REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie des procédés
Spécialité : Génie chimique

Amélioration de la qualité de l'eau potable de la région de Médéa

Présenté par :

SAIDI Rayane

ABDELLI Wafaa

Proposé et Dirigé par :

Dr. KHALLADI Razika

Mme. LOUNES Mounia

Promotion 2022/2023

Remerciements

Avant tout je remercie Allah pour la santé la patience le courage et la force que il m'a donné durant toutes mes années d'études.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre directrice de mémoire, Madame KHALLADI Razika, Mme. LOUNES Mounia notre Co-promotrice et Ingénieur au niveau de l'Algérienne des eaux de Médéa. Qui ont accepté de nous accompagner dans ce projet intéressant et passionnant, et que nous remercions sincèrement pour leur soutien permanent et les conseils qu'ils nous ont prodigués tout au long de ce travail.

Nos vifs remerciements s'adressent aussi à Mme DJEZZAR Souad, Directrice de l'Algérienne des eaux de Médéa, pour avoir accepté de nos recevoir dans son établissement dans le cadre d'un stage pratique, qui nous a été très avantageux.

Nous adressons nos sincères remerciements aux Professeurs Mme YOUS Radia et CHERIFI Hakima pour leurs précieux conseils et aides.

Nous remercions aussi tout le personnel et membres de l'ADE Médéa et du Labo pédagogique.

Nous remercions nos chers parents, qui ont toujours été là pour nous.

Enfin, Nous adressons à tous ceux qui ont contribué en ce modeste travail de près ou de loin, notre respect et notre gratitude.

Dédicace :

Je dédie cet humble travail à :

A l'homme de ma vie, mon idéal éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à mon père.

A mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de moi joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié, maman.

A mon frère Fateh pour l'amour qu'il me réserve.

A ma chère sœur Hadjer pour le soutien dont elle a fait preuve pendant toute la durée de ce travail, à mes anges Wail et Wassim.

A tout la famille SAIDI et OULDCHAKMEKDJI.

Sans oublier mon binôme Wafaa.

A tous mes collègues de Génie chimique.

Rayane

Dédicace :

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail tous d'abord à : Mon Islam «صلى الله عليه وسلم» Mohamed prophète Mon Et ma très chère Algérie.

A mes très chers parents qui m'ont soutenu et encouragé durant toute la période de mes études et à qui je souhaite une longue et heureuse vie, que dieu les protège et me donne la force pour que je puisse leurs rendre un petit peu de leurs bien faits malgré que je ne peux jamais arriver à faire ça.

A mes très chères sœurs : Samia, Amina.

A mes très chers frères : Mohamed, Abderahmane
Aux fleurs de la famille : Ibtihal, Saleh dinne, Sirine.

Sans oublier mon binôme Rayane.

A tous mes collègues de Génie chimique.

Wafaa

ملخص

تحسين جودة مياه الشرب في منطقة المدية

هذا العمل يندرج في إطار تحسين جودة مياه الشرب في منطقة المدية. الهدف من هذا العمل هو اختبار فعالية الطين الطبيعي؛ وهي البنتونيت ليحل محل الكربون المنشط التجاري المستخدم بالفعل في محطة معالجة المياه. تم اختيار الميثيل البرتقالي باعتباره الملوث النموذجي.

أولاً، تم تقدير القيم الأمثل للعوامل: كتلة المادة الممتزة، والتركيز الأولي للمادة الملوثة ووقت الاتصال للحصول على أقصى قدر من الامتزاز. بعد ذلك، تم فحص حركية وديناميكا الامتزاز من خلال تطبيق القيم الأمثل للعوامل. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن 86,73٪ من الصبغة قد تم التخلص منها, لكتلة ممتزة مقدارها 2 جم ، وتركيز أولي من الملوث 100 ملجم / لتر ، وزمن تلامس قدره 60 دقيقة. إن ظاهرة الامتزاز تتبع نموذج متساوي الحرارة لانجمويز 0,9853 من وندليچه 0,9784 . والنموذج الحركي المناسب هو نموذج الدرجة الثانية . و أدى استخدام البنتونيت في ظل الظروف المثالية على المياه شبه المعالجة إلى تحسن كبير في بعض المعايير الفيزيائية والكيميائية ، مثل اللون ، ودرجة الحموضة ، 15-،0,47 .

الكلمات المفتاحية: بنتونيت ، امتزاز ، ماء ملوث ، صبغة ، ميثيل أورانج ، حركية.

Résumé

Amélioration de la qualité de l’eau potable de la région de Médéa

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l’amélioration de la qualité de l’eau potable de la région de Médéa. L'objectif de ce travail est de tester l’efficacité d’une argile naturelle ; à savoir la bentonite pour substituéer le charbon actif commerciale utilisé réelement au niveau de la station d’épuration des eaux. Le méthyl orange a été choisi comme polluant modèle.

En premier, l’optimisation des paramètres : la masse de l’adsorbant, la concentration initiale du polluant et le temps de contact pour avoir un maximum d’adsorption a été réalisée. Ensuite, la cinétique et la thermodynamique de l’adsorption ont été investiguées en appliquant les valeurs optimales des paramètres. Les résultats obtenus ont montré que 86,73 % de colorant a été éliminée pour une masse de l’adsorbant de 2 g, une concentration initiale du polluant de 100 mg/l, et un temps de contact de 60 minutes. Le phénomène

d'adsorption suit de Langmuir 0,9853 de Freundlich 0,9784 l'isotherme de Et le modèle cinétique adéquat est celui du pseudo-second ordre. L'application de la bentonite sous les conditions optimisées sur l'eau semi traitée, a nettement amélioré quelques paramètres physico-chimiques, tels la couleur, le pH, -15, -0,47.

Mots clés : Bentonite, adsorption, Eau polluée, colorant, Méthyl orang, cinétique.

Abstract

Improving drinking water quality in the Médéa region

This work is part of the improvement of the quality of drinking water in the region of Médéa. The objective of this work is to test the effectiveness of a natural clay; namely bentonite to substitute the commercial activated carbon actually used at the water treatment plant. Methyl orange was chosen as the model pollutant.

First, the optimization of the parameters: the mass of the adsorbent, the initial concentration of the pollutant and the contact time to have a maximum of adsorption was carried out. Then, the kinetics and thermodynamics of the adsorption were investigated by applying the optimal values of the parameters. The results obtained showed that 86,73 % of dye was eliminated for an adsorbent mass of 2 g, an initial concentration of the pollutant of 100 mg/l, and a contact time of 60 minutes. The phenomenon of adsorption follows the Langmuir isotherm 0,9853 of Freundlich 0,9784. And the adequate kinetic model is that of the pseudo-second order. The application of bentonite under optimized conditions on semi-treated water has significantly improved some physico-chemical parameters, such as color, pH, -15, -0,47.

Key words: Bentonite, adsorption, polluted water, dye, Methyl orang, kinetics.

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....**i**

LISTE DES ABRÉVIATIONS.....**v**

NOMENCLATURE.....**v**

LISTE DES FIGURES.....**vii**

LISTE DES TABLEAUX.....**ix**

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....1

Chapitre I : Pollution des eaux

I.1.Introduction.....3

I.2.Définition de pollution.....3

I.3.Définition de la pollution des eaux.....3

I.4. Sources de pollution de l'eau.....4

I.5. Types de pollution.....4

I.5.1. Pollution chimique.....4

I.5.2. Pollution physique.....4

I.5.3. Pollution biologique.....5

I.6. Conséquences de la pollution des eaux.....5

I.6.1. Effets sur les humains.....5

I.6.2. Effet sur l'écosystème.....5

I.6.3. Effet sur les activités économiques.....6

I.7. Les colorants.....6

I.7.1. Historique des colorants.....6

I.7.2. Définition d'un colorant :.....7

I.7.3 Classification des colorants :.....8

I.7.3.1 Classification technologique ou (appellation usuelle) :.....8

I.7.3.2.Classification technique :.....9

I.7.3.3 Classification chimique : 9
I.7.3.4 Classification tinctoriale 13
I.7.4 Utilisation des colorants : 14
I.7.5.Toxicité des colorants 15
I.8. Méthyl orange 15
I.8.1.Toxicité du méthyl orange : 17
I.8.2. Travaux antérieurs : 17
I.9. Traitement des eaux : 18
I.10. Le traitement des eaux adopté par ADE de Médéa 19
I.11. Conclusion : 20

Chapitre II : Adsorption

II.1. Introduction : 21
II.2 Définition : 21
II.3. Types d'adsorption : 21
II.3.1.Adsorption physique (physisorption) : 21
II.3.2.Adsorption chimique (chimisorption) : 22
II.4. Mécanisme d'adsorption : 23
II.5. Les facteurs influençant l'adsorption : 23
II.5.1. Nature de l'adsorbant : 24
II.5.2. Nature de l'adsorbat : 24
II.5.3. pH : 24
II.5.4. La température 24
II.5.5. La concentration 24
II.6. Cinétique d'adsorption 24
II.6.1. Modèle cinétique de pseudo-premier ordre 24
II.6.2. Modèle cinétique de pseudo-second ordre : 24
II.7. Isothermes d'adsorption : 26

Sommaire

II.7.1. Classification des isothermes d'adsorption : 26

II.7.2. Modélisation des isothermes d'adsorption : 27

II.8. Bentonite : 29

II.8.1. Définition : 29

II.8.2. Origine de la Bentonite : 29

II.8.3. Structure de la bentonite : 39

II.8.4. Domaines d'application de la bentonite 31

II.9.Conclusion 31

Chapitre III: Partie expérimentale

III.1. Introduction 32

III.2. Matériel et méthode 32

III.2.1.Réactifs et produits utilisés 32

III.2.2. Petit matériel 32

III.2.3. Verrerie de laboratoire 32

III.2.4. Appareillage 33

III.3. La spectroscopie infrarouge (IR) 34

III.4. La spectroscopie UV- visible 35

III.4.1.Loi de Beer-Lambert 36

III.5. Procédé expérimental 38

III.5.1. Caractérisation par spectroscopie infrarouge 38

III.5.2. Détermination de λ max de l'orange méthyl 40

III.5.3. Courbe d'étalonnage 40

III.6. Optimisation des paramètres de l'adsorption 42

III.6.1.Calcul de la quantité adsorbée 42

III.6.2.Détermination du taux d'élimination 42

III.6.3. Effet du temps de contact 42

III.6.4. Influence de la concentration de l'adsorbant sur l'adsorption 44

III.6.5. Influence de la concentration initiale de l'adsorbat 45

III.6.6. Effet de la température 45

Sommaire

III.7. Etude cinétiques d'adsorption 46

III.8. Isotherme d'adsorption 49

III.9. Etude thermodynamique 52

III.10. Application sur l'eau semi traitée au niveau de l'ADE 53

III.11. Conclusion 56

Conclusion générale 57

Références Bibliographique 59

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abs	absorbance.
ADE	Algérienne des eaux.
IR	Infrarouge
IRTF	spectres infrarouges par transformée de Fourier
MO	Méthyl Orange
NTU	Turbidité
Sal	Salinité
TAC	Titre Alcalimetrique Complet
Th	Dureté
UV	Ultra-violet

NOMENCLATURE

Symbole	Désignation	Unité
ε	Coefficient d'extinction molaire	$cm^{-1}.l.mol^{-1}$
C_b	Concentration de la bentonite	g/l
C_t	Concentration a l'instante t	mg/l
C_0	Concentration résiduelle à l'équilibre	mg/l
C_1	Concentration de solution mère	g/l
C_2	Concentration de solution fille	g/l
I_0	Intensité du faisceau incident	[-]
K_e	La constante thermodynamique de l'équilibre de l'adsorption	[-]
K_f	Constantes tenant compte la capacité d'adsorption	[-]
K_1	Constante de vitesse d'adsorption pour le premier ordre	min^{-1}
R^2	Coefficient de corrélation	[-]
V_1	Volume de solution mère	ml
V_2	Volume de solution fille	ml
k_2	Constante de vitesse du pesudo-second- ordre	g/mg/min
q_e	Quantité de colorant par gramme d'adsorbant	mg/g
q_t	La capacité d'adsorption au temps t	mg/g
1/n	Constantes tenant compte la capacité d'adsorption	[-]
b	Constante d'équilibre caractéristique d'adsorbant	[-]
E%	Taux d'élimination de colorant	[-]

Liste des abréviations

I	Intensité du faisceau émergent	[-]
L	l'épaisseur de la solution traversé ou trajet optique	cm
m	Masse de l'adsorbant	g
pH	Potentiel d'hydrogène	[-]
R	la constante des gaz parfaits	J/ mol K
T	Température	C°
t	temps de contact	min
ΔG°	L'enthalpie libre	[-]
ΔH°	L'enthalpie	[-]
ΔS°	L'entropie	[-]
λ	Longueur d'onde	nm
ω	Vitesse d'agitation	tours/min

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre de figure	Page
Chapitre I		
Figure I. 1	Interactions lumière /matière	7
Figure I. 2	Structure de la molécule azoïque	10
Figure I. 3	La molécule anthraquinone (9,10-dihydro-9,10-dioxoanthracéne, dérivé de l'anthracène)	10
Figure I.4	Structure du colorant triphénylméthane	11
Figure I. 5	Structure moléculaire d'un colorant xanthène	11
Figure I. 6	Exemple de colorant indigoïdes	12
Figure I. 7	Colorant Phtalocyanines	12
Figure I. 8	Exemple de colorant nitré	13
Figure I. 9	Méthyl orange en poudre	16
Figure I. 10	La structure de méthyle orange	16
Chapitre II		
Figure II. 1	Mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain	23
Figure II. 2	Classe des isothermes d'après Gilles et al	27
Figure II. 3	La bentonite	29
Figure II. 4	Structure de la montmorillonite	30
Chapitre III		
Figure III.1	Le spectrophotomètre infrarouge (IR)	35
Figure III.2	Spectrophotomètre UV-VISIBLE	36
Figure III.3	Schéma du trajet lumineux à travers une cuve d'un spectrophotomètre	37
Figure III.4	Spectre IR de la bentonite avant l'adsorption	38
Figue III.5	Spectre IR après l'adsorption	39
Figure III.6	Solution mère de MO	40
Figure III.7	Pic de solution diluée MO	40
Figure III.8	Solutions diluées	41
Figure III.9	Courbe d'étalonnage de MO	41
Figure III.10	Cinétique d'adsorption du méthyle orange sur la bentonite	43
Figure III.11	La quantité adsorbée et le rendement d'adsorption en fonction de la concentration de l'adsorbant	44

Liste des Figures

Figure III.12	La quantité adsorbée et le rendement en fonction de la concentration initiale d'adsorbat	45
Figure III.13	Effet de la température sur l'adsorption du MO	46
Figure III.14	Cinétique d'adsorption de MO sur la bentonite	47
Figure III.15	Modèle cinétique de pseudo-premier ordre	48
Figure III.16	Modèle cinétique de pseudo-second ordre	48
Figure III.17	Isotherme d'adsorption de MO sur la bentonite	50
Figure III.18	Modélisation de l'isotherme selon le modèle de Langmuir	51
Figure III.19	Modélisation des isothermes selon le modèle de Freundlich	51

LISTE DES TABLEAUX

Table	Titre de table	Page
Chapitre I		
Table I. 1	Principaux groupes chromophores et auxochromes classés par intensité croissante.	8
Table I. 2	Classes des colorants utilisés dans la coloration du textile	14
Table I. 3	Propriétés physico-chimique du méthyle orange	16
Table I. 4	Les articles et les thèses sur MO	17
Chapitre II		
Table II. 1	Différences principales entre les deux types d'adsorption	22
Chapitre III		
Table III.1	Matériels utilisés	33
Table III.2	Résultats des spectres IR avant et après l'adsorption	39
Table III.3	La valeur λ max de l'adsorbat	40
Table III.4	Les paramètres des Modèles cinétiques, pseudo-premier ordre et pseudo-seconde ordre	49
Table III.5	Les paramètres du modèle de Langmuir pour l'adsorption de MO sur la bentonite	52
Table III.6	Les paramètres thermodynamiques de l'adsorption du MO sur la bentonite	53
Table III.7	Résultats des analyses physicochimiques des eaux de barrage Ghrib.	54

Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'eau représente le constituant majeur de la matière vivante. Chez la plupart des êtres vivants, la teneur en eau est de l'ordre de 70% voire davantage [1]. C'est pourquoi la pollution de l'eau est l'un des plus grands problèmes auxquels nous devrons faire face dans les décennies à venir, car elle met en risque une ressource beaucoup plus rare qu'il n'y paraît [2].

