faibles et réversibles [58].

II.3 Caractéristiques de l'adsorption

Selon la nature des interactions qui retient l'adsorbat sur la surface de l'adsorbant, l'adsorption peut être classée en deux familles :

II.3.1 Adsorption physique ou physisorption

L'adsorption est dite adsorption physique lorsqu'elle met en jeu des liaisons faibles, du type forces de Van der Waals entre les espèces chimiques adsorbées et l'adsorbant. Ces liaisons sont dues au mouvement des électrons à l'intérieur des molécules qui peuvent engendrer des petits moments dipolaires instantanés [59]. La physisorption permet de mesurer la surface spécifique du solide adsorbant et la taille moyenne des pores grâce à des critères :

- La réversibilité complète de ce phénomène ;
- L'adsorption se fait en multicouches ;
- La chaleur d'adsorption dégagée est d'environ 20 KJ/mol ;
- La vitesse du processus d'adsorption est très rapide ;
- La quantité adsorbée est inversement proportionnelle avec la température.

II.3.2 Adsorption chimique ou chimisorption

L'adsorption chimique met en jeu des énergies de liaisons importantes, du type liaisons covalentes, ioniques ou métallique entre les espèces chimiques adsorbées et l'adsorbant. Elle est souvent irréversible (ou difficilement réversible) [60].

Comme elle nécessite la formation des interactions de forte énergie de l'ordre de 200 KJ/mol et à courte distance.

La chimisorption intervient dans le mécanisme des réactions catalytiques hétérogènes et engendre la formation d'une couche mono moléculaire. Le tableau ci-dessous montre la différence entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.

Tableau II.1 Principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.

<i>Propriétés</i>	<i>Adsorption physique</i>	<i>Adsorption chimique</i>
Energie d'adsorption	5 à 10 Kcal/mol	10 à 100 Kcal/mol
Température	Basse	Elevé
Nature de liaisons	Physique	Chimique
Energie d'activation	Non appréciable	Importante
Cinétique	Très rapide	Lente
Etat de surface	Formation de multicouches	Formation d'une monocouche
Désorption	Plus ou moins parfaite	Difficile

II.4 Mécanisme d'adsorption

L'adsorption se fait principalement en trois étapes :

Le soluté passe par différentes étapes avant son adsorption :

1. Diffusion de l'adsorbat de la phase liquide externe vers celle située au voisinage de la surface de l'adsorbant.
2. Diffusion extra granulaire de matière (transfert de soluté (adsorbat)) vers la surface des grains (adsorbant) ;

3. Diffusion intra granulaire de la matière dans la structure poreuse de la surface extérieure des grains vers les sites actifs) ;
4. Réaction d'adsorption au contact des sites actifs, une fois adsorbée, la molécule est considérée comme immobile [61].

La figure II.1 montre les domaines d'existence d'un soluté lors de l'adsorption sur un matériau microporeux¹.

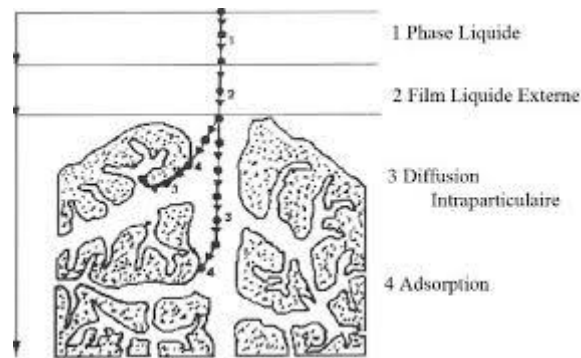


Figure II.1 Domaines d'existence d'un soluté lors de l'adsorption sur un matériau microporeux.

II.5 Facteurs Influençant le phénomène d'adsorption

Le transfert des polluants est régi par trois phénomènes physico-chimiques :

L'équilibre thermodynamique entre les deux phases qui exprime la limite du procédé, la cinétique d'adsorption et la compétition entre les différents adsorbats. Ce système a trois composants : adsorbant, adsorbat, solvant. Plusieurs facteurs vont donc influencer sur ce phénomène :

II.5.1 L'adsorbant

Au sens strict, tous les solides sont des adsorbants. Cependant, seuls les adsorbants ayant une surface spécifique suffisante (surface par unité de masse) peuvent avoir des intérêts pratiques. Pour l'adsorbant, ses propriétés texturales et ses fonctionnalités sont déterminantes pour l'adsorption, son influence peut être liée aux dimensions des pores, à la surface spécifique [62].

II.5.2 Dimension des pores

L'essentiel des propriétés physiques d'adsorbant se rapporte donc à la description de sa porosité. Son rôle est plus important lors de l'adsorption des corps dissous, que lors de celle de gaz, du fait que les dimensions des particules des corps dissous peuvent varier dans les limites plus vastes que les dimensions des particules des gaz. Ainsi, le bleu de méthylène, composé de

¹ Qui présente des pores de très petites dimensions.

molécules volumineuses, est adsorbé quatre fois plus sur un charbon à gros pores que sur un charbon à pores fins. Ainsi, un volume poreux important évoque une forte capacité d'adsorption. C'est aussi le signe de pores de gros diamètres, moins efficaces que les petits.

Les adsorbants industriels ont généralement des surfaces spécifiques au-delà de 100 m²/g, atteignant même quelques milliers de m²/g. ces adsorbants sont nécessairement microporeux avec des tailles de pores inférieures à 2 nm, mésoporeux avec des tailles de pores comprises entre 2 nm et 50 nm et les pores de largeur excédant 50 nm appelés macroporeux (selon la classification de l'UPAC) [63].

II.5.3 Nature de l'adsorbant

Le choix d'un adsorbant relève souvent du compromis. Telle propriété sera prioritaire selon l'application et sa sélectivité sera un critère de choix majeur [64]. On peut classer les adsorbants en :

II.5.3.1 Adsorbants polaires

Ces adsorbants adsorbent les électrolytes, dans ce cas l'adsorption est sélective. Ainsi les cations et les anions seront fixés selon la charge de l'adsorbant, ce dernier peut être une argile, silica-gel, ...etc.

II.5.3.2 Adsorbants apolaires

Ils ont plus d'affinité pour les substances non polaires comme le graphite, le charbon et le talc, ... etc.

II.5.4 Adsorbat

Le choix de l'adsorbant se fait pour un adsorbat identifié et une substance particulière ciblée parmi plusieurs susceptibles d'être adsorbées, donc en considération des propriétés physico-chimiques de celui-ci. Les composés aromatiques s'adsorbent mieux par rapport aux composés aliphatiques possédant le même nombre de carbone. Donc, c'est un phénomène qui est influencé par la structure chimique des corps dissous. L'introduction, dans les composés du groupe hydroxyle, abaisse en principe, la grandeur de l'adsorption [65].

L'adsorbat donc est choisi par rapport à sa taille moléculaire, sa polarité et sa solubilité.

II.6 Les conditions opératoires

Le pH de la solution, la concentration en adsorbat et en adsorbant, la température de la solution, le temps de contact adsorbat-adsorbant et la vitesse d'agitation [66].

- **Influence de la température :**

La quantité adsorbée à l'équilibre augmente quand la température diminue. De plus, l'adsorption libère une chaleur. Comme toute réaction exothermique, elle est donc favorisée par les basses températures [67].

II.7 La cinétique d'adsorption

La cinétique d'adsorption dépend de l'interaction adsorbant-adsorbat et aussi de la condition de système biphasé. Ce processus est évalué selon deux paramètres : le mécanisme, et le taux de rétention dont il détermine le temps de séjour exigé pour accomplir la réaction d'adsorption.

Afin d'étudier la cinétique d'adsorption de l'adsorbat, on détermine la capacité de fixation q_t en fonction de temps. La constante de vitesse est déduite à partir des modèles mathématiques [68].

II.8 Définition d'une isotherme d'adsorption

C'est la courbe reliant l'activité de l'adsorbat dans une atmosphère donnée à la quantité d'adsorbat Q_e (mg/g) adsorbée sur un solide en fonction de la concentration C_e (mg/l) du composé adsorbable à l'équilibre $Q_e = f(C_e)$ à une température donnée. Un grand nombre de modèles d'isothermes d'adsorption a été développé par différents chercheurs et les isothermes ont été classées suivant leur forme par BRUNAUER, EMMETT et TELLER en 1938. La plupart de ces isothermes ont d'abord été proposées en phase gaz, puis adaptées aux phénomènes en phase liquide, parmi lesquelles l'isotherme de LAGMUIR [69].

II.8.1 La quantité d'adsorbat

La quantité d'adsorbat adsorbée sur le solide est souvent exprimée en fonction de domaine ou de l'application dont il est question, ça peut être exprimée en termes de teneur en eau (Kg d'eau/kg de solide sec) lors de séchage d'eau contenue dans un solide divisé [70].

II.8.2 Calcul de la capacité d'adsorption

L'évaluation de la capacité d'adsorption d'un matériau, passe par la description des réactions d'équilibre produites entre l'adsorbant et l'adsorbat, au terme d'un temps de contact. Elle est définie comme étant la quantité de substrat (masse en volume) adsorbée, par unité de poids d'adsorbant, pour une température donnée. Parmi les paramètres agissant sur ce calcul : la taille des molécules d'adsorbat et la surface spécifique de l'adsorbant [71]. La capacité d'adsorption est exprimée par la relation suivante :

$$Q = [(C_0 - C_t) \cdot V] / m \quad (2)$$

Q : capacité d'adsorption du support (mg/g) ;

C_0 : concentration initiale du substrat (mg/l) à $t=0$;

C_t : concentration du substrat (mg/l) à l'instant « t » du processus d'adsorption ;

V : volume de la solution (substrat) (l) ;

M : masse du support (g).

Comme elle peut être influencer aussi par le pH, la température et la force ionique.

II.9 Classification des isothermes d'adsorption

Tous les systèmes adsorbant-adsorbat ne se comportent pas de la même manière. Expérimentalement, on distingue quatre classes principales d'après Giles et Coll., nommées :

S (Sigmoïde), L (Langmuir), H (Haute affinité) et C (partition constante) [72].

La figure II.2 représente les classes principales des isothermes d'adsorption

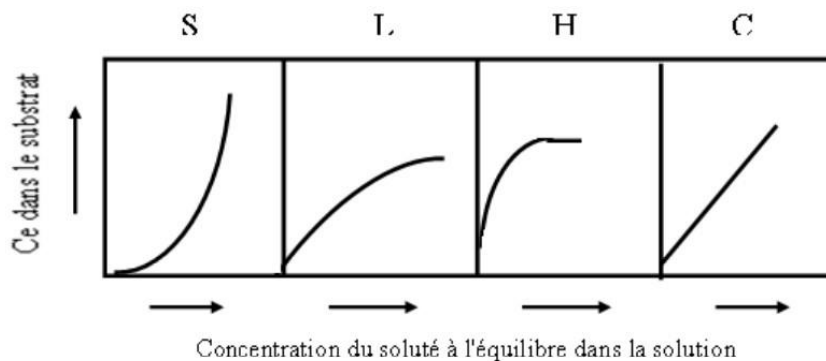


Figure II.2 Les classes principales des isothermes d'adsorption.

II.9.1 Les hypothèses de classification

- L'adsorption de solvant sur les mêmes sites que le soluté implique la présence d'une compétition d'adsorption entre le solvant et le soluté.
- Le nombre des sites de fixation de soluté à la surface de l'adsorbant diminue lorsque la quantité adsorbée augmente.
- L'orientation des molécules à la surface, le cas où les molécules sont adsorbées verticalement ou horizontalement sur la surface.
- Les interactions attractives ou répulsives entre les molécules adsorbées se manifestent dans le phénomène d'adsorption [73].

II.9.2 Les classes des isothermes

Les classes des isothermes sont comme suit :

- **La courbe de type S :**

Les isothermes de cette classe présentent, à faible concentration, une concavité tournée vers le haut. Les molécules adsorbées favorisent l'adsorption ultérieure d'autres molécules (adsorption coopérative), ceci est dû aux molécules qui s'attirent par des forces de Van der Waals et se regroupent en îlots dans lesquels elles se tassent les unes contre les autres.

Ce comportement est favorisé, d'une part, quand les molécules de soluté sont adsorbées verticalement comme c'est le cas des molécules possédant un seul groupe fonctionnel et d'autre part, quand les molécules se trouvent en compétition d'adsorption forte avec le solvant [74].

- **La courbe de type L :**

Les isothermes de classe L présentent, aux faibles concentrations de la solution, une concavité tournée vers le bas qui traduit une diminution des sites libres au fur et à mesure de la progression de l'adsorption. Ce phénomène se produit lorsque les forces d'attraction entre les molécules adsorbées sont faibles. Elle est souvent observée quand les molécules sont adsorbées à plat, ce qui minimise leur attraction latérale. Elle peut également apparaître quand les molécules sont adsorbées verticalement et lorsque la compétition d'adsorption entre le solvant et le soluté est faible. Dans ce cas, l'adsorption des molécules isolées est assez forte pour rendre négligeable les interactions latérales [75].

- **La courbe de type H :**

La partie initiale de l'isotherme est presque verticale, la quantité adsorbée apparaît importante à concentration quasiment nulle du soluté dans la solution. Ce phénomène se produit lorsque les interactions entre les molécules adsorbées et la surface du solide sont très fortes. L'isotherme de classe H est aussi observée lors de l'adsorption de micelles ou de polymères formés à partir des molécules de soluté [76].

- **La courbe de type C :**

Les isothermes de cette classe se caractérisent par une partition constante entre la solution et le substrat jusqu'à un palier. La linéarité montre que le nombre de sites libres reste constant au cours de l'adsorption. Ceci signifie que les sites sont créés au cours de l'adsorption. Ce qui implique que les isothermes de cette classe sont obtenues quand les molécules de soluté sont capables de modifier la texture du substrat en ouvrant des pores qui n'avaient pas été ouverts préalablement par le solvant [77].

II.10 Les modèles d'isothermes

Plusieurs lois ont été proposées pour l'étude d'adsorption, elles expriment la relation entre la quantité adsorbée et la concentration en soluté dans un solvant à une température donnée, les deux principaux types sont :

II.10.1 Modèle de Langmuir

Le modèle de Langmuir a pour objectif de décrire de façon simple la formation d'une monocouche d'un adsorbat sur une surface. La figure II.3 représente le modèle de Langmuir.

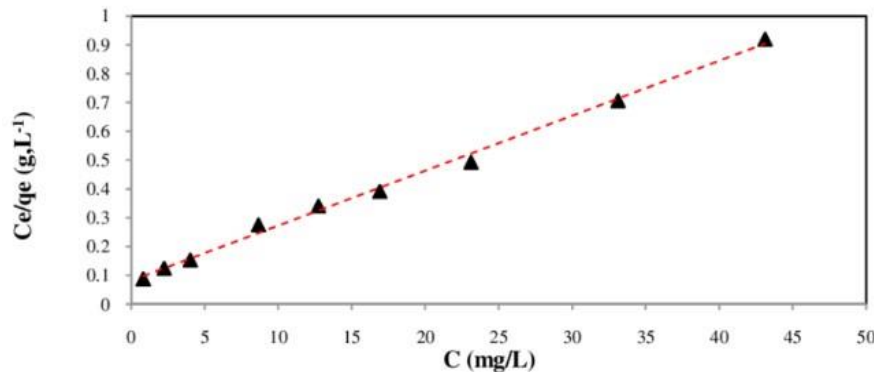


Figure II.3 Présentation de modèle de Langmuir, l'isotherme d'adsorption.

Ce modèle considère que la surface est uniforme et comporte des sites d'adsorption d'énergie identique et indépendante de la présence d'autres molécules au voisinage des sites et sans interactions entre les molécules adsorbées [78]. L'adsorption est physique, le modèle est présenté par la relation suivante :

$$Q_e = Q_{\max} \cdot [(K \cdot C_e) / (1 + K \cdot C_e)] \quad (3)$$

Avec :

Q_e : la quantité d'adsorbat fixée à l'équilibre par l'adsorbant (mg/g) ;

C_e : la concentration résiduelle à l'équilibre (mg / l) ;

Q_{max} : la quantité maximale de saturation de l'adsorbant (mg/g) ;

Dans le cas d'une forte quantité de soluté adsorbée, le terme **K · C_e** devient largement supérieur à 1. Cela implique que **Q_e** tend vers **Q_{max}** ;

K : la constante thermodynamique de l'équilibre de l'adsorption (L/mg).

Dans le cas d'une faible quantité de soluté adsorbé, le terme **K · C_e** peut être très inférieur à 1 et il est alors négligé. La relation de Langmuir se réduit alors à une relation directe entre la capacité d'adsorption et la concentration à l'équilibre de l'adsorbat en phase liquide :

$$Q_e = Q_{\max} \cdot K \cdot C_e \quad (4)$$

Par ailleurs, la linéarisation de la fonction de saturation par passage aux inverses donne :

$$1/Q_e = [(1/Q_{\max} \cdot K) \cdot (1/C_e) + (1/Q_{\max})] \quad (5)$$

L'équation obtenue est celle d'une droite de pente $1/Q_{\max} \cdot K$ et d'ordonnée à l'origine $1/Q_{\max}$, ce qui permet de déterminer deux paramètres d'équilibre de la relation : Q_{\max} et K

II.10.2 Modèle de Freundlich

Le modèle de Freundlich (1926) permet une représentation dans la plupart des phénomènes d'adsorption monocouche à l'équilibre. C'est une équation empirique utilisée pour la représentation pratique de l'équilibre d'adsorption. Elle ne repose sur aucune base théorique. L'adsorption peut être physique ou chimique et concerne plusieurs sites d'adsorption d'énergies différentes [79]. La relation de Freundlich est définie par :

$$Q_e = K \cdot C_e^{1/n} \quad (6)$$

Avec :

Q_e : la quantité d'adsorbat fixée à l'équilibre par l'adsorbant (mg/g) ;

C_e : la concentration résiduelle à l'équilibre (mg/l) ;

K et n : les constantes de Freundlich liées à l'adsorption et à l'affinité.

La linéarisation de cette relation par passage à une échelle logarithmique :

$$\ln Q_e = \ln K + (1/n) \cdot \ln C_e \quad (7)$$

La représentation graphique donne une droite de pente $1/n$ et d'ordonnée à l'origine $\ln K$. Ces deux paramètres définissent des termes reliés à l'intensité de l'adsorption et à la capacité de l'adsorbant. L'extrapolation de cette équation pour $C_e = C_0$, à condition que C_0 est constante (concentration initiale en soluté), donne la capacité ultime d'adsorption (q_{\max}) dans le domaine de concentration étudié.

II.11 Application industrielle d'adsorption

Les applications industrielles concernant le traitement des solutions diluées (purification et extraction) sont nombreuses [80]. Les traitements les plus importants concernant :

- La décoloration des liquides ;
- Les purifications des divers produits pétroliers et de matières grasses animales et végétales ;
- Le traitement des eaux ;
- Le raffinage des produits pétroliers ;

- La catalyse de contact ;
- La déshumidification et la désodorisation de l'air ;
- La dessiccation de produits organiques industriels.

II.12 Les propriétés des adsorbants

Les adsorbants utilisés dans divers traitements doivent avoir les qualités suivantes [81]:

- Haute capacité d'adsorption liée à leur structure poreuse très développée et à leur grande surface spécifique ;
- Grande efficacité pour adsorber des substances à faible concentration ;
- Sélectivité élevée ;
- Aptitude à être facilement régénérés et utilisés de nouveau ;
- Prix peu élevé.

II.13 Les adsorbants

II.13.1 Introduction

Tous les solides agissant comme adsorbants sont caractérisés par une structure microporeuse granulaire qui leurs confère une très grande surface active par unité de masse. Les adsorbants utilisés dans la pratique sont, soit de nature organique (végétale ou animale), ou de nature minérale. Ils sont employés tels quels ou après un traitement d'activation, ayant pour but d'augmenter la porosité qui est essentielle car elle gère et quantifie l'aptitude du matériau à effectuer un stockage sélectif. Par ailleurs, elle est directement liée à l'importance des interactions soluté-support, conditionnant de ce fait les possibilités de régénération du matériau [82].

II.13.2 Les adsorbants minéraux

II.13.2.1 Définition des minéraux

Les minéraux sont des sels insolubles voire très peu solubles dans l'eau. Ils sont formés par l'association des éléments dits « métaux » et d'autres dits « métalloïdes ou semi-métaux ». Lorsque l'on considère la formule chimique de base d'un minéral, celui-ci combine plusieurs éléments chimiques dans des proportions différentes.

Un minéral est une substance solide inorganique naturelle ayant une structure chimique interne bien ordonnée où les atomes sont dispersés en répétition. Il présente également une composition chimique et des propriétés physiques caractéristiques. De plus, il ne se produit ni à l'état liquide ni à l'état gazeux aux conditions de température et de pression standard.

Toutes les formes d'un minéral qui se produisent naturellement ont la même composition chimique avec peu de variations dans une plage limitée. Ces solides cristallisés sont présents dans les gisements minéraux particuliers à partir desquels nous pouvons obtenir un minéral à grande échelle en utilisant les technologies existantes aux industries.

La minéralogie est la science qui étudie les minéraux qui a pour but d'obtenir des nouvelles informations sur les différentes espèces au travers de leurs apparences et de leurs origines qui permet de les répertorier et de les classer. Cette discipline cherche également à identifier de nouveaux gisements des minerais.

Le nettoyage des minéraux est de les rendre propres, nets en se débarrassant de tout ce qui ternit ou salit [83].