La pollution de l'eau, est toute modification chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau qui a un effet néfaste sur les organismes qui la consomment. La pollution de l'eau des rivières et des lacs, et la pollution encore plus difficile des eaux souterraines, sont parmi les nuisances les plus courantes et celles qui peuvent causer les dommages les plus immédiats à l'environnement. Au cours de notre vie lorsque les humains consomment de l'eau polluée, il y a généralement des conséquences catastrophiques pour leur santé [3]. La pollution de l'eau peut également rendre l'eau impropre à l'usage auquel elle est destinée. On distingue; d'une part, les pollutions d'origine naturelle et, d'autre part, les pollutions dues aux activités humaines [4].

Les traitements physico-chimiques communs (adsorption, coagulation/floculation, précipitation, etc.) sont couramment utilisés pour les effluents industriels et dans les stations d'épuration des eaux potables. Malgré leur rapidité, ces méthodes se sont avérées peu efficaces compte tenu des normes exigées sur ces rejets. La pluparts des recherches ont montré que l'adsorption est la méthode la plus favorable pour l'élimination des impuretés et la moins nocive. Elle est très efficace et simple dans son application. Elle consiste à piéger le polluant par un matériau solide appelé adsorbant [5].

Actuellement, le charbon actif est l'adsorbant le plus communément employé grâce à son pouvoir adsorbant qui est très important vis-à-vis de la majorité des polluants, mais l'inconvénient est que le charbon actif coûte cher à cause de sa préparation qui demande de grands investissements (oxydation et incinération, broyage, tamisage, activation, conditionnement…). C'est dans ce contexte que nous nous sommes proposé de tester un adsorbant compétitif au charbon actif à base d'argiles disponibles en grande quantité dans notre pays du fait de son exploitation facile et peu coûteuse [6].

L'efficacité de la bentonite est testée pour l'élimination d'un colorant largement rencontré dans les eaux polluées; à savoir le méthyl orange. Les colorants sont

fréquemment utilisés dans les imprimeries, les produits alimentaires, cosmétiques et cliniques, mais en particulier 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. Compte tenu de la composition très hétérogène de ces derniers, leur dégradation conduit souvent à la formation de molécules nocives.

Donc, dans ce travail, nous utiliserons de la bentonite naturel et sans modification. Cette dernière est un minéral principalement composé d'argiles et constituée de minéraux smectiques. La bentonite est particulièrement appréciée en raison de sa composition chimique et de sa structure spécifique qui lui permettent d'être fonctionnelle dans un large éventail d'applications [7].

Ce manuscrit est partitionné en :

- Chapitre I : donne des généralités sur la pollution et les colorants
- Chapitre II : donne des généralités sur l'adsorption et les argiles.
- Chapitre III : Partie expérimentale

En fin, une conclusion générale synthétise l'ensemble des résultats obtenus au cours de ce travail de recherche et des perspectives sont proposées.

Chapitre Ⅰ : Pollution des eaux

I.1.Introduction

La pollution des eaux par les colorants est un problème environnemental majeur causé par les industries textiles, alimentaires et de production de papier. Les colorants sont utilisés pour donner une couleur aux tissus, aliments et papiers, mais une grande quantité de ces colorants se retrouve souvent rejetée dans les rivières, les lacs et les océans. Les colorants peuvent avoir des effets nocifs sur la vie aquatique et l'environnement en général, car ils sont souvent toxiques et peuvent affecter la qualité de l'eau. Ils peuvent également rendre l'eau inutilisable pour les activités humaines, telles que l'irrigation [4].

De plus, les colorants peuvent être difficiles à éliminer de l'eau et peuvent persister pendant de longues périodes de temps. Les méthodes traditionnelles de traitement de l'eau ne sont souvent pas suffisantes pour éliminer complètement les colorants, ce qui signifie que l'eau contaminée peut avoir des effets à long terme sur l'environnement et la santé humaine.

En fin de compte, la pollution des eaux par les colorants est un problème mondial qui nécessite une attention immédiate et des mesures de réglementation plus strictes pour réduire leur impact sur l'environnement et la santé humain.

I.2.Définition de pollution

La pollution est la destruction ou la dégradation d'un écosystème ou de la biosphère, généralement par l'homme, introduisant des entités (physiques, chimiques ou biologiques), ou des radiations qui altèrent le fonctionnement d'un écosystème. La pollution a des impacts majeurs sur la santé et la biosphère, comme en témoigne la façon dont l'exposition aux polluants et le réchauffement climatique modifient le climat de la Terre et ses écosystèmes, entraînant des maladies jusqu'alors inconnues dans certaines régions [8].

I.3.Définition de la pollution des eaux

L'eau est la deuxième substance la plus importante après l'air pour la vie humaine sur terre. Notre eau se compose d'eaux de surface telles que les rivières, les lacs, les océans et les eaux souterraines.

La pollution de l'eau décrit généralement l'introduction ou la présence de substances nocives ou indésirables suffisantes pour modifier l'indice de qualité de l'eau naturelle. La

pollution de l'eau douce (par exemple par l'eutrophisation, l'acidification et la contamination des eaux souterraines) réduit sa pureté. L'eau contaminée peut grandement affecter notre environnement et la vie de nombreuses espèces végétales et animales [9].

I.4. Sources de pollution de l'eau

La qualité des eaux de surface et des eaux souterraines reste un problème sérieux. Les sources de pollution sont généralement divisées en sources fixes et sources non stationnaires. Les sources ponctuelles sont des sources de pollution locales et spécifiques, telles que les centrales électriques, les raffineries, les mines, les usines, les stations d'épuration,… [10]. Cependant, les sources non ponctuelles sont celles réparties sur une vaste zone géographique telle qu'un bassin versant. Il est difficile à contrôler et peut provenir de diverses sources comme les pesticides, les engrais, les déchets industriels [11].

I.5. Types de pollution

La plupart du temps, il n'y a pas de source unique absolue d'émissions et différents types de pollution se mélangent et interagissent les uns avec les autres. Par conséquent, les eaux usées rejettent les déchets organiques et les détergents, dont certains sont également accompagnés de métaux lourds.

Il existe trois grandes familles de types de pollution.

I.5.1. Pollution chimique

Le polluant est une substance chimique de nature organique ou minérale résultant de diverses activités humaines ou industrieles. Ces polluants incluent les solvants, les métaux (Zn, Pb, Cd…), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorures diphényles (PCB), les composés pharmaceutiques, les pesticides, etc…. Lorsque des produits chimiques pénètrent dans le sol et les systèmes aquatiques, ils peuvent avoir un impact négatif sur les humains, le bétail et les poissons qui utilisent ces environnements. Dans le milieu aquatique, la pollution chimique des masses d'eau est très toxique pour les organismes aquatiques, ce qui inhibera leur croissance, affectera leur reproduction, et même entraînera leur mort [12,13].

I.5.2. Pollution physique

On parle de pollution physique lorsque le milieu marin est modifié dans sa structure physique par divers facteurs. Il peut s'agir :

- d'un rejet d'eau douce qui fera baisser la salinité d'un milieu aqueux.

- d'un rejet d'eau réchauffée ou refroidie (par une centrale électrique ou une usine de regazéification de gaz liquide),

- d'un rejet de liquide ou solide de substances radioactivités, ou modifiant la turbidité du milieu (boue, limon, ...), d'une source de [14].

I.5.3. Pollution biologique

Il existe de nombreux agents microbiologiques qui peuvent être à l'origine de cette pollution car elle est causée par la multiplication de micro-organismes (tels que protozoaires, virus, bactéries...) qui sont naturellement présents dans les eaux ou non. L'eau contenant certains de ces microbes peut provoquer des maladies telles que le choléra et la schistosomiase. Les effets de la pollution bactérienne sont omniprésents dans les zones où, les gens boivent de l'eau non traitée [15].

I.6. Conséquences de la pollution des eaux

La pollution de l'eau affecte les humains et la vie aquatique. La plupart des sources d'eau à proximité des villes et des centres urbains sont contaminées par le déversement légal ou illégal de déchets et de produits chimiques. Voici quelques-uns des effets les plus courants et les plus nocifs de la pollution de l'eau [16].

I.6.1. Effets sur les humains

-La pollution de l'eau résulte de la destruction de nombreuses sources d'eau douce d'où provient l'eau potable, comme les aquifères. Sa pollution entraîne la perte de ces sources d'eau douce, créant ainsi des zones qui n'atteignent pas l'eau potable malgré la présence d'eaux souterraines [17].

-L'ajout de polluants dans les masses d'eau a affecté la famille humaine de plusieurs façons. La consommation d'eau contaminée peut entraîner de graves problèmes de santé : diarrhée, choléra, hépatite A, typhoïde et décès. On estime qu'environ 5 millions de personnes meurent chaque année pour avoir bu cette eau [18].

I.6.2. Effet sur l'écosystème

-La pollution de l'eau peut également affecter les écosystèmes - elle peut entraîner un phénomène appelé eutrophisation. Ce sont les produits chimiques présents dans l'eau qui

favorise la croissance des algues. Ces algues forment une couche au-dessus de l'étang ou du lac. Les bactéries se nourrissent de ces algues, réduisant la quantité d'oxygène dans la colonne d'eau et affectant gravement la vie aquatique.

-La chaîne alimentaire est perturbée lorsque les animaux aquatiques (poissons, crustacés, etc.) consomment des toxines et des polluants présents dans l'eau, qui sont ensuite consommés par l'homme.

-L'introduction ou l'élimination de certains micro-organismes peut perturber les écosystèmes. Par exemple, la pollution par les nutriments peut provoquer la croissance d'algues, ce qui épuise l'eau en oxygène et tue les poissons et d'autres formes de vie aquatique [19].

I.6.3. Effet sur les activités économiques

Une autre conséquence de la pollution de l'eau est la hausse des prix des activités économiques, notamment celles liées à l'agriculture et à l'élevage, mais aussi à l'industrie, qui consomme de grandes quantités d'eau pour utiliser et nettoyer les machines. Comme il y a plus d'eau polluée sur la planète, l'utilisation de l'eau douce pour la boisson devient plus chère, ainsi que toute activité économique qui dépend de son utilisation [17].

I.7. Les colorants

I.7.1. Historique des colorants

Depuis le début de l'humanité, les colorants ont été utilisés dans presque tous les aspects de la vie quotidienne, y compris la peinture et la teinture du papier, du cuir, des vêtements et d'autres articles. Les produits de l'environnement naturel comprennent les plantes, les animaux et les minéraux. Les premières couleurs synthétiques remontent au milieu du XIXe siècle, et celles qui ont été utilisées étaient toutes des couleurs naturelles. Les pigments inorganiques tels que l'oxyde de manganèse et l'hématite sont utilisés comme encres. De plus, des colorants organiques naturels sont utilisés, notamment dans l'industrie textile. Ces colorants sont principalement des composés aromatiques d'origine végétale, tels que l'alizarine et l'indigo.

L'industrie des colorants synthétiques est née en 1856 lorsque le chimiste britannique WH Perkin a tenté de synthétiser la quinine synthétique pour traiter le paludisme, ce qui a donné le premier pigment synthétique, qu'il a appelé Mauve (aniline, le colorant principal).

Birkin a breveté son invention et a construit une chaîne de production que d'autres suivraient bientôt. De nouveaux colorants synthétiques ont commencé à apparaître sur le marché. Kekulé a découvert la structure moléculaire du benzène en 1865, qui a catalysé ce processus. Pour cette raison, les colorants synthétiques ont presque complètement remplacé les colorants naturels au début du XXe siècle [20].

I.7.2. Définition d'un colorant

Un colorant est une substance qui est utilisée pour pénétrer et donner sa couleur à un objet, par opposition à un pigment qui ne fait que recouvrir un objet. Le colorant tache de façon permanente une ou plusieurs structures [5].

La coloration est due aux molécules colorantes réfléchissant ou absorbant la lumière blanche à des longueurs d'onde bien définies. L'absorption de quanta de lumière entraîne une transition d'électrons, qui sautent d'un niveau d'énergie fondamental à un niveau d'énergie supérieur. Cette transformation est suivie par l'émission de lumière colorée. L'absorption sélective de l'énergie est réalisée par certains groupes d'atomes appelés chromophores (Figure I.1).

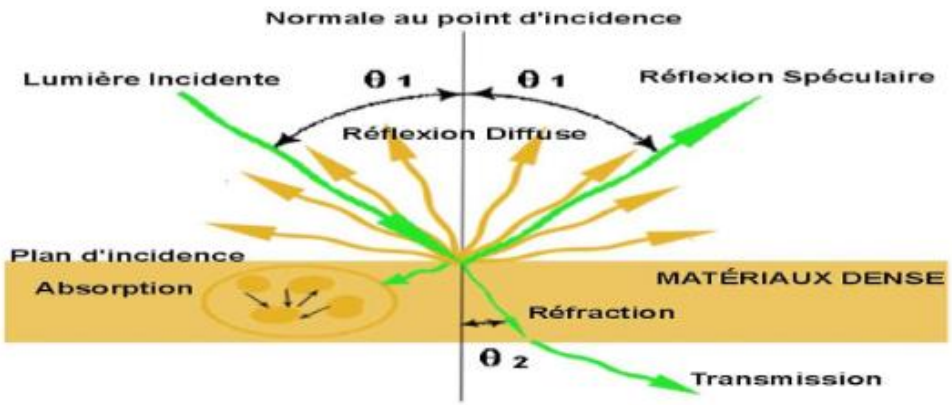


Figure I. 1: Interactions lumière /matière.

Les chromophores sont dérivés de groupes aromatiques contenant des paires d'électrons isolés ou des complexes de métaux de transition pour la coloration. Les auxochromes sont des groupes d'atomes ionisables qui modifient la fréquence d'absorption d'un chromophore. Ces groupes situés sur des systèmes aromatiques conjugués rejoignent la conjugaison par leurs doublets et absorbent aux grandes longueurs d'onde, rendant les couleurs plus intenses [21].

Table I. 1: Principaux groupes chromophores et auxochromes classés par intensité croissante.

Groupes Chromophores	Groupes Auxochromes
Azo (-N=N-)	Amine primaire (– NH_2)
Nitorozo (-N=O)	Amine secondaire (– NHR)
Carbonyl (=C=O)	Amine tertiaire (– NR_2)
Vinyl (-CH=CH-)	Hydroxyl (–OH)
Nitro (-NO2)	Alkoxyl (–OR)
Sulfure (>C=S)	Groupements donneurs d'électrons

I.7.3 Classification des colorants

Les colorants peuvent être classés de deux manières :

-La classification chimique est fonction de la structure chimique du colorant, et plus précisément de la nature de son chromophore.

-La classification selon le mode d'utilisation et d'application de la couleur qui dépend à son tour du groupe auxochrome [22].

I.7.3.1 Classification technologique ou (appellation usuelle)

La classification technologique permet à l'utilisateur de connaître le mode d'application du colorant, et donc ses domaines d'utilisation, ses propriétés (solubilité, affinité pour tel type de fibres ou matériaux, nature de la fixation …). Il est souvent difficile de connaître la composition chimique des colorants car la confidentialité sur la composition chimique est généralement préservée. Cette classification comprend trois éléments :

- Le nom générique de la classe d'application ;

- La couleur ;

- Le numéro d'ordre chronologique d'inscription au " colore index " [23].

I.7.3.2.Classification technique

Les colorants utilisés dans l'industrie textile contiennent habituellement des groupes acides sulfoniques qui leur confèrent une hydro solubilité appropriée et qui permettent à la molécule du colorant de se lier ioniquement aux sites chargés du réseau polymérique du tissu. On peut classer les colorants organiques en deux catégories suivant leur synthèse :

•Colorants naturels ;

• Colorants synthétiques.

Les colorants naturels :

Ils sont largement distribués, notamment dans les plantes (bois, racines, graines, fleurs et fruits), et même chez les micro-organismes et les animaux. Ils existent à l'état libre ou liés à des glucides ou des protéines, par exemple la garance, le carmin, l'indigo, le violet.

Aujourd'hui, l'importance économique des colorants organiques naturels a considérablement diminué. En raison de leur coût élevé, ils ne sont utilisés que pour des traitements spéciaux dans les industries du textile, du cuir et du papier. Cependant, ils sont encore largement utilisés dans l'alimentation, les cosmétiques et les produits pharmaceutiques et sont soumis à une réglementation plus stricte [24].

Colorants synthétiques

Les matières premières de ces composés sont des molécules telles que le benzène, qui est produit à partir de la distillation du charbon. A partir de matières premières, grâce à une série de processus chimiques, correspondant généralement à la substitution d'un ou plusieurs atomes d'hydrogène du produit de départ par des éléments ou radicaux spécifiques, nous pouvons obtenir des intermédiaires dits, qui seront utilisés pour fabriquer le colorant final [25].

I.7.3.3 Classification chimique

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore.