II.13.2.2 Méthode de nettoyage

Le nettoyage ne peut s'envisager que de deux façons :

Le nettoyage mécanique : qui va du simple souffle à des actions de décapage beaucoup plus musclées tels que le sablage par exemple.

Le nettoyage chimique : qui agira par dissolution d'une partie ou de la totalité des souillures.

Dans certains cas il est intéressant d'utiliser des propriétés chimiques de certains produits qui se décomposent en provoquant des effervescences plus au moins fortes qui peuvent soulever les impuretés.

On aura souvent à réaliser plusieurs étapes de nettoyage en utilisant en alternance des méthodes différentes [84].

II.13.2.3 Le bon nettoyage

Le bon nettoyage commencera par :

- Un bain additionné d'un peu de détergent du type liquide vaisselle (éviter les détergents ammoniacés qui altèrent les minéraux à base de cuivre et d'argent) ;
- Un rinçage à l'eau claire sous le robinet après un ou plusieurs jours de trempage permettra d'éliminer une grosse partie de terre ou de glaise ;
- Dans certains cas un nettoyage avec de l'eau sous pression (« Karsher » - pistolet à peinture, ...etc.) mené de façon contrôlée donnera des résultats intéressants sans altérer les cristallisations [85].

II.13.2.4 La nature de minéral à nettoyer

En effet selon la classe à laquelle il appartient, des renseignements sur sa réactivité chimique et éventuellement sa fragilité mécanique seront forts outils pour décider des traitements à appliquer.

Selon leurs classe, les minéraux ont des propriétés chimiques bien définies aussi l'appartenance à telle ou telle catégorie nous orientera sur des précautions à prendre ou sur des nettoyages bien spécifiques.

La figure II-4 représente la classification de MENDELEIEV regroupe tous les éléments chimiques.

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Figure II.4 Classification de MENDELEIEV pour les éléments chimiques.

Figure II.4 Classification de MENDELEIEV pour les éléments chimiques.

L'adsorbant choisi pour cette étude est un minérale de la classe des sulfates contenant un élément principal dérive de groupe des alcalino-terreux. Il s'agit de la Célestine SrSO₄ [86].

II.13.2.5 La valorisation des minerais

En ce qui concerne le minerai, le principe de base des méthodes de la valorisation est l'exploitation des différences entre les propriétés des minéraux, il sera donc indispensable de connaitre, pour un minerai donné :

1. La composition minéralogique du minerai, présentée sous forme d'une analyse modale (proportion volumétrique ou pondérale des minéraux présents dans le minerai) ;
2. La variabilité de la composition minéralogique dans le gisement ;
3. La composition chimique des divers minéraux présents dans le minerai ;

4. Les associations des divers minéraux entre eux (texture), et la variabilité de la texture dans le gisement.

Il doit être clair d'après cette liste que pour le spécialiste en valorisation au moins, la teneur chimique élémentaire d'un minerai n'a pas de signification pratique en l'absence de précision sur la composition minéralogique du minerai [87].

II.13.2.6 Enrichissement des minéraux

En dehors de quelques rares exceptions, la majorité des minéraux utiles sont présents dans la nature sous formes de mélanges dilués et hétérogènes, et, sous cette forme, n'ont, en général, que peu d'intérêt pour les utilisateurs industriels qui demandent des produits minéraux hautement concentrés dont les propriétés chimiques et physique soient définies suivant des normes. Le minéralurgiste doit s'efforcer de séparer les minéraux désirables de leur gangue stérile et produire ainsi des concentrés.

Le minerai brut (tout-venant) extrait de la mine, subit plusieurs processus de préparation mécanique (concassage, broyage, etc.) et de concentration (enrichissement) pour produire un concentré de valeur économique. L'enrichissement du tout-venant, réalisé dans une usine de traitement (concentrateur), a pour but d'augmenter la teneur en minéral de valeur et d'éliminer la gangue. Techniquement, plusieurs procédés minéralurgiques permettant de séparer le minéral de valeur de la gangue existante. Ces procédés utilisent les propriétés mécaniques, électromagnétiques, physico-chimiques ou chimiques de ces minéraux. Il s'agit des procédés de séparation magnétique, électrostatique, gravimétrique, par flottation et par classification [88].

La figure II.5 ci-dessous illustre les deux principaux flux résultant de la séparation et de la transformation des minéraux du minerai brut.

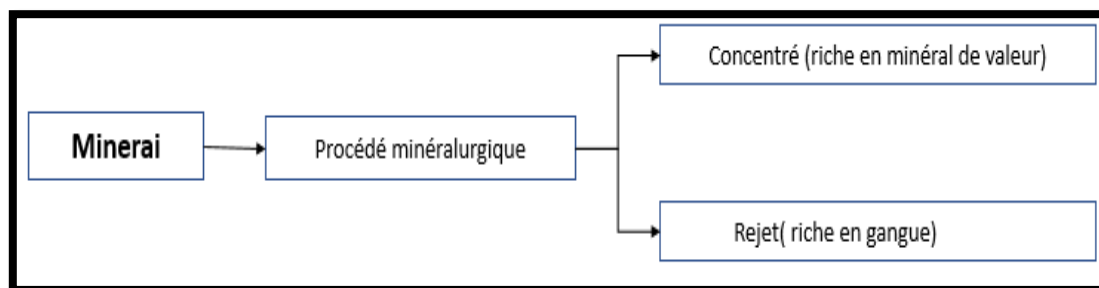


Figure II.5 Flux issus de la séparation minéralurgique d'un minerai.

II.13.2.7 Techniques de traitement du minerai

Le traitement du minerai a pour but de transformer le minéral brut extrait de la mine en un produit commercialisable. Il s'effectue généralement au niveau de la mine, dans une

installation dénommée « atelier de traitement ou de concentration du minerai ». Son objectif principal consiste à réduire la majeure partie du minerai, qu'il faut ensuite transporter et transformer grâce à d'autres procédés. Le produit commercialisable obtenu est appelé « concentré » et les matériaux restants sont nommés « résidus ». Le traitement du minerai comprend divers processus qui dépendent des caractéristiques physiques (granulométrie, densité, propriétés magnétiques, couleur) ou physico-chimiques (tension superficielle, hydrophobicité, mouillabilité) de chaque minéral [89].

II.14 Aperçu sur l'adsorbant « Célestine »

II.14.1 Introduction

Le Strontium (Sr) est le 15^{ème} élément le plus abondant de la croûte terrestre. Cependant, seuls deux minéraux, la Célestite (SrSO_4) et la Strontianite (SrCO_3), contiennent du Strontium en quantités suffisantes pour rendre la récupération pratique, et ces minéraux se trouvent principalement dans les roches sédimentaires. Des deux, la Célestite est plus courante dans les gisements économiques. Sa structure est similaire à celle de la barytine, le sulfate de baryum minéral. La Strontianite est la plus souhaitable des deux minéraux communs car le Strontium est plus couramment utilisé sous forme de carbonate.

Le Strontium est un élément métallique jaune argenté qui appartient à un groupe d'éléments connus sous le nom de métaux alcalino-terreux. Comme les autres métaux alcalins, il est chimiquement actif et réagit à la fois avec l'air et l'eau. Il donne aux fusées éclairantes et aux feux d'artifice une couleur rouge vif. Une partie de cet élément est utilisé pour fabriquer des aimants spéciaux appelés aimants céramiques en ferrite. Il a été utilisé pour fabriquer des composés appliqués sur les tubes à images en verre des téléviseurs couleur. Ce composé bloque les rayons X créés par le tube image.

La Strontianite de formule SrCO_3 est un carbonate de Strontium sous forme cristallin orthorhombique avec un aspect de lance et d'aiguille. Il apparaît lors de la cristallisation de fluide restant, formé lors de la constitution de granites et de pegmatites. Le minéral blanc inodore, légèrement coloré ou incolore, mise en flamme, le peint dans une couleur rouge carmin, qui parle de la présence de Strontium. Un minéral est transparent ou examine aux rayon X, une brillance vitreuse et sous l'action des rayons ultraviolets, la Strontianite peut émettre une fluorescence de la lumière bleue. Cette poudre minérale a un comportement dans les acides (effervescence à l'acide chlorhydrique). Elle se dissout facilement avec l'ébullition.

La Célestine est une espèce minérale composée de sulfate de Strontium SrSO_4 , avec des traces de Ba et de Ca. Il s'agit d'un minérale relativement abondant, typique des évaporites qui

sont des roches constituées des sels minéraux mais aussi trouvée dans des milieux hydrothermaux. La couleur bleu pâle qui semble la caractériser n'est pas la plus couramment rencontrée [90].

II.14.2 Origine de la Célestine

La Célestine trouve son origine à Madagascar. Cette pierre a été découverte en 1797 par Martin Heinrich Klaproth, qui était un chimiste et un minéralogiste allemand [91].

II.14.3 Les caractéristiques physico-chimiques de la poudre minérale de la Célestine

La Célestine est appelée aussi la Célestite, est une pierre naturellement composée de Strontium et de soufre. Elle appartient au groupe des sulfates. Le Strontium Sr, qui est un alcalino-terreux, donne en effet une solution solide avec la baryte mais également avec l'anhydrite ou le sulfate de calcium.

La Célestine s'agit d'un solide cristallin, de masse molaire 183,69 g/mol et de masse volumique 3,9 à 4 g/cm³. Sa solubilité dans l'eau est de 0,0132 g/l à 20°C. Elle est de maille orthorhombique, souvent incolore. Parfois blanc, comprenant de plusieurs nuances de bleu blanc ou pale, bien plus rarement bleu clair, bleu, bleu violet, vert. Elle se trouve naturellement sous forme de cristaux prismatiques ou tabulaires, voire aciculaires, souvent en masse granulaires. Elle montre, parfois, une fluorescence à la lumière ultraviolette. Au chalumeau, elle fond en une perle blanche et colore la flamme en rouge pourpre. Elle est faiblement soluble dans l'eau et légèrement soluble dans l'acide sulfurique dilué ainsi que la plupart des acides forts dilués. La solubilité dans l'eau pure reste stable avec une température peu élevée. Elle est par contre soluble dans l'acide sulfurique H₂SO₄ concentré et dans les autres acides à chaud. Elle est insoluble dans l'alcool à 95°C. Les collectionneurs préfèrent nettoyer néanmoins leurs pièces aux acides dilués.

La pierre Célestine se trouve au départ au creux des roches volcaniques. Celles-ci sont remplies plus tard par des solutions hydrothermales de Strontium. La Célestine appartient au système cristallin orthorhombique, l'un des sept systèmes cristallins qui classe les minéraux par rapport à leur symétrie [92].

II.14.4 Purification

Il est important de purifier régulièrement les minéraux après utilisation car ceux-ci s'imprègnent de nos pensées, de nos émotions, des lieux où ils se trouvent, pour ce faire plusieurs techniques sont possibles comme par exemple l'eau salée ou la fumigation. Il

convient d'adapter la bonne purification car les procédés diffèrent d'une famille de minéraux à l'autre.