-Les figures dans cette partie représentent les structures des molécules.

a. Les colorants azoïques

Les colorants "azoïques" sont caractérisés par le groupe fonctionnel azo (-N=N) unissant deux groupements alkyles ou aryles identiques ou non (azoïque symétrique et dissymétrique) figure I.2. Ces structures qui reposent généralement sur le squelette de l'azobenzène, sont des systèmes aromatiques liés par un groupe chromophore azo [26].

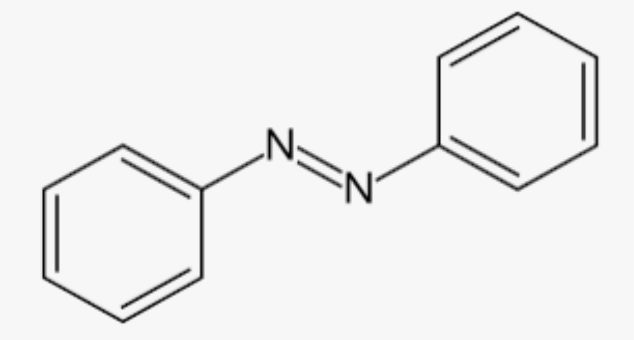


Figure I. 2: Structure de la molécule azoïque.

b. Les colorants anthraquinoniques

Les colorants anthraquinoniques sont les colorants commerciaux les plus importants après les colorants azoïques. Leur formule générale est dérivée de l'anthracène, ce qui indique que le chromophore est tout noyau auquel des groupes hydroxyle ou amino peuvent être attachés. Ces produits sont utilisés pour la teinture des fibres polyester, acétate et triacétate [5].

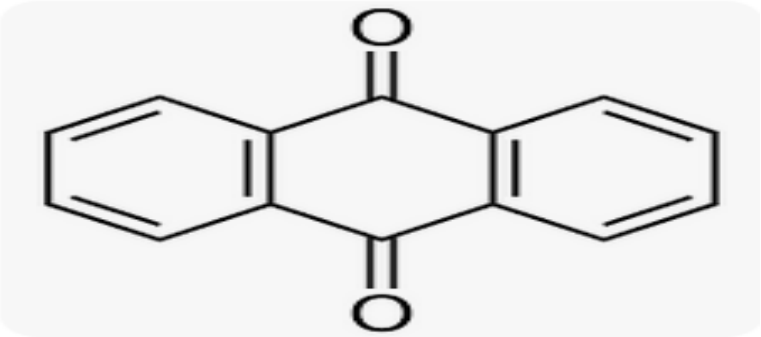


Figure I. 3: La molécule anthraquinone (9,10-dihydro-9,10-dioxoanthracéne, dérivé de l'anthracène).

c. Les colorants triphénylméthanes

Le triphénylméthane, un hydrocarbure contenant trois anneaux de benzène liés à un carbone central, est à l'origine des teintes de triphénylméthane. Les molécules chimiques colorées ont cette structure fondamentale. La première classe de colorants synthétiques est composée de couleurs de triphénylméthane et de leurs dérivés hétérocycliques.

Actuellement beaucoup plus importants que les colorants azoïques et anthraquinoniques, mais ils conservent un certain coût car ils peuvent couvrir toute la gamme des nuances. Dans l'industrie du papier et du textile, le triphénylméthane est fréquemment utilisé pour teindre le nylon, la laine, la soie et le coton. Ils sont utilisés en dehors de l'industrie. On les retrouve également dans le poisson et la volaille en tant qu'agents antifongiques et biomarqueurs dans le domaine médical [27].

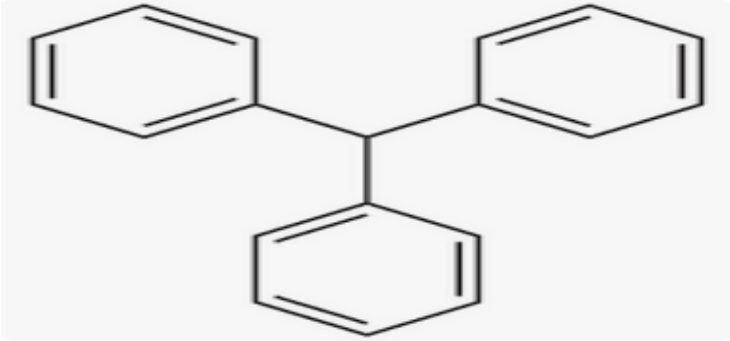


Figure I. 4: Structure du colorant triphénylméthane.

d. Les colorants xanthène

Ces colorants sont fortement fluorescents et rarement utilisés comme colorants, ils sont largement utilisés comme marqueurs lors d'accidents maritimes ou comme traceurs d'écoulement pour les rivières souterraines, les eaux usées, etc [27].

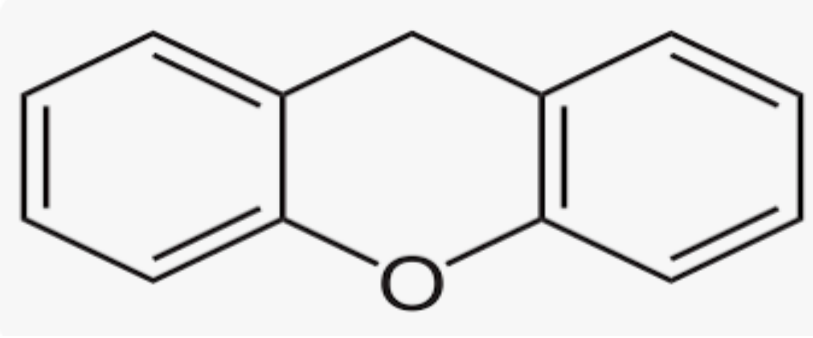


Figure I. 5: Structure moléculaire d'un colorant xanthène.

e. Les colorants indigoïdes

Les colorants indigo tirent leur nom du bleu indigo dont ils sont dérivés. Ainsi, les homologues de sélénium, de soufre et d'oxygène de l'indigo conduisent à un effet de réduction de couleur spectaculaire allant de l'orange au turquoise. L'indigo est utilisé comme colorant pour les textiles et comme additif dans les médicaments, la confiserie et les diagnostics médicaux [5].

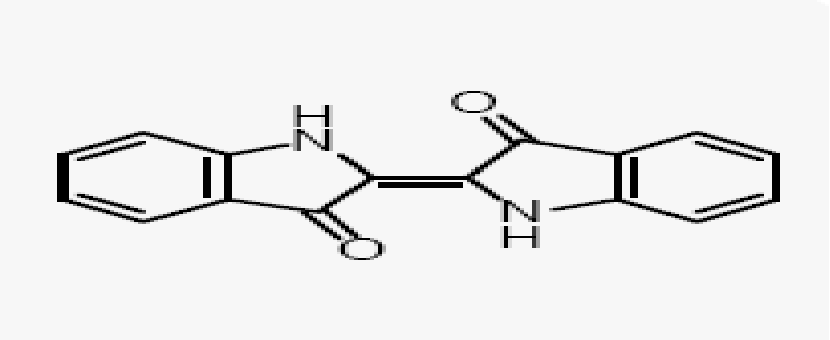


Figure I. 6: Exemple de colorant indigoïdes.

f. Les phtalocyanines

Ils ont une structure complexe basée sur l'atome central de cuivre. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, etc...) [5].

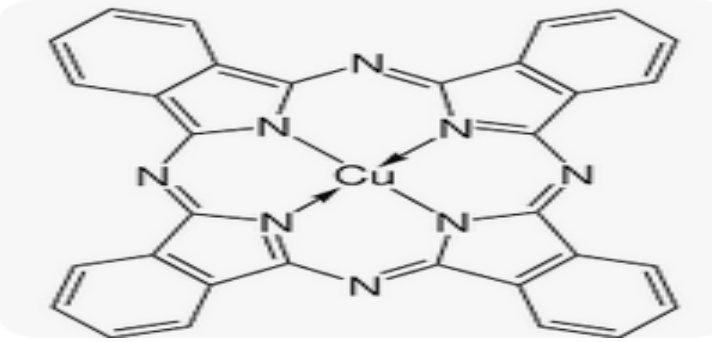


Figure I. 7: Colorant Phtalocyanines.

g. Les colorants nitrés et nitrosés

Ces colorants forment une classe très limitée en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés, du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur

structure moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (-NO2) en position ortho d'un groupement électro-donneur (hydroxyle ou groupes aminés) [28].

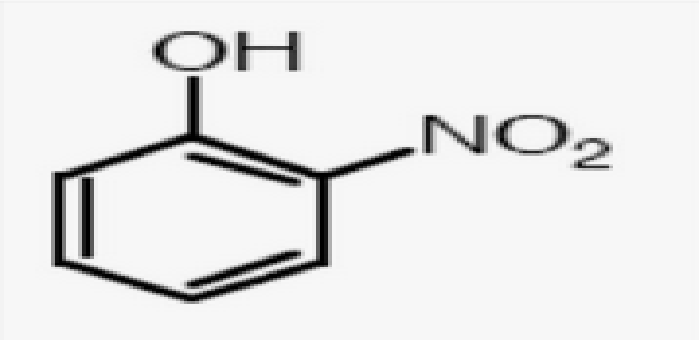


Figure I. 8: Exemple de colorant nitré.

I.7.3.4 Classification tinctoriale

Si les fabricants de colorants s'intéressent à la classification chimique, les teinturiers préfèrent la classification par domaine d'application. Ainsi, il est renseigné sur la solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité pour diverses fibres, et les propriétés de fixation de la couleur. Celle-ci varie en force selon que la liaison colorant/substrat est ionique, hydrogène, van der Waals ou covalente. Les différentes classes de colorants sont définies dans le tableau [29].

Table I. 2: Classes des colorants utilisés dans la coloration du textile.

Classe de colorant	Description
Acides	Composés anioniques, hydrosolubles, ex ; l'éosine aqueuse
Basiques	Hydrosolubles, appliqués dans les bains de teinture faiblement acides ; colorants très lumineux.
Directs	Composés hydrosolubles et anioniques ; peut être appliqué directement à la cellulose (ou métaux comme le chrome et le cuivre).
Dispersé	non hydrosoluble
Réactifs	Composés hydrosolubles et anioniques ; la classe la plus grande de colorant
Soufrés	Composés organiques contenant du soufre.
De Cuve	Insoluble dans l'eau ; les colorants les plus anciens ; plus complexe chimiquement.

I.7.4 Utilisation des colorants

L'industrie de la teinture constitue un marché économique important, car de nombreux produits industriels peuvent être colorés, principalement :

- colorants capillaires (industrie des cosmétiques) ;
- colorants et conservateurs (industrie pharmaceutique);
- pigments (industrie des matières plastiques) ;
- encre, papier (imprimerie) ;
- colorants alimentaires (industrie agro-alimentaire) ;
- pigments des peintures, matériaux de construction, céramiques (industrie du bâtiment) ;
- carburants et huiles (industrie automobile etc.,...) ;
- colorants textiles, de décoration, du bâtiment, du transport [30].

I.7.5.Toxicité des colorants

La toxicité des colorants provient de l'ignorance des chercheurs ou des utilisateurs de leurs structures chimiques, qui varient d'un type à l'autre. Ainsi que du mode de l'emploi lors de l'utilisation.

De nombreuses études ont montré que les colorants azoïques sont toxiques et/ou cancérigènes, ce qui signifie que les eaux usées contenant ces colorants doivent être traitées avant d'être rejetées dans le milieu naturel. Leur toxicité est en effet due à la présence de groupements cancérigènes tels que les groupements aromatiques, halogènes, cyanure, baryum et sel de plomb. Ces groupements cancérigènes (sous forme électrophile ou radicalaire) attaquent les bases pyrimidiques de l'ADN et de l'ARN et causent par conséquent, une altération du code génétique avec mutation et risque de cancer.

Miller s'est particulièrement intéressé à la toxicité des colorants azoïques, qui se caractérisent par la présence d'un groupement azoïque (N=N-). La rupture de cette dernière liaison azoïque conduit à la formation d'amines primaires, qui conduisent à la méthémoglobinémie, qui se caractérise par le blocage du transport de l'oxygène dans le sang. L'allergie respiratoire aux colorants réactifs a été rapportée pour la première fois en 1978 par Alankochez des sujets employés à la pesée et au mélange de ces colorants en poudre depuis deux ans et présentant un asthme et / ou rhinite d'origine professionnelle [31].

I.8. Méthyl orange

Le colorant étudié dans ce travail est l'hélianthine, également appelée Méthyl Orange (MO), Orange III ou orange méthyl. C'est un indicateur coloré utilisé en chimie pour marquer les milieux acides (devenir rose) ou basiques (devenir jaune - orange) (Figure 9). Par conséquent, il est utilisé pour la détermination acido-basique.

Le méthylorange (MO), l'un des acides aminés bien connus, a été largement utilisé dans les industries et laboratoires du papier, de l'imprimerie, du textile et de la pharmacie. Les colorants anioniques méthyl orange appartiennent au groupe des colorants azoïques. Le groupe de colorant azoïque contient de l'azote dans la molécule et il existe un groupe azoïque (N = N) sur le MO, qui est extrêmement faible. La biodégradabilité en fait un axe de la science environnementale [32].



Figure I. 9: Méthyl orange en poudre.

La structure moléculaire du méthyl orange est représentée sur la figure I.10.

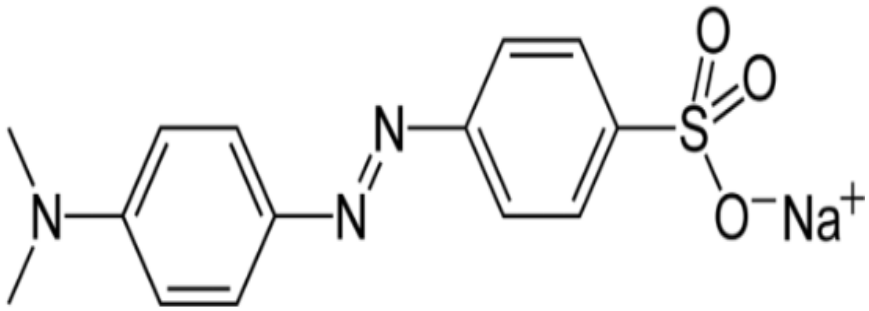


Figure I. 10: La structure de méthyle orange.

Quelques propriétés physiques et chimiques du méthyle orange sont regroupées dans le tableau I.3.

Table I. 3: Propriétés physico-chimique du méthyle orange.

État physique	Solide
Apparence et odeur	Poudre fine de couleur orange. Inodore
Formule moléculaire	C14H14N3NaO3S

Masse molaire	327,34 g/mol
PKa	3,7
Solubilité	5,2 g. L-1 dans l'eau 20°C 1,0 g. L-1 dans éthanol à 20°C

I.8.1.Toxicité du méthyl orange

- Un contact prolongé ou répété avec ce produit peut irriter la peau
- Nocif en cas d'ingestion peut causer une irritation gastro-intestinale accompagnée de nausées, de vomissements et de diarrhée.
- Peut irriter les voies respiratoires en cas d'inhalation
- Les éclaboussures de produit dans les yeux peuvent provoquer une irritation et causer des dommages réversibles.
- Enfin, ces pigments et leurs produits de dégradation peuvent avoir des effets toxiques, cancérigènes et mutagènes sur les organismes [33, 34].

I.8.2. Travaux antérieurs

Dans ce tableau on cite quelque travaux réalisés (articles et des thèses) sur le colorant MO:

Table I. 4: Travaux réalisés sur Méthyl Orange.

Résultats	Titres des articles et thèses :	Les valeurs
Adsorbant : bentonite et charbon Etude cinétique	Comparative study of the Adsorption of Methyl Orange by Bentonite and Activated carbon [35].	$q_e = 22{,}5\ 5\ (mg/g)$
Adsorbant : bentonite modifié chimiquement Etude cinétique et thermodynamique	Synthesis Of Copper-based Catalyst Supported On Bentonite For The Removal Of Water Polluants [36].	$q_e = 36\ (mg/g)$

Adsorbant : charbon actif préparé par des sous-produits agricoles Etude cinétique	Preparation Of Activated Carbon Based On Synthetic And Agricultural Wastes: Application To The Adsorption Of Methyl Orange [37].	$q_e = 49\ (mg/g)$
Revue bibliographique sur les travaux récents	Adsorption of methyl orange: A review on adsorbent performance [38].	$q_e = 48{,}4\ (mg/g)$

I.9. Traitement des eaux

Le but du traitement de l'eau est de produire de l'eau potable ou propre à usage humain. Il existe aujourd'hui différentes manières de traiter les eaux polluées qui peuvent être regroupées en traitements physiques, biologiques ou chimiques.

- **Traitements Chimique**

Les procédés de traitement chimique les plus courants (oxydation, échange d'ion sur résine, procédés de neutralisation ou d'acidification) [39].

- **Traitements Biologiques**

La bio remédiation naturelle a lieu lorsqu'une gamme de micro-organismes appropriés, y compris des bactéries, des champignons, des algues et des levures, sont présents dans l'environnement pollué ou les eaux usées. Ce processus pourrait également être induit à l'échelle du laboratoire en isolant et en criblant les micro-organismes appropriés, suivi d'une mise à l'échelle pour permettre le traitement et la décoloration des effluents textiles [40].

- **Traitements Physiques**

Les traitements physiques sont appliqués pour une séparation mécanique simple entre le solide et le liquide sans l'utilisation de réactifs chimiques. Ce traitement comprend des procédés traditionnels tels que (tamisage, filtration, **Adsorption**…..) [41].

I.10.Le traitement des eaux adopté par ADE de Médéa

L'Algérienne des eaux produit et distribue 5.5 millions de mètres cube d'eau potable par jour, pour alimenter plus de 28.5 millions d'habitants, à travers le territoire national. L'eau produite et distribuée par l'ADE, provient de trois différentes sources, à savoir : les eaux souterraines, les eaux de surface, et les eaux dessalées. Ainsi, l'ADE se préoccupe de la santé et du confort du citoyen algérien en tout endroits.

Le traitement des eaux fait référence à l'ensemble des procédés et des technologies utilisés pour purifier, décontaminer et rendre l'eau propre et sûre à la consommation ou à d'autres utilisations. Cela inclut le traitement des eaux usées, le traitement de l'eau potable, ainsi que le traitement des eaux industrielles.

Le traitement de l'eau potable est conçu pour éliminer les contaminants et les impuretés présents dans l'eau afin de la rendre propre à la consommation humaine. Cela implique généralement des processus de coagulation, de floculation, de décantation, de filtration et de désinfection. Le but est d'éliminer les substances indésirables telles que les bactéries, les virus, les produits chimiques, les métaux lourds, les sédiments et les goûts et odeurs désagréables, afin de garantir la sécurité et la qualité de l'eau potable.

Dans notre travail, nous visons à appliquer l'adsorbant naturel bentonite sur une eau semi traitée. Cette dernière a été traitée par coagulation et floculation en utilisant le sulfate d'alumine. Lorsqu'il est ajouté à l'eau, il forme des flocs qui permettent d'agglomérer les particules en suspension, les impuretés et les matières organiques. Ces flocs peuvent ensuite être séparés de l'eau par filtration ou décantation.

En pratique, L'ADE utilise du charbon actif commercial dans le procédé d'adsorption appliqué sur l'eau semi traitée, qui nécessite un traitement rigoureux afin de la rendre une eau potable répondant aux normes exigées.

Le charbon actif est couramment utilisé pour améliorer la qualité de l'eau en raison de sa capacité à adsorber les contaminants et les impuretés présentes dans l'eau. à savoir ;

-Élimination des produits chimiques : Le charbon actif est efficace pour éliminer de nombreux produits chimiques présents dans l'eau, tels que les composés organiques volatils, les pesticides, les herbicides, les solvants et les produits pharmaceutiques.

-Réduction des goûts et des odeurs : Certains composés présents dans l'eau peuvent donner des goûts et des odeurs désagréables, tels que le chlore, les composés sulfurés et les algues.
-Élimination des métaux lourds : Le charbon actif est efficace pour réduire la concentration de métaux lourds tels que le plomb, le mercure, le cuivre et le cadmium présents dans l'eau.

-Élimination des microorganismes : Bien que le charbon actif ne soit pas spécifiquement conçu pour éliminer les microorganismes, il peut adsorber certains types de bactéries et de parasites présents dans l'eau. Cependant, il est important de noter que l'utilisation du charbon actif seul ne garantit pas l'élimination complète des microorganismes pathogènes, il est donc essentiel de combiner son utilisation avec d'autres méthodes de traitement de l'eau, telles que la désinfection.

I.11. Conclusion

Ce chapitre nous a aidés à comprendre comment les colorants affectent la santé humaine et l'environnement, nécessitant la planification de procédures appropriées pour éliminer la pollution causée par ces composants. Ce sera le sujet du chapitre suivant.

Chapitre II :

Adsorption

II.1. Introduction

Plusieurs techniques physiques, chimiques et biologiques ont été utilisées pour éliminer les polluants des eaux usées, telles que la dégradation photochimique, la biodégradation, la coagulation, l'oxydation chimique et la désorption [42]. Parmi ces méthodes, l'adsorption est une option prometteuse pour l'élimination, surtout des colorants et cette technique ne produit pas de produits secondaires nocifs, généré par le polluant [43]. Le charbon actif est souvent utilisé, mais il est très coûteux dans la plupart des cas. Par conséquent, ces derniers temps, il y a eu un intérêt croissant pour trouver des adsorbants naturels bon marché et facilement disponibles tels que la pulpe de canne, le bois, les cendres volantes, les déchets de riz et les argiles [44].

Plusieurs études ont été menées sur la possibilité d'utiliser la bentonite, qui, en raison de ses propriétés physiques et chimiques, est très appréciée pour ses propriétés adsorbantes. Ce matériau naturel est une argile abondante en Algérie et peu coûteuse, constituée principalement de montmorillonite (Mt) [45].

II.2 Définition

L'adsorption est un phénomène d'interface qui peut se produire entre un solide et un liquide ou un solide et un gaz, et est principalement utilisée pour traiter l'eau et l'air. Le processus implique que les molécules d'un fluide, appelé adsorbat, adhèrent à la surface d'un solide, appelé adsorbant. Ce processus décrit la capacité de certains matériaux à fixer de manière plus ou moins irréversible des molécules (telles que des gaz, des ions métalliques, des molécules organiques, etc.) à leur surface. Par conséquent, tout au long de ce processus, il y aura un transfert de matière de la phase liquide ou gazeuse vers la surface solide.

Il existe deux formes d'adsorption différentes que l'on peut distinguer en fonction de la nature des liaisons formées et de la quantité d'énergie libérée lors de la rétention d'une molécule à la surface d'un solide : l'adsorption physique et l'adsorption chimique [46].

II.3. Types d'adsorption

II.3.1.Adsorption physique (physisorption)

Dans le phénomène de physisorption, les forces de Van Der Waals (couplage électron-statique) sont principalement responsables du maintien des molécules d'adsorbat à la surface de l'adsorbant. Il se produit sans modifier la structure de la molécule et est

complètement réversible (c'est-à–dire que les molécules adsorbées peuvent être facilement désorbées en diminuant la pression ou en augmentant la température). L'adsorption physique se produit rapidement et implique des interactions intermoléculaires relativement faibles agissant entre les particules adjacentes. Contrairement à la chimisorption, la physisorption est un phénomène non spécifique qui se traduit par la création de plusieurs couches ; la première couche est due aux interactions adsorbat/adsorbant alors que les suivantes concernent les interactions adsorbat/adsorbat [47].

II.3.2.Adsorption chimique (chimisorption)

Elle équivaut à des liens électroniques entre molécules à l'interface des deux phases créant de véritables liaisons chimiques. Ces liaisons sont de type covalent, mais elles peuvent être légèrement polarisées.

Les énergies mises en jeu sont plus grandes que dans le cas de physio sorption. Ce type d'adsorption spécifique n'apparaît le plus souvent qu'à des températures assez élevées et met en jeu une énergie de transformation élevée [48]. La différence entre l'adsorption physique et chimique est résumée dans le Tableau (II.1) [47].

Table II. 1: Différences principales entre les deux types d'adsorption.

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Type de liaison	Liaison de Van Der Waals	Liaison chimique
Chaleur d'adsorption	≤ 84 KJ/mole	> 84 KJ/mole
Individualité des Molécules	L'individualité des molécules est conservée	Destruction de l'individualité des molécules
Désorption	Facile	Difficile

II.4. Mécanisme d'adsorption

L'adsorption se produit principalement en quatre étapes, intervenant chacune dans l'expression de la vitesse totale. Mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain représente sur la figure (II.1). [49]

1- diffusion extragranulaire de la matière (transfert du soluté vers la surface des grains).

2- transfert intragranulaire de la matière (transfert de la matière dans la structure poreuse de la surface extérieure des graines vers les sites actifs).

3- réaction d'adsorption au contact des sites actifs, une fois adsorbée, la molécule est considérée comme immobile

4- Adsorption proprement dite.

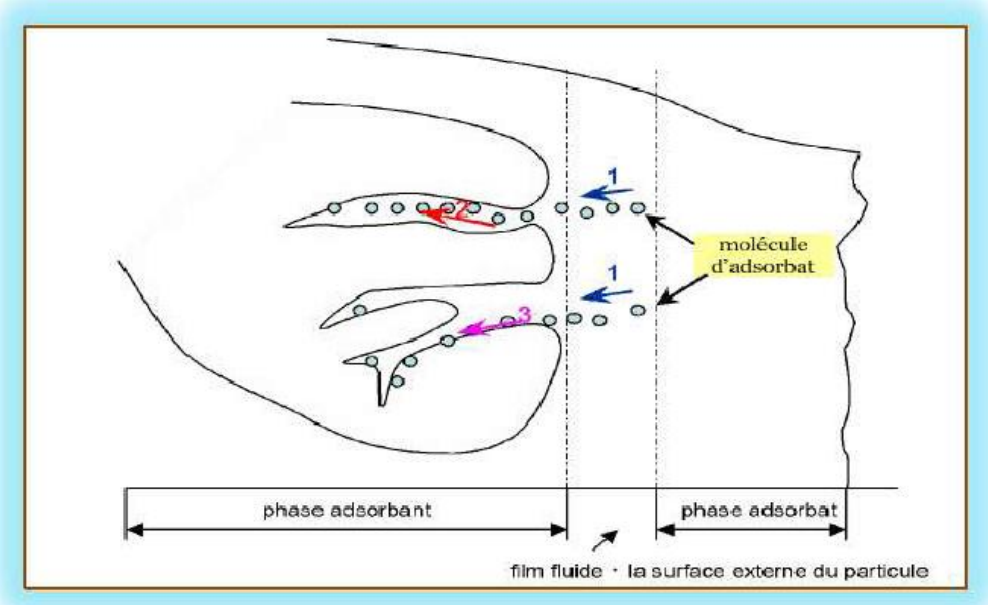


Figure II. 1: Mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain.

II.5. Les facteurs influençant l'adsorption

Quand un solide est mis en contact avec une solution, chaque constituant de cette dernière, le solvant et le soluté, manifeste une tendance à l'adsorption à la surface du solide. Il y a donc une compétition en surface entre deux adsorptions qui sont concurrentielles. Le cas le plus intéressant est celui où l'adsorption du soluté est de loin plus importante que celle de solvant. Donc la quantité adsorbée, dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont [50]:

II.5.1. Nature de l'adsorbant

L'adsorption d'une substance donnée croît avec la diminution de la taille des particules de l'adsorbant, ce qui permet aux composés de la solution de pénétrer dans les capillaires de la substance, donc la subdivision de la particule du solide influe directement sur les pores de ce dernier ainsi que sur sa surface spécifique qui va être développée. Cependant, si les dimensions des pores sont inférieures, aux diamètres des molécules de l'un de composant de la solution, l'adsorption de ce composé ne se fait pas, même si la surface de l'adsorbant a une grande affinité pour ce composé [51].

II.5.2. Nature de l'adsorbat

Lorsque la solubilité est élevée cela veut dire qu'il y a une forte liaison entre le soluté et le solvant [52]. « Moins une substance est soluble, mieux elle est adsorbée » [53]. Donc, pour qu'une molécule soit adsorbée, il faut d'abord rompre le lien avec le solvant [54].

II.5.3. pH

La charge superficielle de l'adsorbant ainsi que la structure de l'adsorbat peuvent être conditionnées par le pH [55]. Dans la plupart des cas, les meilleurs résultats sont acquis aux pH les plus faibles, particulièrement pour l'adsorption de substances acides [56].

II.5.4. La température

L'adsorption physique s'effectue à de basses températures (phénomène exothermique), alors que l'adsorption chimique demande des températures plus élevées (phénomène endothermique). Ce qui nécessite de fixer la température de processus dès le départ [57].

II.5.5. La concentration

L'équilibre d'adsorption qui s'établit entre la concentration dans la phase solide et la phase liquide dépend de la concentration initiale des substances adsorbables. De façon générale, l'adsorption augmente dans le même sens que la concentration initiale [51].

II.6. Cinétique d'adsorption

La cinétique d'adsorption est définie par l'évolution de la quantité adsorbée en fonction du temps de contact adsorbant/adsorbat. La vitesse d'adsorption d'un soluté à partir d'une solution dépend de nombreux facteurs, notamment la nature de l'adsorbant, l'adsorbat, ainsi que de la vitesse d'agitation du milieu [58]. Elles ont montré que

l'adsorption des adsorbats est relativement rapide sur un solide non poreux. L'équilibre est atteint en quelques minutes. Cependant, l'adsorption sur un solide poreux est beaucoup plus lente [59].

II.6.1. Modèle cinétique de pseudo-premier ordre

Un modèle de pseudo-premier ordre ou un modèle de Lagergren pour l'adsorption en phase liquide a été établi. Il est applicable à une variété de systèmes liquide-solide, en supposant que dans ce modèle, le taux d'adsorption au temps t est proportionnel à la différence entre la quantité d'adsorption q_e à l'équilibre et la quantité d'adsorption qt à ce moment. Il ne s'applique qu'aux premières minutes du phénomène d'adsorption, indiquant que l'adsorption est réversible [60].

-L'équation différentielle s'exprime comme suit [61]:

$$dq_t/d_t = k_1(q_e - q_t) \quad \text{..... (II.1)}$$

Avec :

$\boldsymbol{q_e}$: Quantité d'adsorbat à l'équilibre par gramme d'adsorbant (m/g)

$\boldsymbol{q_t}$: La capacité d'adsorption au temps t (mg/g)

t : Le temps de contact (min)

$\boldsymbol{K_1}$: Constante de vitesse d'adsorption pour le premier ordre (min^{-1})

-En intégrant et en appliquant les conditions initiales (à t=0, q_t=0 et à t=t_e, q_t=q_e), l'équation prend la forme :

$$\text{Log } (q_e - q_t) = \log q_e - (k/2.303).t \quad \text{.....(II.2)}$$

II.6.2. Modèle cinétique de pseudo-second ordre

Les données d'adsorption ont aussi été analysées selon le modèle cinétique du pseudo-second-ordre exprimé comme suit [61]:

$$dq_t/\text{dt} = k_2.(q_e - q_t)^2 \quad \text{.....(II.3)}$$

$\boldsymbol{k_2}$: Constante de vitesse du pesudo-second- ordre (g/mg/min)

-L'intégration de l'équation donne :

$$t / q_t = 1 / (k_2\, q_e^2) + (1/q_e).t \quad \text{.....(II.4)}$$

On peut déterminer les valeurs de k_2, q_e , en traçant la courbe de t/q en fonction de t.

II.7. Isothermes d'adsorption

L'adsorption est un processus non stationnaire qui se termine lorsque l'adsorbat et l'absorbant sont en équilibre thermodynamique. Les données relatives à l'adsorption par une isotherme d'adsorption sont présentées de préférence car il est plus facile (d'un point de vue expérimental) de se mettre en place en isothermes qu'en isobares. (Ou isotherme de Gibbs). Cette isotherme s'exprime pour chaque température par une relation déterminée empiriquement entre le nombre de molécules adsorbées et la pression du gaz ou la concentration de la solution.

Tous les systèmes adsorbant/adsorbat ne se comportant pas de la même manière, Les phénomènes d'adsorption qui leur sont relatifs seront souvent abordés par leur comportement isotherme [62].

II.7.1. Classification des isothermes d'adsorption

Gilles et al. (1974) ont proposé un modèle d'adsorption de liquides sur des surfaces solides, dont quatre types particuliers sont maintenant considérées comme les quatre formes principales d'isothermes généralement observées. Ces catégories sont présentées dans la (Figure II.2.) Le type d'isothermes obtenu a permis de tirer des conclusions qualitatives sur l'interaction entre adsorbat et adsorbant, dont les plus importantes sont les suivantes [63]:

- la forme de l'isotherme ;
- l'existence de paliers sur les isothermes ;
- le type d'adsorption (mono ou poly-moléculaire) ;
- l'orientation des molécules adsorbées.

➢ Classe 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.

- **Classe 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.

- **Classe 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 formées à partir des molécules de soluté.

- **Classe 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 [64] [65].