II.14.4.1 Purification à l'eau salée

Cette technique de purification est la plus courante et celle qui s'adapte le mieux aux minéraux. Cependant, certaines familles de pierres ne supportent pas ce traitement

Comme par exemple la rose des sables de la famille des gypses.

Au bout d'un moment la pierre a donné toute l'énergie qu'elle pouvait, on peut la purifier énergétiquement en la déposant sur un lit de gros sel naturel durant plusieurs heures pour se décharger grâce à l'absorption des énergies par le sel. Pour plus d'efficacité on peut par la suite charger au soleil ou à la lumière naturelle [93].

Les collectionneurs préfèrent nettoyer néanmoins leurs pièces aux acides dilués.

II.14.5 Lavage de la poudre minérale

Les sulfates alcalino-terreux sont résistants aux traitements chimiques agressifs en évitant les chocs thermiques (Baryum, Strontium).

Un nettoyage à l'acide sulfurique ou l'addition d'ions sulfate (Sulfate de Soude) dans le bain de nettoyage ne peut être que bénéfique [94].

II.14.6 Utilisations de la Célestine

La pierre Célestine est utilisée soit sous forme solide, la pierre, soit comme une essence ou encore comme un élixir. La Célestine était employée sous forme de poudre. La Célestite est le minéral extrait pour la production de sels de Strontium, utilisés dans l'industrie sucrière pour l'enrichissement des mélasses ou le raffinage du sucre de betteraves, servent en pyrotechnie pour la production de feux artificiels (couleur rouge) et dans le domaine d'oxyde et entrent aussi dans la fabrication des peintures lumineuses, tubes téléviseurs et le traitement des eaux.

Le Strontium est utile sous forme carbonate pour la production des tubes cathodiques, batteries électriques, de verres iridescents spéciaux et d'émaux, de céramique, des divers caoutchoucs, couleurs pour téléviseurs et écrans informatiques plus clairs moins coûteux et plus respectueux de l'environnement. En effet, cet élément est exploité dans la structure osseuse et dans les sols agricoles. Sa forme métallique utilisée principalement en électronique et dans certains alliages. Le Strontium ingéré se retrouve concentré à environ 99% dans le système osseux, ainsi que dans le système conjonctif. Ingéré en trop grande quantité, cet élément provoque des troubles osseux proches du rachitisme, a tendance à remplacer le calcium dans les os. De ce fait, le Strontium 90, très radioactif, est particulièrement dangereux pour l'homme.

La Célestine et la Strontianite sont les principales minérales de l'élément chimique Strontium [95]. Ci-dessous la figure II.6 qui représente une image avec microscope optique de la Célestine en pierre dans la race une fine blanche de fond visualisée par microscope optique et la figure II.7 montre une image avec microscope optique de la pierre minérale de la Strontianite.



Figure II.6 Célestine en pierre dans la race une fine blanche de fond visualisé au microscope optique.



Figure II.7 Cristaux hexagonaux de Strontianite Visualisé au microscope optique.

II.15 Présentation du secteur des mines en Algérie

II.15.1 Introduction

Le pays possède un potentiel géologique intéressant pour l'investissement et le partenariat visant l'exploration minière, le développement et la production de certaines substances minérales.

Malgré cela, le secteur minier est resté très peu productif par rapport au potentiel que recèle notre pays, qui est appréciable notamment, pour les substances utiles non métalliques telles que les phosphates, le sel, le marbre, etc....

L'Algérie s'est attachée, depuis l'indépendance, à se doter d'un secteur minier qui puisse répondre à ses préoccupations.

Dans le secteur minier, un important effort de prospection a été consenti durant ces 30 dernières années, il a permis de développer l'infrastructure géologique de base et d'inventorier un grand nombre de gîtes et indices dont certains offrent de réelles perspectives d'investissement pour leur exploitation. C'est sur cette base, que l'Etat algérien a décidé de promouvoir et de mettre en valeur ce potentiel.

A ce titre, des formules de partenariat sont proposées à l'investissement étranger, associées à des mesures incitatives aussi bien dans le cadre de l'exploration que dans l'exploitation minière.

Durant cette période, de gros efforts ont été consentis par l'Etat et ont permis un certain nombre d'actions, en particulier :

- Le lancement de programmes importants de recherche en vue de rouvrir les mines abandonnées, d'augmenter les réserves des mines en activité et de découvrir de nouveaux gisements,
- La remise en état de l'appareil de production,
- L'ouverture de nouvelles mines,
- La formation d'un personnel qualifié.

Cette révolution s'est étendue au domaine minier et l'on s'est aperçu qu'outre les hydrocarbures qu'elles pouvaient receler, ces roches-mères contenaient également d'autres matières précieuses.

Dans le cas des mines, il y a également des gisements concentrés et des ressources diffuses infiniment plus riches qui, si elles étaient exploitées, placent l'Algérie en pole position dans le monde.

Une méthode d'exploitation est une succession de réalisation des travaux de creusement et d'exploitation du minerai dans un ordre bien déterminé qui est caractérisée par le développement dans l'espace et dans le temps des travaux de préparation, de découverte, et d'exploration d'un gisement.

Lors de l'exploitation à ciel ouvert des gisements des minéraux utiles, on commence toujours le processus technologique par la préparation des roches à l'extraction. La qualité de ce maillon influe considérablement sur la productivité des engins miniers, la sécurité de travail, et d'une manière générale sur l'efficacité des travaux miniers à ciel ouvert [96].

II.15.2 Le gisement de Célestine du Trias extrusif de Béni-Mansour (Béjaïa, Algérie)

II.15.2.1 Situation géographique et géologique du gisement

Le gisement de Célestine de Béni Mansour, situé à 160 Km à l'Est d'Alger, à 40 Km à l'est de Bouira et à 100 Km au sud-ouest de Bejaia qui est le chef-lieu de la wilaya [97].

Il occupe une position géographique intéressante aux confins de 3 wilayas et se situe non loin d'infrastructures assez denses :

- L'autoroute Est-ouest très proche (5 km) ;
- La Nationale 5 Alger- Constantine (2,5 km) ;

- La Nationale 26 Alger -Bejaia (5km) ;
- Des Chemins de Wilaya en bon état ;
- Une gare de tri ferroviaire, Béni Mansour (5 Km), nœud entre Alger, Bejaia et Constantine ;
- Le port de Bejaia à 100 km ;
- Ligne haute tension à 4 Km du gisement.

La figure II.8 montre la situation géographique de gisement de Célestine de « Beni Mansour » et la figure II.9 montre le relief de la région zone d'étude de la mine de Célestine.

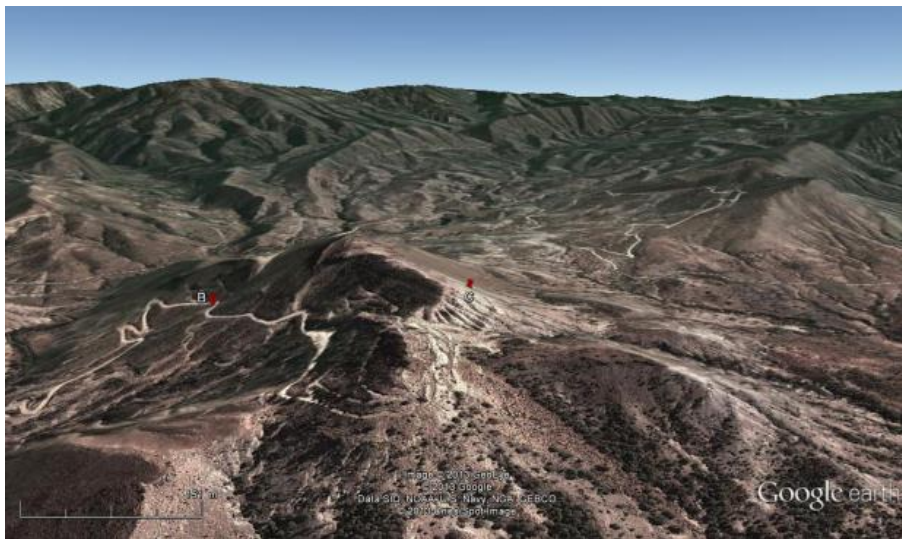


Figure II.8 La situation géographique de gisement de Beni Mansour.



Figure II.9 Relief de la région Beni Mansour.

II.15.2.2 L'historique du minerai de Célestine de Beni Mansour

Avant les années 60, le gisement ne semble pas offrir d'intérêt. Chez les auteurs ayant travaillé dans la région, il n'est fait mention nulle part de ce gisement.

Il semble pourtant que durant les années 40 ou 50, une exploitation artisanale y a été menée.

Les premiers à en avoir parlé semblent être des géologues soviétiques de la Sonarem qui ont, en 1968, visité, échantillonné et estimé les réserves jusqu'à la profondeur de 15m. Ils ont attiré l'attention par la suite sur les teneurs élevées en Strontium.

Ce n'est qu'en 1970 qu'un projet de prospection-évaluation est mis en œuvre et au terme duquel, les réserves du minerai sont évaluées de façon méthodique.

En 1986, dans le cadre de travaux de recherches complémentaires, les géologues complètent les travaux réalisés en 1970 par d'autres sondages en resserrant la maille de forage et en effectuant des levés géophysiques sur la partie la prometteuse du gisement. Les réserves géologiques sont réévaluées et leurs contours précisés.

Durant les années 80, le gisement a été exploité de façon artisanale pour fournir un complément à l'usine de Mekla distante de 140 Km qui fabriquait de la baryte de forage pour le secteur pétrolier. Les quantités extraites durant cette période s'élèvent à 6 000 tonnes environ.

Vers la fin des années 80, l'ENOF a essayé d'intéresser une société japonaise puis une autre allemande spécialisée dans la Célestine et à commercialiser auprès de cette dernière un chargement de 1500 tonnes environ. Le minerai enrichi à l'usine de Mekla par le procédé de jiguage n'a pas permis de dépasser les 89% en teneur et l'opération ne connaît pas de suite [98].

Quelques travaux d'extraction ont été menés en plusieurs endroits en surface dans le passé laissant sur le terrain des pentes souvent abruptes atteignant par endroits les 90°.

Ces terrains et pentes sont restés pour certains tels quels depuis plus de 20 ans et montrent que le minerai, le gypse et les marnes tiennent bien et permettent à l'exploitation de donner aux futurs gradins des pentes pouvant durant les travaux, aller jusqu'à la verticale. La figure II.10, la figure II.11 et la figure II.12 ci-dessous représentent un rochet du minerai, de gypse et des marnes successivement.



Figure II.11 Un rochet du minerai situé à Beni Mansour.



Figure II.10 Un gisement de gypse à Beni Mansour.



Figure II.12 Les marnes à Beni Mansour.