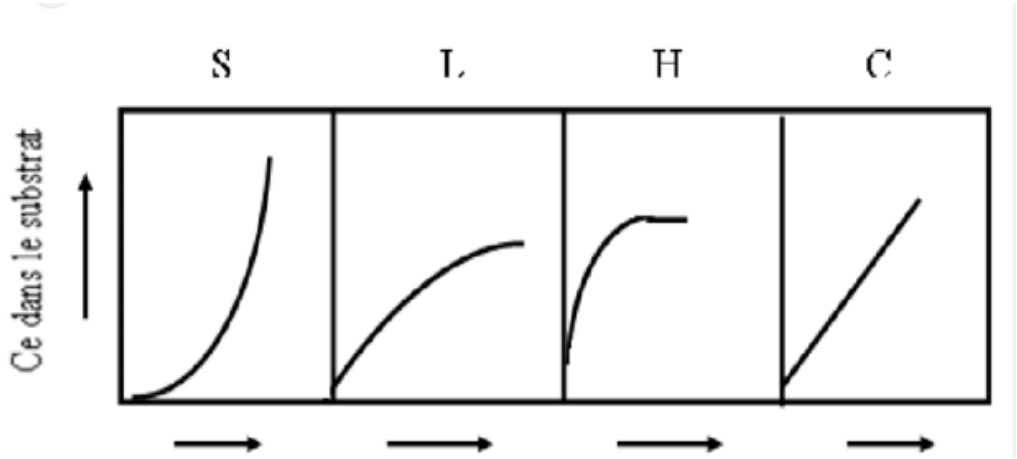


Figure II. 2: Classe des isothermes d'après Gilles et al.

II.7.2. Modélisation des isothermes d'adsorption

Différents modèles mathématiques ont été créés pour représenter l'équilibre de l'adsorption. Le modèle le plus couramment utilisé est:

a. Modèle de Freundlich

Le modèle de Freundlich est utilisé pour représenter le phénomène d'adsorption non linéaire (Freundlich, 1906). C'est l'une des isothermes les plus utilisées en matière d'adsorption. Les formes linéaires et non linéaires du modèle de Freundlich sont données par les équations suivantes [66] :

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad \text{..... (II.5)}$$

La linéarisation du modèle de Freundlich donne l'équation suivante :

$$\ln q_e = \ln \mathcal{K}_f + \frac{1}{n} ln C_e \quad \text{.....(II.6)}$$

Avec

$\boldsymbol{q_e}$**:** Quantité adsorbée à l'équilibre ;

$\boldsymbol{C_e}$**:** Concentration de l'adsorbât à l'équilibre d'adsorption ;

$\boldsymbol{K_f}$**:** Constantes tenant compte la capacité d'adsorption ;

1/n: Constantes tenant compte la capacité d'adsorption.

b. Modèle de Langmuir

Selon Langmuir (1915), l'équilibre, est décrit par l'équation suivante [67] :

$$\frac{1}{\mathrm{qe}} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{b q_m} \frac{1}{C_e} \quad \text{..... (II.7)}$$

q_e : est la quantité adsorbée du soluté à l'équilibre (mg/g ou mmol/g) ;

C_e : est la concentration du soluté à l'équilibre (mg/L ou mmol/L) ;

b : Constante d'équilibre caractéristique d'adsorbant, dépendant des conditions Expérimentales.

Ce modèle ne prend en compte ni les empilements moléculaires ni les modifications d'énergies d'interaction avec le taux de recouvrement. La linéarisation et la représentation graphique de l'équation (I) en $1/q_e$ en fonction de$1/C_e$ permettent de déterminer q_m et b.

II.8. Bentonite

II.8.1. Définition

La bentonite est une roche argileuse, friable, tendre et onctueuse au toucher, sa teinte dépend des composés minéraux et impuretés (matière organique et oxydes des métaux) qui lui sont étroitement associés. Elle est blanche, grise ou légèrement jaune (Figure II.3). Il se caractérise par la capacité d'une adsorption élevée, d'un échange d'ions et d'un gonflement [68].

Les bentonites sont des silicates d'alumine hydratés appartenant au groupe des Montmorillonites de formule brute [70]:

-Si_4 ($Al_{(2-x)}$ R_x) (O_{10}, H_2O) (Ce_x, nH_2O) ou Si_4 ($Al_{(2-x)}$ R_x) $(H_2O)_n$

Avec :

- R = Mg, Fe, Mn, Zn, Ni

- Ce (cations échangeables) = Ca, Na, Mg.



Figure II. 3: La bentonite.

II.8.2. Origine de la Bentonite

Les bentonites sont des argiles d'origine volcanique, constituées principalement de montmorillonite; l'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs

volcaniques riches en verre entraînent la formation des minéraux argileux, qui font partie principalement du groupe des smectites. Les roches argileuses ainsi formées, portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming, Etats- Unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de la Vienne (France) [6].

En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'Oranie (ouest Algérien). On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et de celle de Mostaghanem (M'zila) avec des réserves de deux millions de tonnes [69].

II.8.3. Structure de la bentonite

La montmorillonite (Figure II-4) est le constituant principal de la bentonite. C'est un phyllosilicates 2 :1 (famille de smectites) dans lequel la charge négative de la couche est électriquement équilibrée par une charge égale, des cations échangeables (Ca , Mg , H^+, K^+, NH et Na^+) situés principalement entre ces couches silicates ; ces cations ne font pas partie de la structure et garde une certaine mobilité [70].

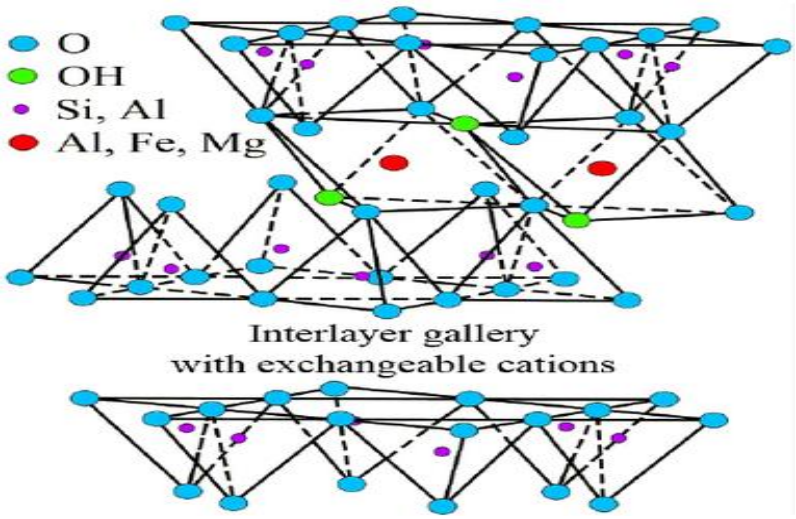


Figure II. 4: Structure de la montmorillonite.

II.8.4. Domaines d'application de la bentonite

Traditionnellement utilisées comme matière première par les potiers, les bentonites ont de nombreux débouchés dans l'industrie grâce à leurs caractéristiques chimiques (adsorption et absorption des molécules, composition) et physiques (taille des particules). Dans l'industrie chimique, elles amorcent certaines réactions : Alkylation de phénols, dimérisation et oligomérisation d'alcènes, synthèse d'aldéhydes, Formation d'esters [71].

Nous mentionnons certaines de ces applications :

- Les Montmorillonites Mt, quant à elles, ont des capacités d'adsorption très poussées et sont de ce fait employées pour purifier les eaux souillées, dégraisser les laines par piégeage des impuretés ;
- Exploitée comme charge minérale, l'argile joue un rôle important dans la papeterie et l'industrie du caoutchouc ;
- Elle est utilisée dans les puits de forage de pétrole et la recherche géothermique ;
- Comme adjuvant pour nourriture animale ;
- Pour le génie civil : voiles d'étanchéité, injections de ciment ;
- Comme additif aux amendements des sols.

II.9.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le concept général d'adsorption, qui peut être divisé en deux catégories : l'adsorption physique et l'adsorption chimique. Nous avons également discuté des facteurs influençant le phénomène d'adsorption, et comme matrice d'adsorption, nous avons choisi l'argile comme matériau que nous utiliserons pour traiter les eaux polluées par un colorant, afin de remplacer le charbon actif

Chapitre III: Partie Expérimentale

III.1. Introduction

Ce chapitre expose les matériels et les réactifs utilisés, ainsi que la procédure expérimentale adoptée au-cours de l'étude de la dépollution par adsorption d'une eau contaminée par le méthyl orange.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la capacité d'adsorption de la bentonite, et de modéliser la cinétique de sorption. Pour se faire, le travail expérimental était organisé en trois étapes, à savoir :

- Optimisation : étude de l'influence de quelques paramètres sur la capacité d'adsorption

- Cinétique : étude de la cinétique d'adsorption

- thermodynamique : détermination des paramètres thermodynamiques de l'adsorption

L'étude expérimentale de ce travail a été réalisée dans le laboratoire pédagogique de l'Université Yahia Farés de Médéa, et dans le laboratoire de l'Algérienne Des Eaux (ADE) de Médéa.

III.2. Matériel et méthode

III.2.1.Réactifs et produits utilisés

- Colorant utilisé : méthyl orange de pureté 99% et M=327,74 g/mol de type Reidel-de Haën.
- La bentonite utilisée est extraite de l'ouest de l'Algérie. Elle est caractérisée par : un diamètre moyen inférieure à 1mm, une masse volumique apparente (0,952g/cm^3), pH= 8 et une conductivité électrique 495µs.

III.2.2. Petit matériel

- Papier filtre (d= 0,45 µm)
- barreau magnétique
- thermomètre
- Chronomètre.

III.2.3. Verrerie de laboratoire

- Fioles jaugées (25, 250, 500, 1000 ml)
- Entonnoirs

- Béchers (50, 1000 ml)
- Cristallisoirs
- Tubes à essais
- Cuves en verre pour le spectrophotomètre.
- Pipettes (15, 20, 25 ml)
- Eprouvettes (50, 100, 500 ml)

III.2.4. Appareillage

Le Tableau III.1 rassemble tous les matériels utilisés pendant notre travail expérimental.

Tableau III.1 : Matériels utilisés.

Matériel	Image
Agitateur à plaque chauffante	
Centrifugeuse	
Etuve	
Balance analytique	

pH mètre	
Pompe sous vide	
Spectrophotomètre UV-VISIBLE (UV-mini 1240 SHIMADZU)	
FTIR Spectrophotomètre infrarouge (SHIMADZU)	
Jar test	
Agitateur secoueur	

III.3. La spectroscopie infrarouge (IR)

La spectrométrie infrarouge IR est une méthode de caractérisation rapide et sensible de la plupart des molécules existantes. Son utilisation est simple et le coût de son instrumentation en fait un outil accessible à la plupart des laboratoires (Figure III.1). Lorsqu'une molécule absorbe de l'énergie sous la forme d'un rayonnement IR, l'amplitude

des vibrations des liaisons moléculaires augmente, le retour à l'état normal libère de la chaleur.



Figure III.1: Le spectrophotomètre infrarouge (IR)**.**

Les vibrations peuvent être classées en deux catégories : les vibrations d'élongation (symétrique et asymétrique) et les vibrations de déformations angulaires où l'on distingue quatre types : le cisaillement, la rotation, le balancement et la torsion.

III.4. La spectroscopie UV- visible

Le spectrophotomètre est un instrument utilisé pour la mesure quantitative qui consiste à mesuré l'absorbance ou la densité optique d'une substance chimique donnée en solution à partir de la lumière absorbée par la substance chimique en faisant passer un faisceau lumineux à travers l'échantillon. Ces transitions électroniques se font dans le domaine de 400 à 800 nm pour le visible et entre 200 à 400 nm pour l'ultraviolet.

Un spectrophotomètre est conçu autour de trois modules : ceux de la source et du système dispersif (souvent conçu comme un monochromateur), qui constituent la partie optique et celui qui est responsable de la détection. L'ensemble est réuni dans un bâti unique. Un compartiment échantillon est inséré sur le trajet optique après ou avant le système dispersif.

La figure III.2 représente le Spectrophotomètre UV-VISIBLE UVmini 1240, utilisé dans le Labo pédagogique.



Figure III.2: Spectrophotomètre UV-VISIBLE.

III.4.1.Loi de Beer-Lambert

Les mesures de l'UV-VISIBLE reposent sur la loi de Beer-Lambert qui relie dans certaines conditions, l'adsorption de la lumière à la concentration d'un composé en solution aux propriétés des milieux qu'elle traverse [72].

L'absorbance A d'une solution dépend de plusieurs paramètres

- ✓ De la longueur d'onde λ,
- ✓ De l'épaisseur ℓ de la solution traversée (trajet optique),
- ✓ De la nature de l'espèce chimique,
- ✓ De la concentration C de l'espèce dissoute,
- ✓ Du solvant.

Dans le cas de faibles concentrations, à une longueur d'onde λ fixée, l'absorbance A d'une solution est proportionnelle à l'épaisseur ℓ et à la concentration C, comme l'indique l'équation suivante.

$$A = \text{Log } I_0/I \qquad \text{(III.1)}$$

On peut écrire :

$$A = \varepsilon . \ell . C \qquad \text{(III.2)}$$

Avec :

A: Absorbance (sans unité)

I : Intensité du faisceau émergent

I_0: Intensité du faisceau incident

ℓ : l'épaisseur de la solution traversé ou trajet optique (cm).

C : Concentration molaire de l'espèce chimique colorée (mol.l^{-1})

ε : Coefficient d'extinction molaire (ou d'adsorption moléculaire) dans les conditions de l'expérience ($cm^{-1}.l.mol^{-1}$).

La Figure III.3 montre les composantes du spectrophotomètre. Le trajet lumineux à travers une cuve est présenté sur le même schéma pour une ou plusieurs sources de lumière émanant d'une source polychromatique.

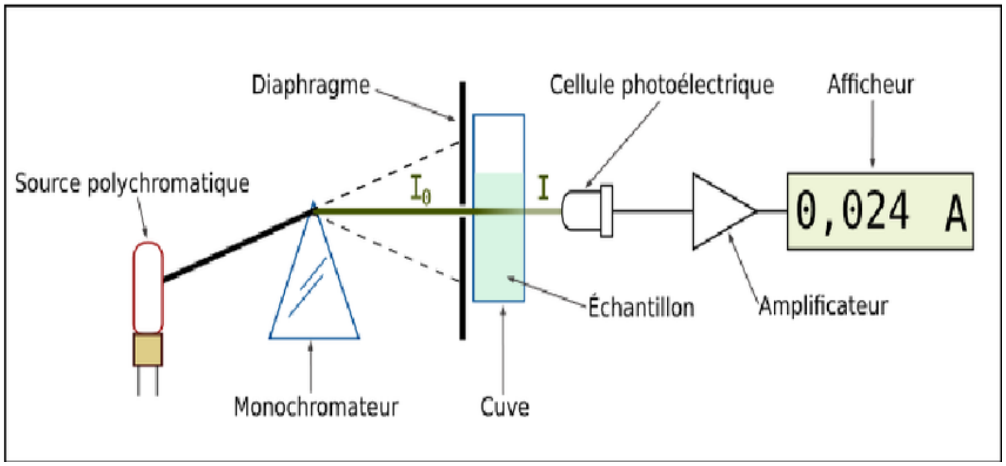


Figure III.3: Schéma du trajet lumineux à travers une cuve d'un spectrophotomètre.

Les composantes du spectrophotomètre sont ;

- sources de lumière mono ou polychromatique.
- Le monochromateur peut produire de la lumière visible à partir d'une seule source. Il est constitué d'un réseau qui disperse la lumière blanche.
- Une cuve contenant la solution étudiée ; La longueur de la cuvette est précisée (1 cm de chemin optique en général). La principale propriété de la cuve est la transparence aux études de rayonnement de quartz ou de plastique.
- Une cellule photoélectrique qui produit un courant électrique proportionnel au nombre de photons qu'elle reçoit.
- Un détecteur ou récepteur physique pour mesurer le débit incident. C'est un appareil de mesure ou d'enregistrement qui, directement ou indirectement par l'utilisation d'un amplificateur, reçoit le courant du récepteur.

III.5. Procédé expérimental

III.5.1. Caractérisation par spectroscopie infrarouge

L'analyse des spectres obtenus par infrarouge avec transformé de fourrier (FTIR) nous a permet d'identifier et de confirmer la présence des groupes caractéristiques de la bentonite. Et s'il y a une modification chimique, une simple comparaison avec les spectres avant et après l'adsorption de la bentonite sur la base des données théoriques peut être faite sur les modes vibrationnels de certains groupements chimiques.

Les spectres infrarouges obtenus avant et après adsorption sont représentés sur les figures (III.4; III.5).

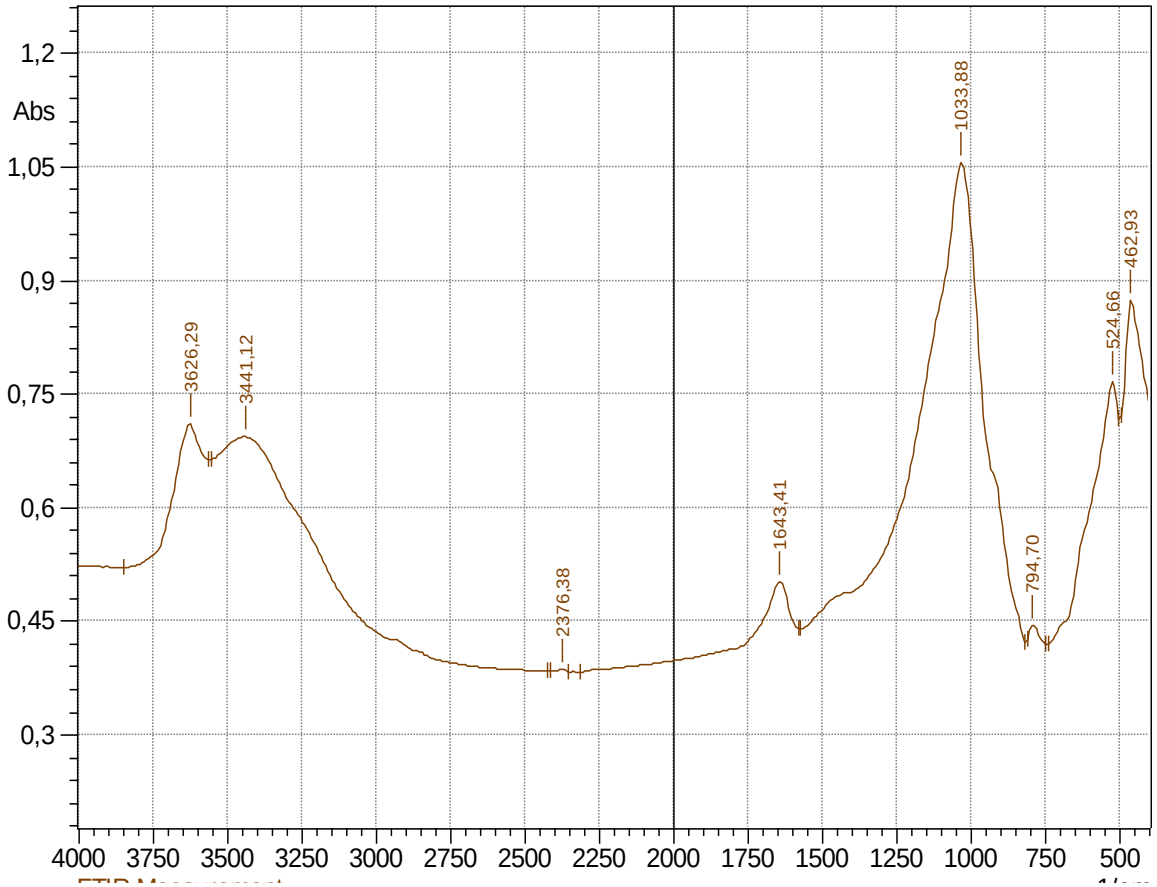
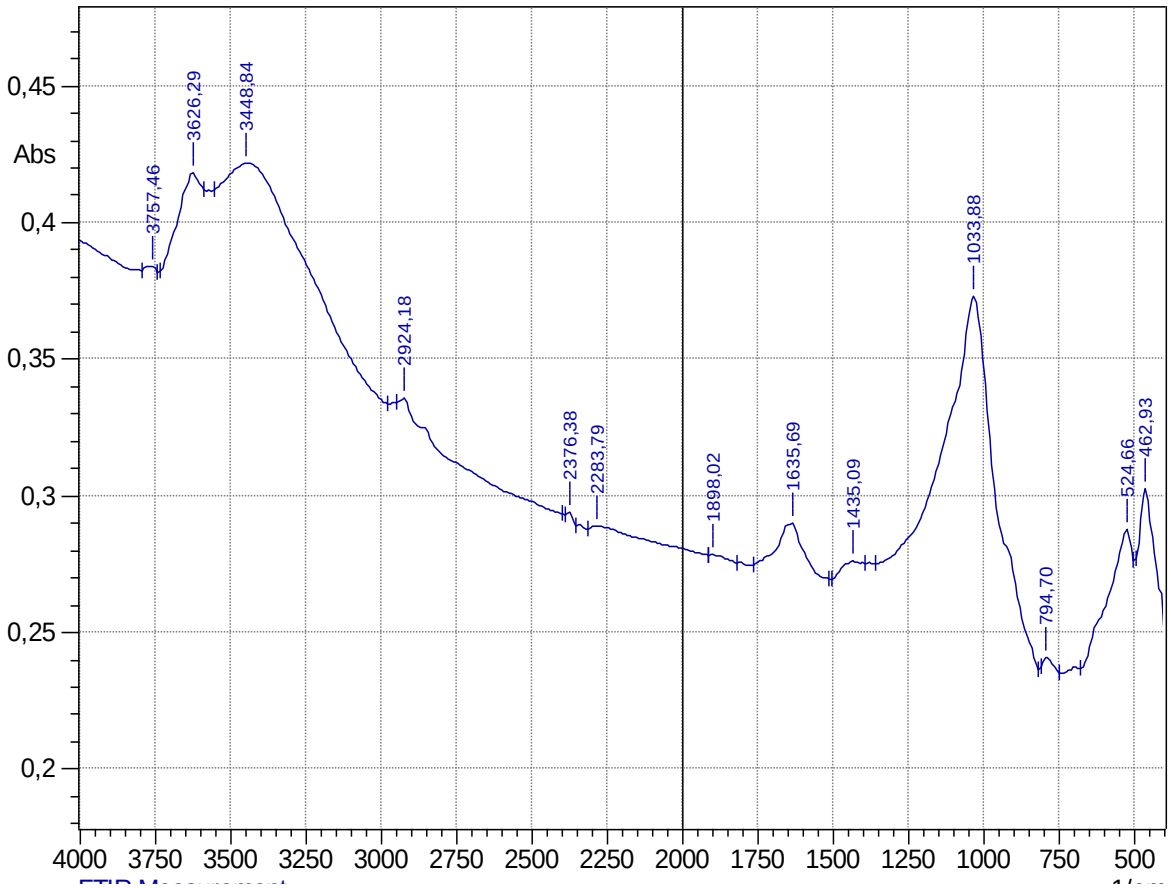


Figure III.4: Spectre IR de la bentonite avant l'adsorption.



Figue III.5: Spectre IR après l'adsorption.

Les pics caractéristiques obtenus dans les figures (III.4; III.5) ainsi que les liaisons chimiques correspondantes sont résumés dans le tableau (III.2). L'analyse de ces résultats nous permet de comprendre le comportement de notre support avant et après adsorption.

Tableau III.2 : Résultats des spectres IR avant et après l'adsorption.

Longueur d'onde (cm^{-1}) avant adsorption	**Liaison**	**Longueur d'onde (cm^{-1}) après adsorption**	**Liaison**
3626,29	O-H (montmorillonite)	3626,29	O-H
3441,12	O-H (montmorillonite)	3448,84	O-H et N-H
2376,38	O-H	2376,38	O-H
1643,41	O-H	1635,59	O-H
1033,88	Si-O	1033,88	Si-O
794,70	Impureté de quartz	794,70	Impureté de quartz
524,66	Si-O-Al	524,66	Si-O-Al
462.93	Si-O-Mg	462.93	Si-O-Mg
		3757,48	C=C

		2924,18	H-C ; N-C
		2283,79	C=N , C=C
		1435,09	S=O (sulfate)

Selon le Tableau (III.2), nous constatons que les molécules du colorant OM ont été effectivement adsorbées sur la surface de la bentonite. Ceci, est déduit sur la base de l'apparition des pics caractéristiques du MO dans le spectre IR après adsorption.

III.5.2. Détermination de λ max de l'orange méthyl

Pour mesurer λ max, une solution mère de méthyl orange (S1) à une concentration de 100 mg/L a été préparée dans de l'eau distillée, le mélange obtenu a été homogénéisé par agitation (Figure III.6).

- Scanner toute la gamme UV entre 400 et 800 nm
- Détecter le pic maximal, ensuite lisez la valeur de λmax (Figure III.7).

Tableau III.3. La valeur λ max de l'adsorbat.

L'adsorbat	MO
λ max (nm)	465

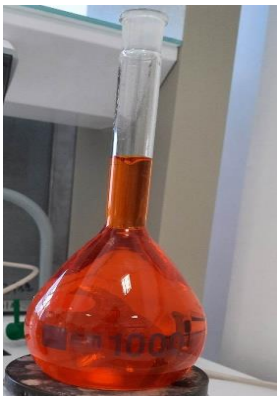


Figure III.6: Solution mère de MO C=100mg/l.

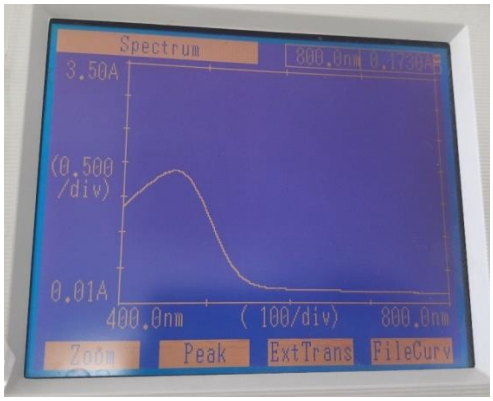


Figure III.7: Pic de solution diluée MO.

III.5.3. Courbe d'étalonnage

Pour établir la courbe d'étalonnage du colorant, des dilutions ont été réalisées à partir de la solution mère dans la gamme de concentration (0 à 100 mg/l). Et pour ce faire la longueur d'onde a été fixée à λ =465 nm, pour toutes les solutions de MO (La Figure III.8).

La figure (III.9) présente la courbe d'étalonnage du polluant étudié, en reliant l'absorbances à la concentration des différentes solutions de MO. En appliquant la relation de dilution $C_1V_1 = C_2 V_2$ sachant que le volume V_2=25 ml et la concentration $C_1 = 0{,}1\ g/l$

C_1 : Concentration de solution mère

C_2 : Concentration de solution fille

V_1 : Volume de solution mère

V_2 : Volume de solution fille.



Figure III.8: Solutions diluées $V_2 = 25ml, C_1 = 0{,}1g/l$.

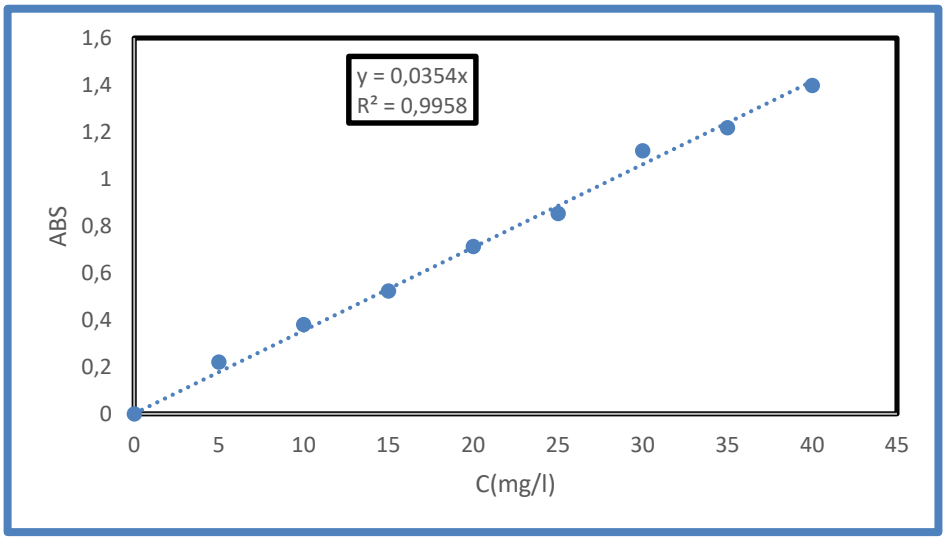


Figure III.9: Courbe d'étalonnage de MO.

La courbe est une droite qui passe par l'original soumis à la loi de Beer-Lambert ; la droite résultante permet d'établir l'équation nécessaire au calcul de la concentration en MO des solutions obtenues après adsorption. Le coefficient de corrélation linéaire est très proche de 1. Les valeurs de l'absorbance sont issues de la moyenne arithmétique de deux essais.

III.6. Optimisation des paramètres de l'adsorption

III.6.1.Calcul de la quantité adsorbée

La quantité du colorant adsorbé (q) est donnée par la relation suivante :

$$q = \frac{(C_0 - C_t).V}{m} \text{ ... .} \quad \text{(III.3)}$$

q **:** Quantité de colorant par gramme d'adsorbant (mg/g)

C_0 **:** Concentration résiduelle à l'équilibre (mg/l)

V : volume de la solution (l)

m : masse de l'adsorbant (g).

III.6.2.Détermination du taux d'élimination

Le taux d'élimination du polluant est définit comme étant le rendement de la réaction d'adsorption. C'est le rapport entre la quantité du colorant adsorbé à un instant t donné et celle qui existée initialement dans la solution aqueuse.

$$E\% = \frac{(C_0 - C_t)100}{C_0} \quad \text{(III.4)}$$

E% : taux d'élimination de colorant (%)

C_0 **:** Concentration initial de colorant (mg/l)

C_t **:** Concentration a l'instante t (mg/l).

III.6.3. Effet du temps de contact

Pour estimer le temps de contact nécessaire pour l'adsorption du MO sur la bentonite, les conditions opératoires fixées sont :

- Concentration initiale du colorant $C_0 = 100\ mg/l$

- Concentration de la bentonite $C_B = 1\ g/l$

-Volume de la solution colorée V= 1000 ml

- Vitesse d'agitation ω = 250 tours/min

- paramètre mesurés initialement de l'Orange méthyl : pH=7,33, T=22,6 C° (ambiante).

Une fois le mélange à étudier est prêt, on déclenche le chronomètre, c'est le temps t=0. On réalise des prélèvements de la solution à des intervalles de temps bien définit. Chaque échantillon est dilué, centrifugé ensuite filtré par un papier filtre, pour pouvoir l'analyser par spectrophotométrie UV-vis. Le choix de ces conditions est basé sur des travaux antérieurs.

Cette procédure nous a permet de suivre la cinétique d'adsorption du MO sur la bentonite présentée sur la Figure III.10.

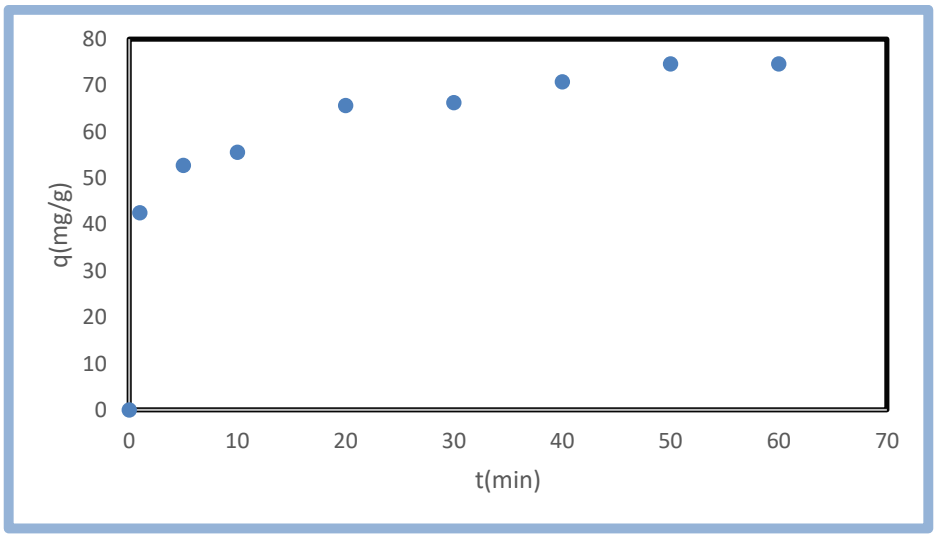


Figure III.10: Cinétique d'adsorption du méthyle orange sur la bentonite, $C_0 = 100\ mg/l$, $C_B = 1\ g/l$, V= 1000 ml, pH=7,33, T=22,6 C°.

La lecture de cette figure, nous a permet de distinguer les trois étapes suivantes

- ✓ La première partie s'étale jusqu'à t= 20min durant cet intervalle, une augmentation très rapide de la quantité adsorbée est constaté.