II.15.2.3 L'exploitation de gisement de Célestine à Beni Mansour

Le gisement de Célestine à Beni Mansour est actuellement en phase d'ouverture et de préparation à l'exploitation. Le gisement renferme d'importantes réserves géologiques à des teneurs en Célestine relativement élevées. L'entrée en production est prévue au cours du second janvier 2020, Il s'agit d'une exploitation à ciel ouvert avec enrichissement du minerai par le procédé gravimétrique des tables à secousses qui donne la poudre de Célestine concentré de table comme le montre la figure II.13 ci-dessous :

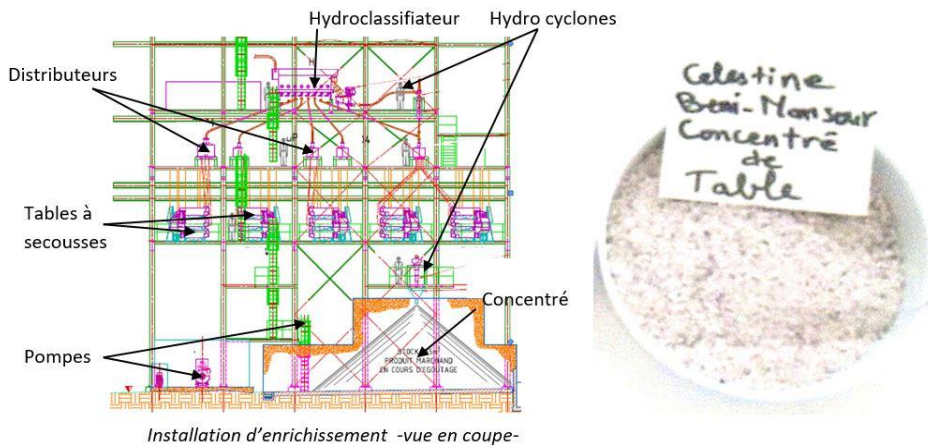


Figure II.13 La poudre de Célestine de Beni-Mansour concentré de table après un procédé gravimétrique des tables de secousses.

II.15.2.3.1 La table de secousse

Table vibrante est un équipement de séparation par mouvement alternatif asymétrique pour la séparation des minerais de poids différent. La figure II.14 montre une table de secousse utilisée dans les industries.



Figure II.14 La table de secousses.

II.15.2.3.2 Avantage des tables de secousses

Elle est favorable à séparer des minerais fins. Elle est appliquée largement pour la séparation de tungstènes, d'étains, des tantales, d'autres métaux rares et celle des métaux précieux. Elle est également utilisée pour séparer du fer, du manganèse, du mica et d'autres minerais non-métaux [99].

L'exploitation sélective du minerai en carrière et son enrichissement gravimétrique après concassage-broyage dans des installations de traitement comme présenté dans la figure II.14 qui s'agit de l'aspect du minerai après broyage permettront d'obtenir un concentré marchand illustré dans la figure II.15.

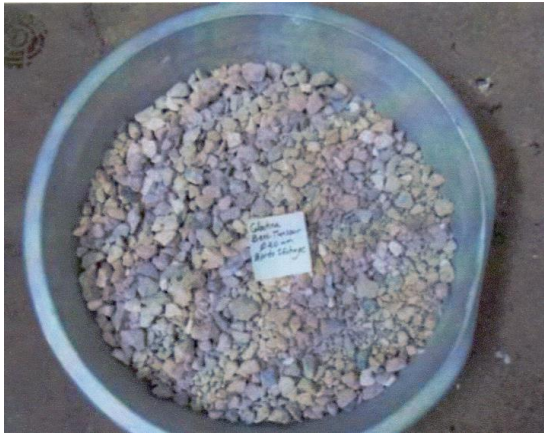


Figure II.16 L'aspect du minerai après broyage.



Figure II.15 L'aspect du concentré marchand et des rejets de tables. Granulométrie : 0-2mm

Ce qui remonte aux caractéristiques récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Les teneurs des éléments après le concassage et le broyage et l'enrichissement gravimétrique du minerai.

SrSO ₃ (Min.)	SrO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	BaSO ₄
Teneurs 91%	52,64	0,15	0,08	0,12	2,04	0,5	1,20

- La teneur en minerai de Célestine concentré est très élevée estimée 91%.
- Les autres éléments (Na₂O, K₂O, TiO₂, MnO, P₂O₅) sont, chacun, dans une proportion inférieure à 0,05 %.
- Granulométrie : 0-2 mm.
- L'exploitation sélective en carrière permet de livrer des lots avec une teneur en BaSO₄ inférieure à 0,80%.

II.15.2.4 Le rôle de concassage et le broyage

Le concassage est la première étape du procédé de fragmentation. Il consiste à décomposer le minerai par compression contre des surfaces rigides ou par percussion contre des surfaces dures dans un mouvement à débit contrôlé. Cette étape de traitement prépare le minerai à subir une réduction ultérieure de granulométrie (broyage) ou à passer directement aux étapes de classification et/ou de concentration. En règle générale, elle ne produit pas de résidus. Le concassage d'échantillon permet de réduire les dimensions des grains à une dimension petite [100].

Le Trias extrusif de Béni-Mansour encaisse une importante minéralisation en Célestine. Les analyses pétrographique et chimique des carbonates montrent une hétérogénéité et une diversité des calcites, qui seraient dues aux variations du régime hydrodynamique et à la nature des solutions. Celles des sulfates confirme l'existence de différentes générations de Célestine

dont la dernière est enrichie en Ba. Les sulfates du Célestite seraient issus de l'anhydrite tandis que le Strontium aurait une origine extérieure aux évaporites, il aurait été apporté par des eaux de formation du crétacé, ou par des eaux météoriques. La localisation générale des gites a Célestite est caractérisée par des fluides dilues mais plus salins que l'eau de mer [101].

La figure II.17 ci-dessous s'agit d'une mine de Célestine de Beni-Mansour visualisée avec le MEB.



Figure II.17 Mine de Célestine de Beni-Mansour visualisée avec le MEB.

CHAPITRE III **Caractérisation d'un Adsorbant**

III.1 Introduction

L'eau est l'une des ressources naturelles les plus précieuses de notre planète, qui présente plus de deux tiers de la surface de la terre, c'est pourquoi sa pollution par les produits chimiques organiques et inorganiques est une grave préoccupation environnementale.

L'un des importants polluants, ce sont les colorants une fois qui sont dissouts dans l'eau, ils sont parfois difficiles à traiter car ils ont une structure moléculaire complexe qui les rend plus stables et difficilement biodégradables, donc peuvent constituer des facteurs de risques pour notre santé et nuisance pour notre environnement. Alors, il est nécessaire de limiter le plus possible ces polluants en mettant en place un moyen de traitement adapté comme une unité de décoloration.

Le processus d'adsorption a gagné rapidement une place importante comme méthode de traitement des effluents aqueux et dans l'élimination des contaminants organiques [102].

Le charbon actif a été largement utilisé à cause de sa superficie prolongée, sa structure microporeuse, sa grande capacité d'adsorption des espèces organiques, mais son utilisation présente un coût très cher, c'est pour cela que plusieurs chercheurs ont préféré l'utilisation des autres adsorbants minéraux tel que le minerai de Célestine pour l'épuration des eaux des rejets industriels textiles suite à leur cout moins cher que celui du charbon actif et la teneur riche en ce minerai dans notre pays.

Ce chapitre décrit l'ensemble des analyses réalisées sur un échantillon prélevé du gisement de Célestine de Beni Mansour en vue d'en établir la composition minéralogique et la méthodologie utilisée pour accéder à cette composition. L'échantillon va être traité par les techniques de caractérisations (DRX, MEB et FX). L'analyse minéralogique par DRX ayant pour but de déterminer les différentes phases minérales présentées dans l'échantillon par contre la MEB informe sur sa surface.

III.2 L'objectif de cette étude réalisée par ma promotrice au niveau de (CRAPC) à Alger :

- Evaluer les performances de la pierre de Célestine en tant que matériau adsorbant.
- Caractérisation de l'adsorbant par les méthodes d'analyses : MEB, DRX et FX.

III.3 Les variables étudiées

- La teneur en adsorbant (Célestine).
- Le diamètre des pores en μm .
- Les dimensions des phases.

III.4 Matériels et méthodes

III.4.1 L'adsorbant

Il s'agit d'un échantillon du minerai de Célestine provenant du gisement de Beni Mansour située à la wilaya de Bejaia issu du traitement d'enrichissement par le procédé gravimétrique des tables à secousses qui donne la poudre de Célestine concentré de table après concassage et broyage dans des installations de traitement.

III.4.2 Préparation de l'adsorbant

Préparation de l'échantillon poudre :

1. Fragmentation : Concassage-broyage du minerai brute (tout-venant) dans des installations de traitement ;
2. Enrichissement gravimétrique : le minerai était traité sur les tables de secousse ; qui donne la poudre de Célestine concentré de table.

III.5 Méthodes de caractérisation

III.5.1 Diffraction des rayons X

La DRX est une méthode universellement utilisée pour identifier la nature et la structure des solides cristallisés. Elle permet de déterminer la nature des minéraux cristallins contenu dans un solide et parfois les quantifier. Comme elle sert aussi à mesurer le degré de cristallinité dans certaines phases.

Le principe général de celle-ci consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X, et à suivre l'intensité de ces rayons qui est diffusée selon l'orientation dans l'espace. Les rayons X diffusés interfèrent entre eux, l'intensité présente donc des maximums dans certaines directions, on parle dans ce cas-là du phénomène de diffraction. On enregistre l'intensité détectée en fonction de l'angle de déviation 2θ du faisceau, les résultats sont représentés sur un diffractogramme [103].

La condition pour que les radiations soient en phase s'exprime par la loi de Bragg :

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

n : Nombre entier correspondant à l'ordre de la diffraction ;

λ : Longueur d'onde du rayonnement utilisé (nm) ;

d : Distance entre les plans réticulaires d'une même famille désignée conventionnellement par les indices de Miller h, k, l (Å).

θ : Angle de diffraction (°).

d_{hkl} : Distance interréticulaires.

La valeur de d_{hkl} dépend du paramètre de la maille et de mode de réseau.

Le schéma de figure III.1 explique le principe de diffraction X.

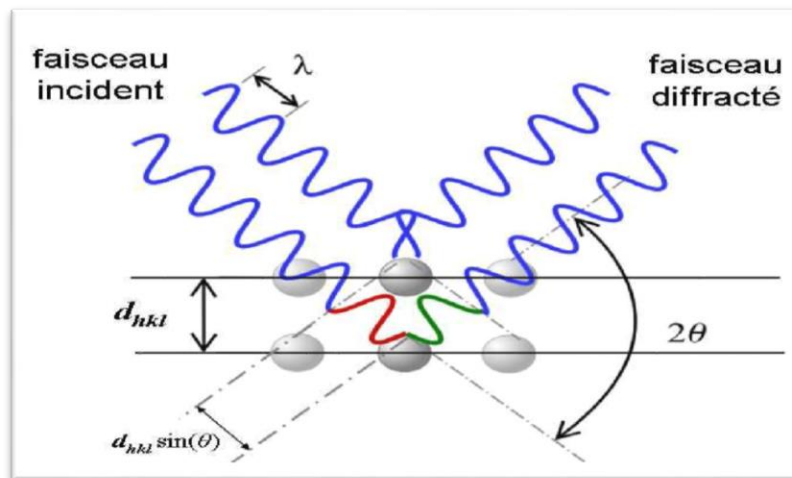


Figure III.1 Schéma représentatif du principe de la DRX.

Les analyses de DRX ont été effectuées avec un diffractomètre de poudre de type PANALYTICAL, sur un échantillon poudre (séché et broyé) pour le minerai de Célestine concentrée.

III.5.2 Analyse par MEB

La MEB est une technique de microscopie électronique basée sur le principe des interactions électron- matière. Elle est essentiellement une façon d'imagerie, capable de produire des images e haute résolution de la surface d'un échantillon. Elle consiste en un faisceau d'électron balayant la surface de l'échantillon analysé, qui réémet différents types de particules [104].

III.6 Résultats et discussion

III.6.1 Caractérisation par DRX

L'analyse effectuée par DRX, a été fait sur la fraction granulométrique de Célestine, dans le but de caractériser la composition minéralogique d'un échantillon et préciser la nature des minéraux. Les résultats obtenus sont représentés sur le spectre illustré dans la figure III.2.

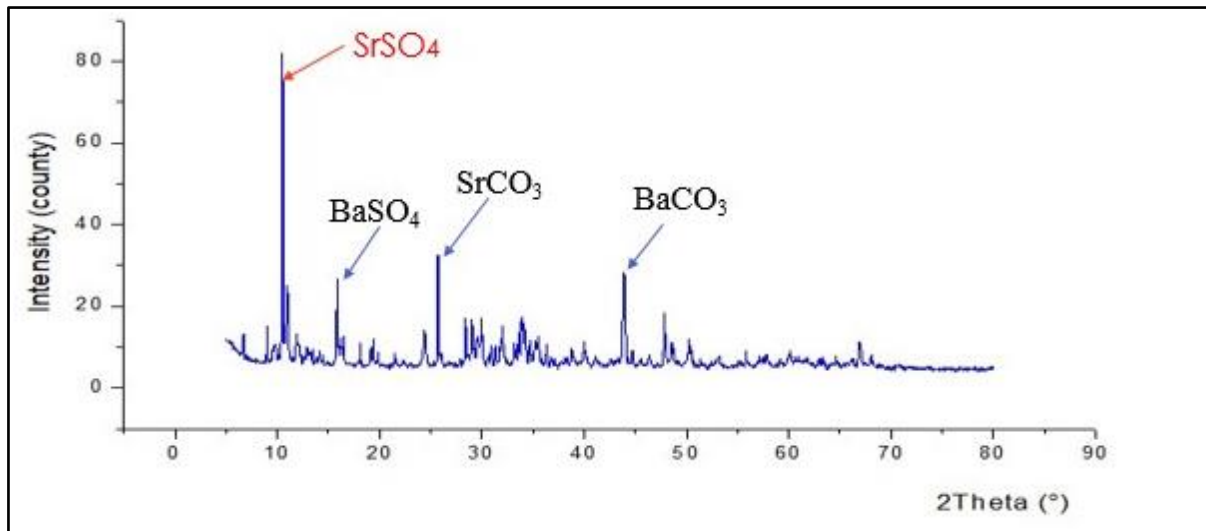


Figure III.2 Spectre d'un échantillon du minerai de Célestine de Beni Mansour par diffractomètre à rayon X de l'échantillon initial interprété avec Origin Pro.

Interprétation :

Le spectre nous montre un pic très intense remonte à la forte teneur en Célestine avec un angle de diffraction 2θ de 12° . Par contre il y l'apparition de 3 pics moyennement intenses de proportions moins importantes sont respectivement :

Pic : Les sulfates de la baryte (BaSO_4) ; avec un angle de diffraction 2θ de 16° ;

Pic : Les carbonates de Strontium (SrCO_3) ; avec un angle de diffraction 2θ de 26° ;

Pic : Les carbonates de la baryte (BaCO_3) ; avec un angle de diffraction 2θ de 44° ;

Cependant quelques traces le fer (Fe), un léger taux de quartz (SiO_2).

Conclusion :

On peut conclure que les principales phases minéralogiques du minerai de Célestine de Beni Mansour sont composées majoritairement de la Célestine (SrSO_4) avec une proportion importante.

L'analyse minéralogique effectuée par DRX confirme que la phase minérale majoritairement observée est la Célestine.

III.6.2 Caractérisation par MEB

Pour la caractérisation microstructurale, on a analysé l'échantillon à l'aide d'un MEB à deux tailles d'agrandissement : 1200 x et 8000 x.

Interprétation :

Dans la figure III.3 ci-dessous, on montre la visualisation par MEB de l'échantillon étudié tel que la micrographie des particules minérales obtenue est d'une échelle de $24,9\mu\text{m}$ avec un agrandissement de 1200 fois. Elle représente clairement les formes poreuses.

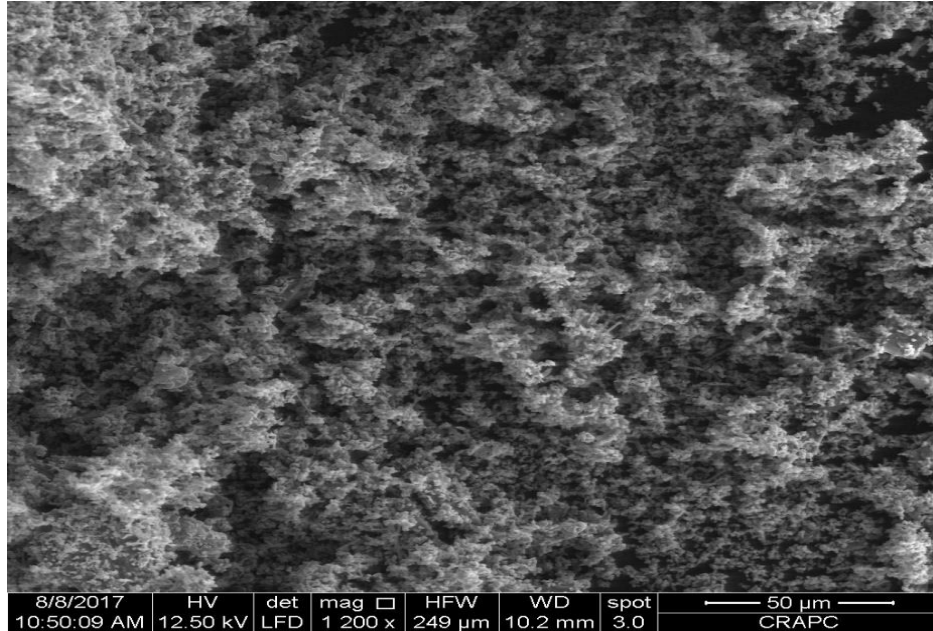


Figure III.3 Image MEB de la surface de l'échantillon étudié, avec un agrandissement (1200 x).

Cette analyse montre que ce minerai possède une surface non uniforme, non plate, de propriété poreuse très développée riche en micropores et méso-pores avec une grande surface spécifique.

La micrographie des particules minérales obtenue est d'une échelle de $49,7\mu\text{m}$. L'agrandissement de l'image précédente 8000 fois a permis d'avoir la figure III.4.

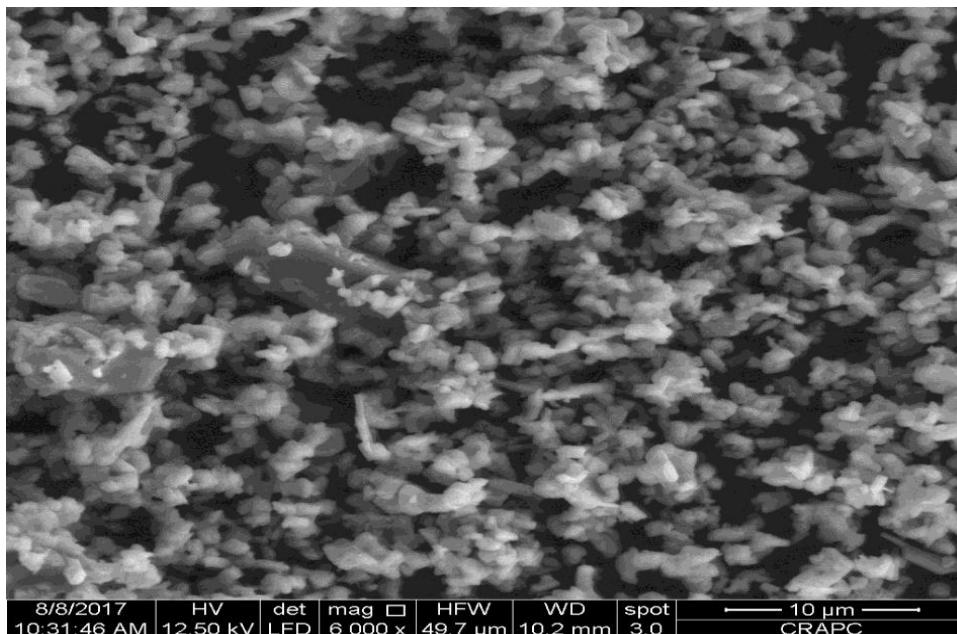


Figure III.4 Image MEB de la surface d'échantillon étudié avec un agrandissement (8000 x).

Cette présentation montre clairement la structure cristalline ordonnée et la distribution des particules dans les tranches granulométriques est de manière régulière.

Conclusion :

Le résultat des images présentées avec un MEB est une affirmation de la structure orthorhombique de la Célestine.

III.6.3 Analyse chimique granulaire des principaux éléments du minerai de Célestine de Beni Mansour par l'analyse FX

Les résultats du tableau ci-dessous issus de l'analyse FX correspondent aux teneurs en quantité de masse pour un échantillon tout-venant de Célestine de Beni Mansour.

Tableau III.1 Résultats d'analyse granulométrique du minerai de Célestine de Beni Mansour par FX.