- ✓ La deuxième partie s'étale de 20 jusqu'à t=40 min. Elle est caractérisée par une adsorption lente. Ceci est attendu étant donné que presque tous les sites d'échange ont été occupés au cours de la première phase.
- ✓ La dernière partie (t > 40min) indique que l'adsorbant a atteint le niveau de saturation. La saturation montre que l'adsorbant solide et le milieu aqueu contenant l'adsorbat sont en équilibre thermodynamique, car cette stabilité ne facilite pas le transfert de matière entre le solide et le liquide.*

En conclusion nous pouvons dire que ces résultats montrent que le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre est proche ou égale à 60 min, et la quantité d'adsorption maximale atteinte en ce temps est 74,71mg/g.

III.6.4. Influence de la concentration de l'adsorbant sur l'adsorption

Pour étudier l'influence de la concentration initiale de la bentonite sur l'adsorption du MO on a fixé la concentration de l'adsorbat C= 100mg/L et on a varié la masse de la bentonite (de 1 à 3g). Les conditions opératoires sont les suivants :

- V =50 ml
- ω=250 tr/min
- Temps de contact=1 heure
- pH = 7,33
- Température =22,6 °C.

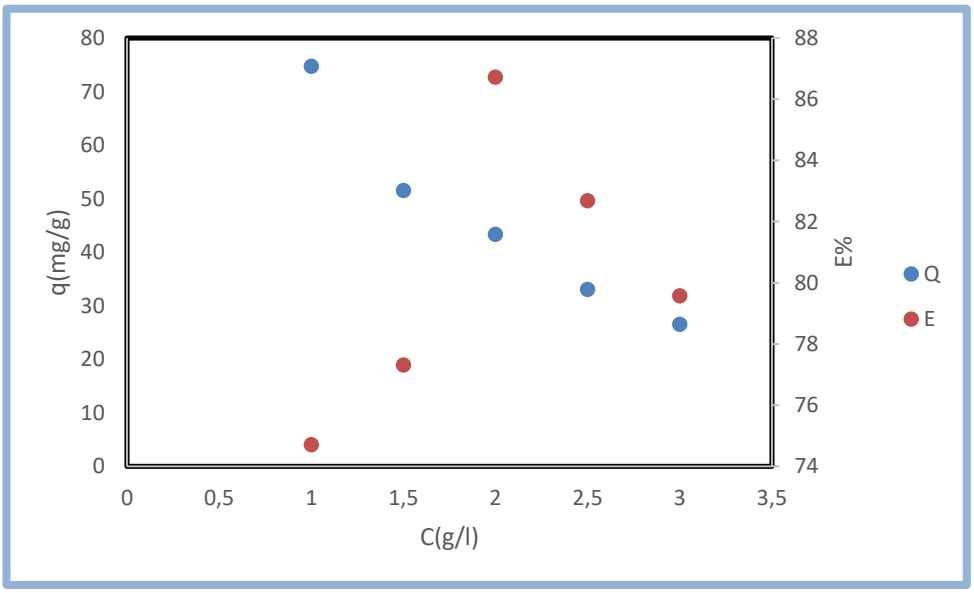


Figure III.11. La quantité adsorbée et le rendement d'adsorption en fonction de la concentration de l'adsorbant.

La figure III.1, illustre l'effet de la concentration de la bentonite sur l'efficacité de l'adsorption du méthyle orange. Nous remarquons, que la quantité de bentonite optimale pour adsorber mieux le colorant est $C_b = 2\ g/l$.

III.6.5. Influence de la concentration initiale de l'adsorbat

Pour étudier l'effet de la concentration initiale en colorant sur l'adsorption de la bentonite, on a réalisé la même procédure que précédente en fixant la concentration d'adsorbant C= 2g/L et t=1h, en variant la masse de la MO (entre 50 et 250 mg/l).

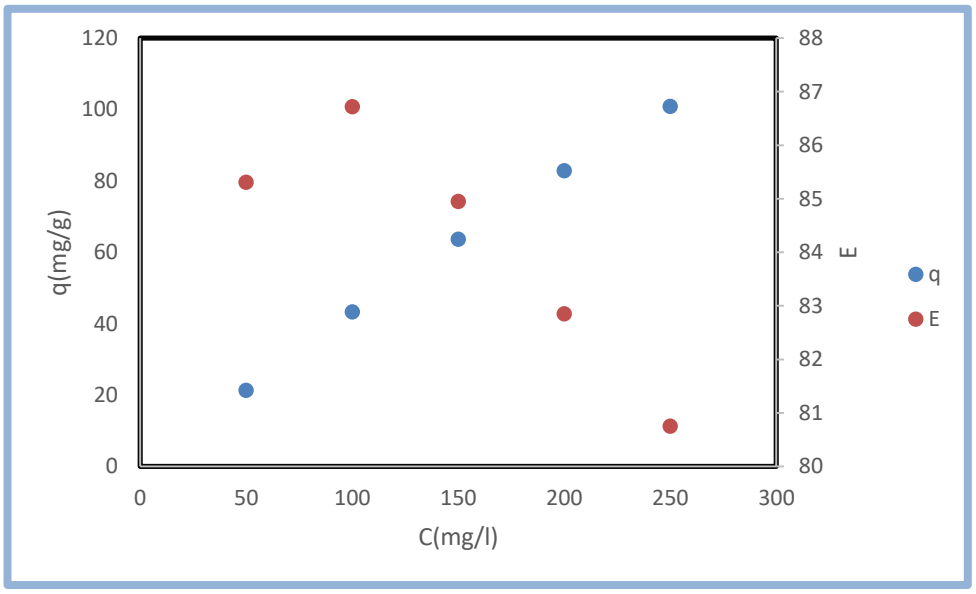


Figure III.12. La quantité adsorbée et le rendement en fonction de la concentration initiale d'adsorbat.

L'analyse de cette courbe démontre qu'une augmentation de la concentration de MO conduit à l'accroissement des quantités adsorbées. Cette croissance est due à la présence d'un fort gradient de concentration en soluté entre la solution et la surface du solide.

La valeur la plus élevée du pourcentage ou rendement E=86,7%, pour lequel la concentration optimale du colorant est $C_0 = 100\ mg/l$.

III.6.6. Effet de la température

La température est un paramètre largement étudié. Les condition de cette essai sont cités ci-après :

$C_0 = 100mg/l$; $t = 1h$;

$C_b = 2g/l$; $V = 50\,ml$;

Le mélange d'adsorption a été placé dans un bain marie thermostaté pour fixer la température désirée constante. Les valeurs des températures étudiées étaient (10, 20, 30, 40, 45). Le choix de ces conditions est basé sur des travaux antérieurs. La Figure (III.13) illustre l'effet de la température sur la quantité adsorbée du MO par la bentonite.

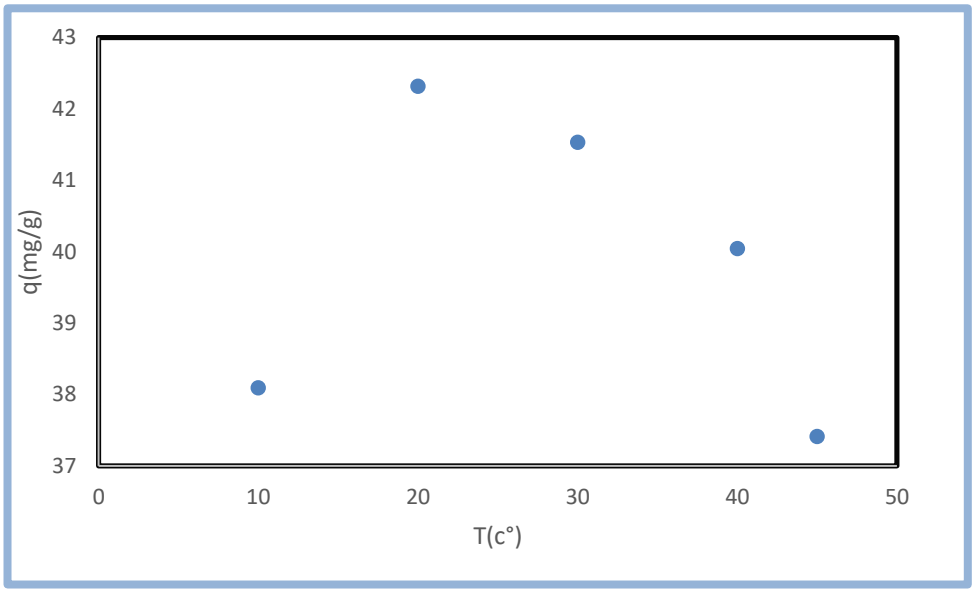


Figure III.13. Effet de la température sur l'adsorption du MO.

En regardant la courbe représentée sur la Figure (III.13), on peut constater que l'augmentation de la température n'est pas toujours bénéfique pour le phénomène d'adsorption. Une diminution de la quantité absorbée a été observée après que la température ait atteint 20 °C. Ceci peut être expliqué par l'effet négatif de l'énergie thermique sur l'adsorption du colorant.

III.7. Etude cinétiques d'adsorption

Nous avons étudié la cinétique pour analyser nos résultats expérimentaux afin d'examiner le mécanisme d'adsorption du système étudié. Plusieurs modèles, dont le modèle cinétique du pseudo-premier ordre et le modèle cinétique du second ordre, sont utilisés pour décrire le phénomène de transport de l'adsorbat dans les pores de l'adsorbant.

Les constantes cinétiques pour l'adsorption de méthyl orange sur la bentonite pour le pseudo-premier ordre et le pseudo-deuxième ordre sont calculées graphiquement.

La cinétique d'adsorption du MO sur la bentonite sous les conditions optimales (C_0=100mg/l ; t=1h+10minute; C_b=2g/l ; V=50 ml, T= 20°C) est présenté sur la Figure III.14.

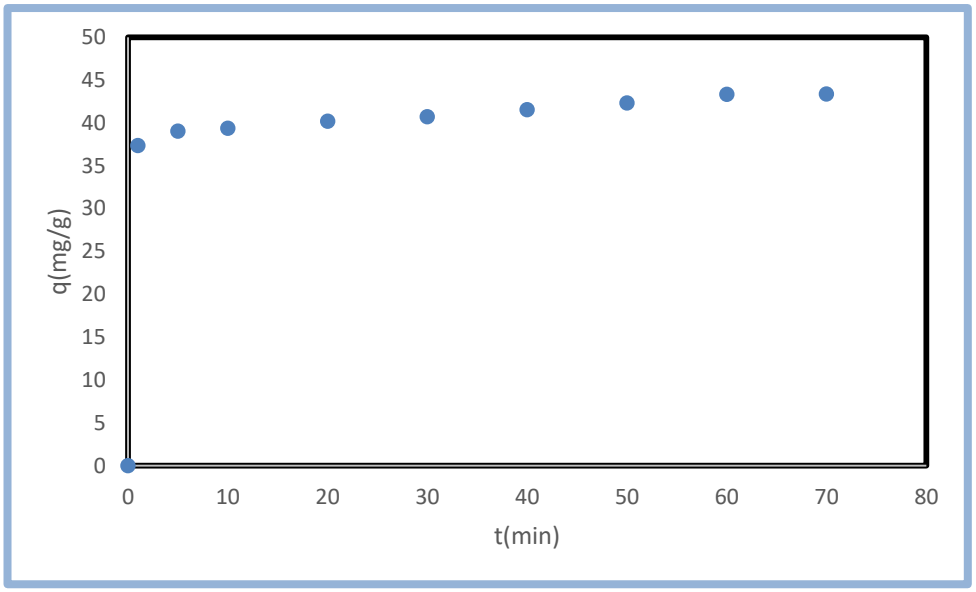


Figure III.14. Cinétique d'adsorption de MO sur la bentonite.

D'une manière générale nous remarquons que le taux d'adsorption du colorant augmente en fonction du temps. La cinétique d'adsorption de la MO sur l'argile présente une allure caractérisée par une forte adsorption de la MO pour les premières minutes de contact, et adsorption lente sur la deuxième partie, suivie un palier d'équilibre au bout de 1h.

D'après la figure représentée ci-dessus on remarque que la quantité maximale adsorbée à l'équilibre est de 43,36mg/g.

pseudo premier ordre

Les résultats obtenus en appliquant le modèle cinétique du pseudo-premier ordre sont représentés sur la Figure III.15.

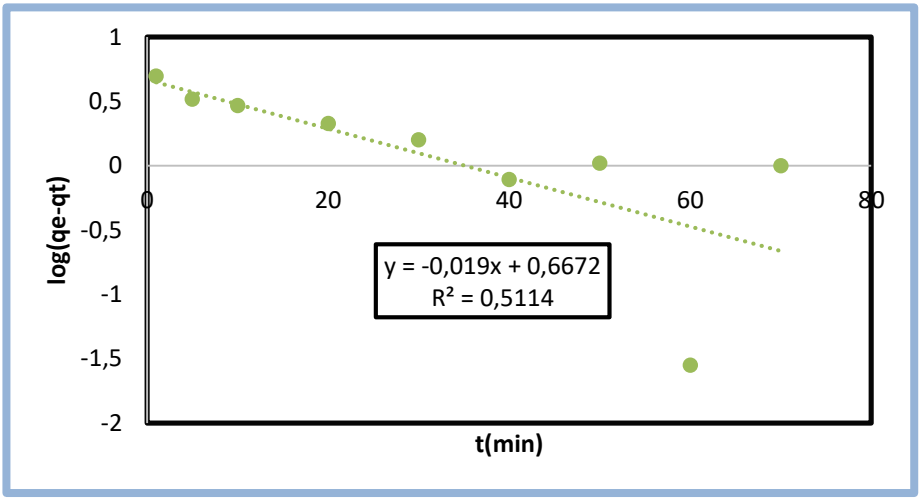


Figure III.15. Modèle cinétique de pseudo-premier ordre.

Pseudo second ordre

Les paramètres de la cinétique d'adsorption de pseudo-second ordre sont déterminés à partir de la représentation linéaire de t/q_t en fonction du temps. Les résultats sont montrés sur la figure III.16.

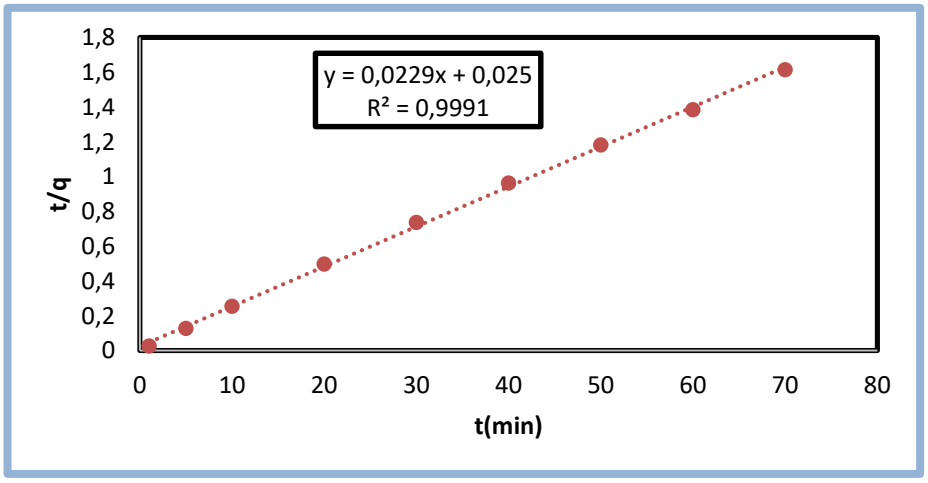


Figure III.16. Modèle cinétique de pseudo-second ordre.

D'après les figures (III.16) nous pouvons conclure que le modèle Lagergren du pseudo-premier ordre n'est pas applicable pour l'adsorption de méthyl orange sur la bentonite. Par contre la courbe du pseudo-second ordre montre que les résultats expérimentaux obtenus suivent parfaitement la variation linéaire donnée par l'équation représentative d'une cinétique de pseudo-second ordre.

Le tableau (III.4) représente les paramètres des deux modèles cinétiques.

Tableau III.4. Les paramètres des Modèles cinétiques, pseudo-premier ordre et pseudo-seconde ordre.

pseudo-première ordre				**Pseudo-second ordre**			
$K_1(min^{-1})$	R^2	Q_e(mg/g) Expérimental	Q_e(mg/g) Théorique	K_2 (min^{-1})	R^2	Q_e(mg/g) Expérimental	Q_e(mg/g) Théorique
0,44	0,5114	43,3616	0,22	0,84	0,9991	43,3616	43,67

D'après le tableau (III.4), ils ressortent que l'ordre de la réaction du pseudo- second ordre s'applique bien dans le cas du système adsorbant/adsorbat étudié vu les valeurs obtenues des coefficients de détermination R^2=0,99. Aussi, on constate que les quantités adsorbées calculées par ce modèle sont très proches des quantités adsorbées réellement ou expérimentalement.