No.	Component	Result	Unit	Det. limit	El. line	Intensity	w/o normal
1	Mg	1.28	mass%	0.03913	Mg-KA	0.5462	1.3201
2	Al	0.237	mass%	0.00955	Al-KA	0.3533	0.2446
3	Si	0.707	mass%	0.01728	Si-KA	0.9457	0.7279
4	S	18.0	mass%	0.03980	S -KA	19.3443	18.5542
5	Ca	14.5	mass%	0.05361	Ca-KA	6.3963	14.9750
6	Fe	0.414	mass%	0.01734	Fe-KA	0.6493	0.4264
7	Sr	62.7	mass%	0.02602	Sr-KA	638.3877	64.6408
8	Ba	2.08	mass%	0.46662	Ba-LA	0.1223	2.1405

Interprétation :

Le tableau récapitulatif, montre différentes portions en éléments chimiques tel que le Strontium qui se trouve en forte teneur égale à 62,7%, des teneurs très faibles de 14% et 18 % de calcium (Ca) et de soufre (S) respectivement, ainsi pour les autres à l'état de trace entrant dans la composition de cette échantillon tout-venant du minerai de Célestine.

Conclusion :

Les résultats de ce tableau confirment les résultats de l'analyse de diffraction par les rayons X : la présence de l'élément Strontium Sr en forte teneur ne peut se trouver seul. Cependant, il se trouve sous forme de sulfate appelée Célestine SrSO_4 et en faible teneur sous forme de carbonate appelée Strontianite SrCO_3 . Ces deux minerais sont les seuls riches en Strontium Sr.

III.7 Conclusion

La caractérisation du minerai de Célestine de la famille des sulfates du minerai de Beni Mansour par les méthodes courantes (DRX, MEB et FX) ne laisse pas subsister des problèmes

CHAPITRE III Caractérisation d'un Adsorbant (Partie expérimentale)

grâce à sa structure cristallisée riche en caractère poreux porté sur une large surface spécifique. Ces propriétés sont attribuées à celles des adsorbants de qualité exploités dans les industries pour des intérêts divers comme l'épuration des eaux usées.

CONCLUSION GENERALE

Notre étude s'inscrit dans le contexte, Caractérisation d'un adsorbant minéral par différentes méthodes d'analyse, d'une part parce qu'elle prétend dépolluer des eaux contaminées et d'autre part parce qu'elle permet de valoriser un minerai abondamment disponible dans notre pays.

C'est dans ce contexte nous nous sommes proposés de faire cette étude sur le phénomène d'adsorption et la capacité d'un adsorbant minier à fixer sur sa surface l'adsorbat.

Dans ce travail, on a abordé l'exploitation minière en Algérie qui a joué un rôle tout au long des millénaires. La Célestine qui est un minéral appartenant au groupe des sulfates est l'une des ressources naturelles utiles pour de nombreuses applications industrielles importantes. On a cité le gisement de Célestine de Béni Mansour, situé dans la wilaya de Bejaia à 145 Km d'Alger qui renferme d'importantes réserves géologiques à des teneurs en Célestine relativement élevées, il est actuellement en phase d'ouverture et de préparation à l'exploitation. Ce gisement est considéré comme toutes autres ressources bénéfiques qu'il faut exploiter grâce à ses propriétés minéralogiques et structurales.

La caractérisation de ce minerai montre que la Célestine présente une structure riche en micropores et méso-pores qui lui confère une caractéristique essentielle d'un adsorbant minéral efficace et d'un minerai manipulable sur différentes échelles : industrielle, agriculture, cosmétique et autres parce qu'elle est toujours une source importante des sels de Strontium qui est utilisé dans le traitement des eaux qui nous a intéressé dans ce travail.

L'adsorption, cette méthode décrite n'est certes pas exhaustive mais a pour objectif premier de montrer la diversité des techniques de dépollution des eaux industrielles.

La mise en point de nouvelles méthodes de traitement est un sujet de recherche d'actualité. La préservation de l'environnement, en particulier l'eau, est une préoccupation majeure, partagée par tous, public, industries, scientifiques, chercheurs et décideurs dans le monde entier.

C'est le moment de réfléchir à des techniques d'efficacité sévère et à moindre coût à base du minerai de Strontium et d'autres substances minières assimilées à des nouveaux projets miniers d'exploitation des métaux précieux et les minéraux industriels.

LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] O. Bouras, *Propriétés absorbantes d'argiles pontées organophiles*, Thèse de Doctorat, Université de Limoges d'état, 2003.
- [2] H. Bouziani, C. Haidra, *Dégradation des colorants organiques par photocatalyse Hétérogène à base de l'oxyde de titane*, Mémoire d'ingénieur d'état, Université de USTO-MB, Oran, 2008.
- [3] Encyclopédie Universalis, *Les colorants*, 2003.
- [4] M. Capon, V. Courilleu, C. Valette, *Chimie des couleurs et des odeurs*, Revue : Nantes : Culture et technique, 1999.
- [5] N. Nait Merzoug, *Application des tiges de dattes dans l'adsorption de polluants organiques*, Mémoire de Magister, Université Mohamed Cherif Massaadia, Souk-Ahras, 2014.
- [6] E. Guivarch, *Traitement des polluants organiques en milieux aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée "Electro-Fenton" : Application à la minéralisation des colorants synthétiques*, Thèse de Doctorat, Université de Marne-la-Vallée, 2004.
- [7] Z. AL-Qodah, *Adsorption of dyes shale oil ash. Water*, Chapter 1 : Les colorants, p 4295-4303, 2000.
- [8] W. Qingming, N. Teruyuki, *Competitive adsorption of phenols on organically modified layered hexaniobate K4Nb6O17*, Edition : Microporous Materials, Vol 96, p84-92, 2006.
- [9] M.A.M. Salleh, D K. Mahmoud, W A. Karim, A. Idris, *Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes, a comprehensive Review*, Desalination, Vol 280, p1-13, 2011.
- [10] L.N. Howard, *Textile fibers, dyes, finishes and processes*, University of California, 1986.
- [11] U. Paga, D. Brown, *La dégradation des colorants : Partie II Comportement des colorants dans les essais de biodégradation aérobie*, Thèse de Doctorat, Volume 15, Numéro 4, p479-491, 1986.
- [12] L.Naidja, *Eliniation de colorant orange II en solution aqueuse par voie photochimique et par adsorption*, Thèse de Magister, 2010.
- [13] E. Errais, *Réactivité de surface d'argiles naturelles étude de l'adsorption de colorants anioniques*, Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, France, p75-86, 2011.
- [14] N. Barka, A. Assabbane, A. Nounah, Y. Aït ichou, *Adsorption of Disperse Blue SBL dye by synthesized poorly crystalline hydroxyapatite*, Thèse de Doctorat, Université Agadir, Maroc, p152, p1054-1059, 2008.
- [15] E. Errais, *Réactivité de surface d'argiles naturelles étude de l'adsorption de colorants anioniques*, Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, France, p75-86, 2011.
- [16] G. Crini, *Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal*, Review : Bioresource technology, p97, p1061-1085, 2006.
- [17] S. Saaidia, *Dégradation d'un colorant cationique par photocatalyse, électro-oxydation et leur couplage*, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2018.
- [18] M. Capon, V. Courilleu, C. Valette, *Chimie des couleurs et des odeurs*, Nantes : Culture et Technique, 1999.

- [19] JR W J. Weber, BM. Vanvliet, *Fundamental concepts for applications of activated carbon in water and waste water treatment, Activated Carbon Adsorption of Organics from the Aqueous Phase*, Edition : Ann Arbor Science, Michigan, p69, U.S.A,1980.
- [20] El. Guechi, *Enlèvement des colorants à partir de solutions aqueuses par des matériaux sorbants non conventionnels à faible cout*, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba,2013.
- [21] A. Khalfaoui, *Etude expérimentale de l'élimination de polluants organiques et inorganiques par adsorption sur des matériaux naturels : Application aux peaux d'orange et de banane*, Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Canstantine,2012.
- [22] D. Robert, S. Parra, C. Pulgarin, A. Krzton, JV. Weber, *Appl. Surf. Sci*, Vol 167, p51-58,2003.
- [23] J.Belegald, *Les colorants industriels*, Encyclopédie médico-chirurgicale pathologie du travail, intoxications maladies par agents physiques, Paris, p5,1987.
- [24] <https://docplayer.fr/5264860-Les-colorants-artificiels-dans-les-denrees-alimentaires-destinees-aux-enfants.html>.
- [25] <https://naturolistique.fr/histoire-des-additifs-alimentaires/>.
- [26] <http://tpefglescolorantsalimentaire.e-monsite.com/pages/ii-l-histoire-des-colorants.html>.
- [27] C.F.I. Jabs, H.P. Drutz, *Am. J. Obstet, Gynecol*, p1368-1373,2001.
- [28] S. Moncada, R.M. Palmer, E.A. Higgs, *Revue Pharmacol*, p109–142,1991.
- [29] <https://www.laboratuvar.com/fr/gida-analizleri/kimyasal-analizler/rhodamine-b-analizi-hplc>
- [30] A. Choumane, W. Mahsar, *Etude de l'élimination de la Rhodamine B par adsorption sur la bentonite brute et traitée*, Mémoire de Master, Université Dr. Moulay Tahar, Saida,2014.
- [31] http://wiki.scienceamusante.net/index.php/Rhodamine_B
- [32] A. EL Allaoui, F. Rhazi, B. Oumokhtar, J. Ibjibijen, *Mersenne : Science Lib Editions*, Volume 3, N° 111116,2011.
- [33] C. A. Costa, A. E. Rodrigue, *Adsorption at the gaz-solid and liquid-solid interface*, Edition : Elseiver Science. Publisher, Amesterdam, 1982.
- [34] M. A. Oturan, *Traitement des polluants organique en milieux aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée, Electro-fenton, Application à la minéralisation des colorants synthétiques*, Thèse de Doctorat, Université de Marne la vallée, 2004.
- [35] R. Perrin, J.P. Scharef. *Chimie industrielle* 2° éditions, Donud,1996.
- [36] H. Bouziani, C. Haidra, *Dégradation des colorants organiques par photocatalyse hétérogène à base de l'oxyde de Titane*, Mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université de USTO-MB, Oran,2008.
- [37] S. Zakaria Radouane, *Elimination d'un polluant organique par des photo-inducteurs en phase homogène et hétérogène*, Thèse de Magister, Université de Constantine,2010.
- [38] Bailleux, 2003 ; Ozerov et al.2000 ; Fay, 2003, Peternel et al,2007.
- [39] S. Hammami, *Etude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation*, Thèse de Doctorat, Université Paris-Est,2008.
- [40] <https://id.erudit.org/iderudit/1006453ar>.

- [41] M. Styliidi, D.I. Kondarides, X.E. Verykios, *Mécanismes et étude cinétique de dégradation photocatalytique solaire induite par de l'acide Orange 7 dans une solution aqueuse de TiO₂ Suspensions*, Thèse de Doctorat, p5, p59-67,2003.
- [42] K.I. Suzuki, D.F. Ollis, H. Al-Ekabi, *Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air*, Edition : Elsevier Science Publishers, Amsterdam, p421-434,1993.
- [43] Y. Sakuratani, Y. Noguchi, K. Kobayashi, J. Yamada, T. Nishihara, *Molecular size as a limiting characteristic for bioconcentration in fish*, J. Environ. Biol, p89-92,2008.
- [44] M. Capon, V. Courilleu, C. Valette, *Chimie des couleurs et des odeurs*, Nantes, Edition : Culture et technique,1999.
- [45] Kormann C, DW. Bahnemann, M. Hoffmann, *La photolyse de chloroforme et d'autres molécules organiques en milieu aqueux TiO₂ suspensions*, Thèse de Doctorat, Marburg, p25, p494-500,1991.
- [46] Degremont, *Mémento Technique de l'eau*, Neuvième Edition,1989.
- [47] F. Edeline., *L'épuration biologique des eaux résiduaires*. Edition : Tec & Doc, Paris,1988.
- [48] M. Styliidi, D.I. Kondarides, X.E. Verykios, *Photochemistry*, Inter J, p59-67,2003.
- [49] H.R. Hitz, W. Huber, R.H. Reed, *Dyers and colorists*, J. Soc p71-76,1978.
- [50] S. Moumenine, *Elimination de polluants des eaux d'usines par adsorption sur charbon de chêne en combinaison avec un désinfectant*, Thèse d'Ingénieur, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen,2011.
- [51] E. Weber, N.L. Wolfe, *Toxicol. Techn*, Revue Environ, p6, p911-920,1987.
- [52] A. Montiel, *Traitement de potabilisation des eaux, Garantie de teneurs minimales en micropolluants minéraux*, Revue Française des laboratoires, p45-49,2004.
- [53] C. Anselme, E.P. Jacobs, *Water treatment membrane processes*, McGraw Hill, New York, p401-1087, 1996.
- [54] K. Hunger, *Industrial dyes : chemistry, properties, applications*, Edition : Wiley-Vch,2003.
- [55] L. Naidja, *Elimination du colorant orange en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption*, Thèse de Magistère, Université de Constantine, p23,2010.
- [56] S. Hammami, *Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée*, Thèse de Doctorat, Université Paris-Est,2008.
- [57] E. Emna, *Géochimie de l'environnement, Réactivité de surface d'argiles naturelles, Etude de l'adsorption de colorants anioniques*, Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, p47, p58-59,2011.
- [58] I. Bounour, *Modélisation des isothermes d'adsorption dans le cas de : phénol et de bleu de méthyle sur le charbon actif en grain*, Mémoire d'Ingénieur d'Etat, Ecole nationale supérieure polytechnique,2009.
- [59] F. Bouazza, *Elimination des polluants organiques par des argiles naturelles et modifiées*, Thèse de Magistère, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, p9-11,2012.
- [60] S. Arris, Chebira, *Etude expérimentale de l'élimination des polluants organiques et inorganiques par adsorption sur des sous-produits de céréales*, Thèse de Doctorat, Université de Mentouri, Constantine, p26,2008.
- [61] C. Ayral, *Elimination de polluants aromatiques par oxydation catalytique sur charbon actif*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, p42,2009.

- [62] L. Jullien. *Document d'accompagnement de chimie organique II*, 2005.
- [63] L.M. Sun, F. Meunier, *Adsorption aspects théoriques*, Thèse de Technique de l'Ingénieur, Centre Français, p2730,2003.
- [64] Afnor. *La qualité des sols, thermologie, échantillonnage, contrôle et qualité*. Tomme 1, Editor Afnor, Paris, p 299-310,1996.
- [65] C. Abdelouahab, H. Ait Amar, T. Z. Obretenov, A. Gaid, *analysis*, p16, p292-299,1988.
- [66] E. Emna, *Réactivité de surfaces d'argiles naturelles étude d'adsorption de colorants anioniques*, Thèse de Doctorat,2011.
- [67] S. Chitour, *Chimie physique des phénomènes de surface*, Edition : OPU, Alger,1976.
- [68] O. Abid, *Adsorption par le charbon actif de micropolluants organiques en solutions Aqueuse*, Thèse Institut Nationale polytechnique, Toulouse ,1987.
- [69] <https://docplayer.fr/9231029-Notes-de-cours-de-l-adsorption-industrielle-m-hemati.html>
- [70] M. S. oull, *Cours de procédés unitaires biologiques et traitement des eaux*, office des publications universitaire, 2008
- [71] S. Guiza, M. Bagane, *Étude cinétique de l'adsorption du rouge de Congo sur une bentonite*, Revue des Sciences de l'eau, p26, p39-51,2013.
- [72] H. Maiza, *Modélisation des cinétiques d'adsorption dans le cas du phénol et du bleu de méthyle sur le charbon actif en grain*, Mémoire d'Ingénieur d'Etat, Ecole Nationale Supérieur Polytechnique, p3-4,2012.
- [73] C.H. Giles, D. Smith, A. Huitson, *A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm*, Journal of Colloid and Interface Science, p755-765,1974.
- [74] A.Yaacoubi, M. Mazet, O. Dusart, *Compétition d'adsorption de deux solutés sur charbon actif : cas du dodecyl sulfate de sodium, des alcools, des phénols*, Revue Water Research , Vol 25, p929-937,1991.
- [75] A. Dabrowski, P. Podkoscielny, Z. Ubicki, M. Barezak, *Adsorption of phenolic compounds by activated carbon*, Review Chemosphere, p1049-1070 ,2005.
- [76] M. Belmouden, *Contribution à l'étude de l'adsorption de deux familles de polluants organiques sur charbon actifs et sols*, Thèse de Doctorat, Université Agadir,2000.
- [77] M.A. Slasli, *Modélisation de l'adsorption par les charbons microporeux*, Thèse doctorat, Université de Neuchatel,2002.
- [78] I. Langmuir, *The adsorption of gases on plane surfaces of glass, Mica and, Platinum*, Journal of American Chemical Society, p1361–1403,1918.
- [79] H. Freundlich, *Colloid and Capillary Chemistry*, Methuen, London,1926.
- [80] Dj. Belkhar Chouche, *Adsorption du bore par les alumines modifiées*, Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine,2010.
- [81] D. Paul, *Livre aide-mémoire de chimie organique, nomenclature et réactivité*, Dunod, Paris,2006.
- [82] E. Emna, *Réactivité de surfaces d'argiles naturelles étude d'adsorption de colorants anioniques*, Thèse de Doctorat ,2011.
- [83] <https://fr.sawakinome.com/articles/inorganic-chemistry/difference-between-mineral-and-element.html>
- [84] Christian Demaret, *Livre les minéraux, comment les nettoyer, les conserver*,1995.

- [85] Christian Demaret, Livre *les minéraux, comment les nettoyer, les conserver*, 1995.
- [86] <https://www.cmpb.net/fr/collectionner.php>.
- [87] P. C. Nogueira, M. P. Rocha, W. R. Borges, A. M. Silva, *Étude du gisement de fer à l'aide de la sismique réflexion et la résistivité de Carajás Mineral*, Province, Journal de géophysique appliquée, p133, p116-122, Brésil, 2016.
- [88] F. L. Da Silva, F. G. S. Araújo, M. P. Teixeira, R. C. Gomes, F. L. Von Krüger, *Étude de la récupération et le recyclage des résidus provenant de la concentration du minerai de fer pour la production de céramique*, Revue : International de céramique, p40, p16085-16089, 2014.
- [89] M. C. Fuerstenau, K. N. Han, *Principes de traitement des minerais*, Edition : Séparation liquide-solide, 2003.
- [90] <https://mineralseducationcoalition.org/minerals-database/strontium/>
- [91] <https://www.pierres-lithotherapie.com/celestine-proprietes/>
- [92] <https://geodes-et-mineraux.fr/boutique/geode/celestine-blanche-madagascar/>
- [93] <https://www.lithotherapie.net/articles/nettoyage-et-purification-des-pierres-de-lithotherapie/>
- [94] <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k97841573/texteBrut>.
- [95] <http://www.jewellery.org.ua/stones-katalog-engl/mineral-celestin.htm>.
- [96] <https://www.algerie-eco.com/2017/10/06/secteur-stagnation-gouvernement-enclin-a-exploiter-ressources-minieres/>.
- [97] <https://zergounbrothersgroup.com/mining/mine-de-celestine/>.
- [98] S. Moulla, J. Thibieroz, *Le gisement de célestine du Trias extrusif de Béni - Mansour (Béjaïa, Algérie) : traces, cathodoluminescence et inclusions fluides dans les carbonates et sulfates*, Bulletin du service géologique de l'Algérie, Vol. 6, p. 161-177, France, 1995.
- [99] <https://zergounbrothersgroup.com/mining/mine-de-celestine/>.
- [100] N. Benabdeslam, *Influence de la matière organique de phosphate noir de Djebel Onk (Tébessa-Algérie) sur le procédé de traitement*, Thèse de Doctorat, Université de A. Mira, Bejaia, 2007.
- [101] <https://zergounbrothersgroup.com/mining/mine-de-celestine/>.
- [102] M. Zamouche, O. Hamdaoui, *Etude de la modélisation de sorption de la Rhodamine B par les pommes de cèdre*, Thèse de Magister, 2010.
- [103] A. Newman, *X-ray Powder Diffraction in Solid Form Screening and Selection*, Am. Pharm. Review, p 14, p44-51, 2011.
- [104] F. Ait Merzeg, *Valorisation des rejets de minerai de phosphate naturel de Djebel Onk par flottation inverse*, Mémoire de Magister, Université A. Mira, Béjaïa, 2010.

Résumé :

Les effluents industriels notamment les colorants textiles et alimentaires représentent une source de pollution très importante et constituent d'une façon générale un problème environnemental et sanitaire majeur. A cet effet, l'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité du minerai de Célestine et de le caractériser par l'analyse DRX dans le but d'avoir la composition chimique de l'échantillon concentré par un enrichissement gravimétrique prélevé du minerai de Célestine de Beni Mansour située dans la wilaya de Bejaia et confirmer le résultat par la FX pour un échantillon brute et voir la forte teneur en élément Strontium. En plus, faire passer l'échantillon par MEB pour montrer sa forme poreuse qui le qualifie comme un bon adsorbant qu'on puisse l'exploiter dans plusieurs procédés tel que l'épuration des eaux usées issues des rejets textiles.

Mots clés : Colorants alimentaires, Adsorption, Minerai de Célestine, Valorisation.

Abstract :

Industrial effluents, in particular textile and food dyes, represent a very significant source of pollution and generally constitute a major environmental and health problem. To this end, the objective of this study is to evaluate the capacity of the Celestine ore and to characterize it by the DRX analysis in order to have the chemical composition of the sample concentrated by a gravimetric enrichment taken from the ore. of Célestine from Beni Mansour located in the wilaya of Bejaia and confirm the result by the FX for a raw sample and see the high content of the element Strontium. In addition, pass the sample through SEM to show its porous form which qualifies it as a good adsorbent that can be used in several processes such as the purification of wastewater from textile waste.

Keywords : Food coloring, Adsorption, Celestine ore, Valorization.