III.8. Isotherme d'adsorption

Les phénomènes d'adsorption se décrivent au moyen des isothermes d'échange reliant la concentration de la substance en solution (mg/l) et la quantité adsorbée sur la phase solide (mg/g). Ces isothermes sont obtenues par la représentation graphique de q_e=f (C_e) où q_e et C_e sont, respectivement, la quantité de colorant adsorbé à l'équilibre et la concentration de l'adsorbat à l'équilibre.

Dans cette étude on s'intéressera aux modèles d'adsorption de Langmuir et Freundlich. Ces modèles nous ont permet de calculer la capacité maximale d'adsorption ainsi que d'autres paramètres d'adsorption. La représentation des résultats expérimentaux sous forme d'isotherme d'adsorption est portée sur la figure (III.17).

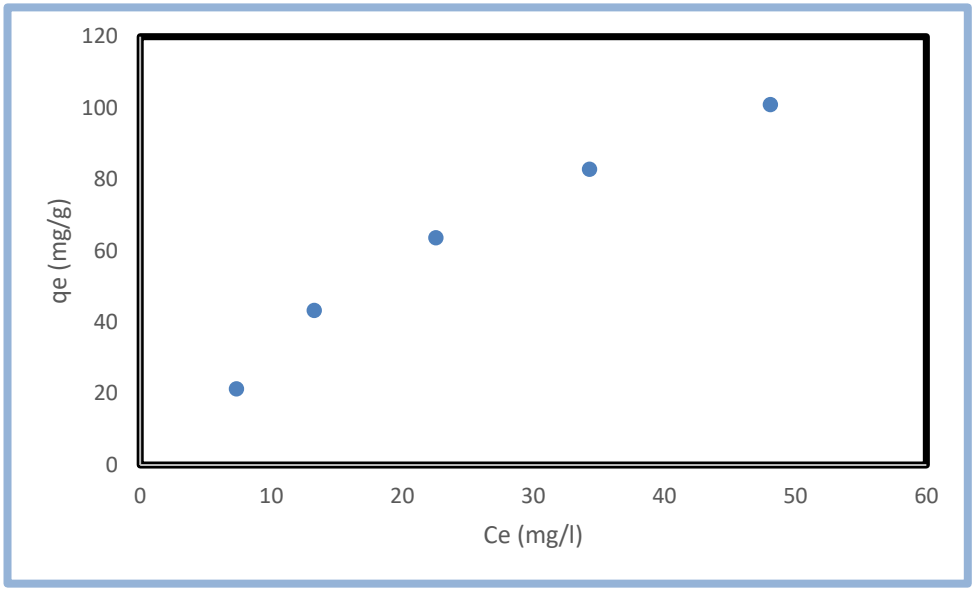


Figure III.17. Isotherme d'adsorption de MO sur la bentonite.

D'une manière générale, cette isotherme montre qu'il se rapproche de la classe L selon la classification de Gale. Caractérisée par de faibles concentrations de solution, la concavité dévie vers le bas reflétant une diminution des sites libres à mesure que l'absorption progresse.

Les essais de modélisation des isothermes de l'adsorption selon les deux modèles, Langmuir et Freundlich qui ont été réalisés avec la forme linéaire de chaque modèle en utilisant les équations (II-6) et (II-7) ont abouti aux résultats représentés sur les figures (III.18 et III.19).

Modèle de Langmuir

Le modèle de Langmuir repose sur l'hypothèse que l'adsorption a lieu aux emplacements homogènes spécifiques dans l'adsorbant.

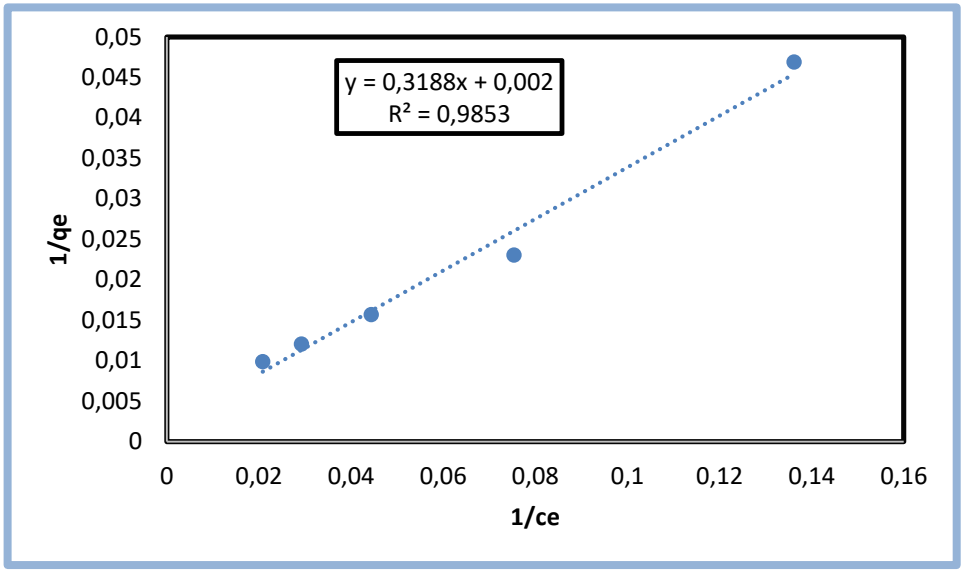


Figure III.18: Modélisation de l'isotherme selon le modèle de Langmuir.

Modèle de Freundlich

Le modèle de Freundlich est une équation empirique utilisée pour décrire les systèmes hétérogènes. La forme linéaire de l'équation est : Ln (q_e) = f (LnC_e).

Les courbes tracées dans les figures (III.18 et III.19) montrent une bonne linéarité dans les deux modèles de Freundlich et Langmuir, avec un coefficient de corrélation supérieur à 0.97.

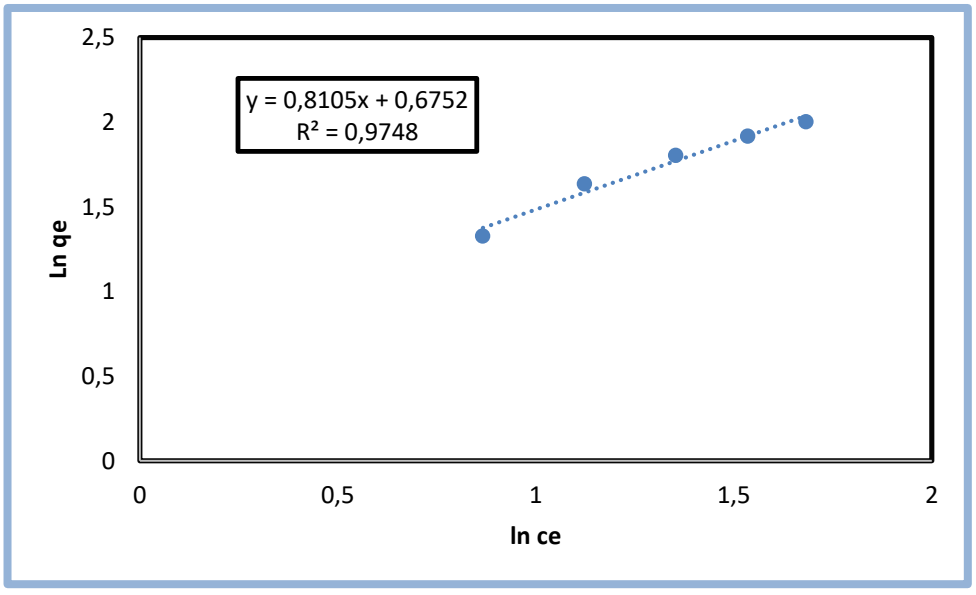


Figure III.19: Modélisation des isothermes selon le modèle de Freundlich.

Le tableau (III.5) regroupe les paramètres correspondants aux modèles de Langmuir et de Freundlich.

Tableau III.5: Les paramètres du modèle de Langmuir pour l'adsorption de MO sur la bentonite.

Modèle de Langmuir			**Modèle de Freundlich**		
q_m	**B**	R^2	K_f	**n**	R^2
500	0,00627	0,9853	1,9644	1,2339	0,9784

Selon les résultats rassemblés dans le tableau (III.5), Les valeurs des coefficients de corrélation R^2 sont proches de l'unité, mais on remarque que l'isotherme de Langmuir décrit mieux le phénomène d'adsorption du MO sur la bentonite. Donc ce modèle peut être adopté pour le système étudié.

III.9. Etude thermodynamique

Afin d'évaluer la faisabilité thermodynamique du processus et de confirmer la nature du processus d'adsorption, les paramètres thermodynamiques de l'adsorption du MO (100mg/L), y compris le changement d'énergie libre standard ($\Delta G°$), le changement d'enthalpie ($\Delta H°$) et le changement d'entropie ($\Delta S°$) ont été déterminés sur la base des équations suivantes [42]:

$$\Delta G° = \Delta H° - T\,\Delta S° \text{……..……} \quad \text{(III.5).}$$

$$Ln\,K_e = \frac{\Delta S°}{R} - \frac{\Delta H°}{RT} \text{…….....} \quad \text{(III.6).}$$

$$K_e = \frac{C_0 - C_e}{C_e} \text{……..……} \quad \text{(III.7).}$$

$\Delta S°$: L'entropie (KJ/ mol)

$\Delta H°$: L'enthalpie (J/ mol)

$\Delta G°$: L'enthalpie libre (J/ mol)

R : la constante des gaz parfaits (R= 8.314 J/ mol K)

K_e: La constante thermodynamique de l'équilibre de l'adsorption

T : Température (K).

Si nous portons graphiquement R.LnK_e en fonction de 1/T, nous aurons une droite de pente (-ΔH°) et d'ordonnée à l'origine ΔS°. Les résultats sont donnés dans le tableau III.6.

Tableau III.6 : Les paramètres thermodynamiques de l'adsorption du MO sur la bentonite.

R^2	$\Delta H°$ (KJ/mol)	ΔS (J/K)	T (K)	ΔG (KJ/mol)
0,9884	-21982	-68,283	283,15	-2647,66855
			293,15	-1964,83855
			303,15	-1282,00855
			313,15	-599,17855
			318,15	-257,76355

D'après ce tableau, nous constatons que l'adsorption de l'orange méthyl sur la bentonite est :

- Exothermique, car (ΔH°<0),
- le système après adsorption est plus ordonné (organisé) qu'avant, car (ΔS°<0),
- spontanée ($\Delta G° < 0$)

III.10. Application sur l'eau semi traitée au niveau de l'ADE

Le tableau III.7 regroupe les résultats des analyses physicochimiques et organoleptiques de l'eau semi traitée (càd, l'eau traitée partiellement sans être traitée par adsorption sur charbon actif), ainsi que l'eau traité par adsorption sur la bentonite sous les conditions optimales trouvées précédemment.

Tableau III.7. Résultats des analyses physicochimiques des eaux de barrage Ghrib.

Origine / Paramètre	Eau semi traité	Eau traité par la bentonite	Normes Algériennes
T C°	21,6	22 ,4	25
Conductivité (µs/cm)	2100	2120	2800
Sal	1,1	1,1	1,2
TDS (mg/l)	OFL	OFL	OFL
pH	8,13	7, 39	6,5-9
Turbidité (NTU)	3,92	0,764	5
NO_2^-	0,055	0,064	0,1
NH_4^+	0,021	0	0,5
Ca^{+2}	182,52	111,10	200
Th	690	780	500
Mg^{+2}	55,89	121,5	150
SO_4^{-2}	624,4	418	400
Cl^-	340	337,7	500
TAC	103,5	110	211
HCO_3^-	126,27	134,2	-
P	0	0,142	0,5

Couleur (mg/l)	25	10	15 (incolore)

Les paramètres organoleptiques prisent on considération (le couleur, le gout, l'odeur).

- **Couleur**

La couleur de l'eau traitée est transparente.

- **Gout**

Le gout de l'eau de barrage de Ghrib est dur.

- **Odeur**

Une légère odeur de terre.

- **Turbidité**

La turbidité de nos échantillons varie de 0,764 (eau traitée) à 3,92 (eau semi-traitée), mais elle ne dépasse jamais les normes pour une eau qui contient une quantité importante de particules colloïdales (constituées de chaux, d'argile ou d'autres matériaux organique) présente dans les eaux du barrage de Ghrib, du fait de sa grande capacité d'adsorption des particules, le traitement de la bentonite entraîne une diminution de la turbidité.

Les résultats des analyses physicochimiques ont montré :

a) Paramètres physique

Les facteurs physiques pris en compte incluent le pH, la turbidité, la conductivité, le TDS, température, salinité). Au cours de cette étape, ces mesures ont été réalisées au niveau du laboratoire de physico-chimie de l'ADE Médéa.

- **La température**

La température mesurée des échantillons analysés varie entre 19 et 22,4 °C, ce qui est une valeur raisonnable à la fois pour la « température du laboratoire » et la « température saisonnière ».

- **La conductivité électrique**

Le test de conductivité révèle que les eaux du barrage ont un niveau de minéralisation très élevé (2120µS), c'est une eau dure.

- **pH**

Les résultats de pH montrent une légère diminution du pH (de 8,13 à 7,39), qui se situe toujours sous la plage neutre "moins de 9" acceptable pour la consommation humaine.

b) Paramètres chimiques

Les résultats obtenus au cours de notre étude révèlent une présence importante des sels minéraux. Les cations (Ca^{+}, NH_4^{+}) sont présents avec des valeurs considérables dans l'eau semi traitée, mais après le traitement de l'eau par la bentonite on remarque clairement une diminution dans les valeurs d'eau traité qui causé par l'échange des cations avec la bentonite. La même amélioration a été détectée pour les anions de (SO_4^{-2}, Cl^{-}) on a une diminution très importante qui se traduit par leur adsorption sur la bentonite.

c) Paramètres de pollution

Les résultats obtenu montre qui il y a une diminution dans le paramètre de pollution (NH_4^{+}) et une augmentation dans le phosphate.

III.11. Conclusion

D'une manière générale, le tableau III.7, montre que les valeurs des paramètres que présentent l'eau traitée par adsorption sur la bentonite sont conformes aux normes algériennes selon l'ADE et qu'il n'y pas d'indice de pollution. Donc la bentonite a montré son efficacité pour substituer le charbon commerciale, surtout pour l'amélioration de la couleur, pH, turbidité, et l'abaissement de la teneur en sulfate et chlorure. Toutefois, il a été noté que quelques indices ont augmentés après application de la bentonite.

Conclusion générale

Conclusion générale

Chaque année, d'énormes quantités de colorants sont jetées dans l'eau, ce qui constitue une préoccupation importante et devrait être éliminée. Dans notre travail, nous avons choisi l'adsorption comme procédé d'élimination pour son efficacité. D'autre part, nous avons pris la bentonite comme adsorbant pour la décontamination de l'eau, elle a été choisie en raison de sa disponibilité, de son faible coût et surtout de sa capacité d'adsorption intéressante.

Il a été utilisé dans ce travail pour l'adsorption de méthyl orange (MO), afin de l'appliquer pour le traitement de l'eau semi traitée de Barrage Ghrib. Ce colorant est utilisé pour simuler la coloration de l'eau semi traitée.

Au cours de ce travail, nous avons étudié l'efficacité d'adsorption de la bentonite et sa dépendance avec les paramètres physicochimiques tels que le temps, la masse d'adsorbant et la concentration initiale. Les obtenus sont :

- ✓ le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre est égal 1h.
- ✓ La concentration optimale de l'adsorbat (MO) est 100mg/l ;
- ✓ La concentration optimale de l'adsorbant (Bentonite) est 2g/l.
- ✓ L'adsorption est favorable à température ambiante (20°C ;

De plus, la modélisation de la cinétique et l'étude thermodynamique de l'adsorption du MO sur la bentonite sous les conditions optimales ont été réalisées, et les résultats obtenus sont :

- ✓ Le modèle de réaction du pseudo-second ordre s'applique bien pour le système étudié.
- ✓ L'isotherme d'adsorption est mieux représentée par le modèle de Langmuir. Ceci nous permet de conclure que l'adsorption s'est effectuée en monocouche.

Nous pouvons conclure au terme de cette étude que l'adsorption du méthyl orange sur la bentonite a donné des résultats satisfaisants.

Conclusion générale

En outre, l’application de la bentonite sous les conditions optimisées sur l’eau semi traitée, a nettement amélioré quelques paramètres physico-chimiques, tels la couleur, le pH, la turbidité, et a abaissé la teneur en sulfate et en chlore, de cette eau. L'exploitation de ce type d'argile est donc économiquement intéressante pour la purification des eaux potables, afin de remplacer les charbons actifs commerciales.

Nous espérons continuer cette étude sur un échelle pilote pour mieux optimiser la faisabilité (efficacité et couts) de l’adsorption sur la bentonite.

Références Bibliographique

Références Bibliographique

[1] **N. Guendouz, H. Rezzaz-Yazid**, 2016, Etude de la biosorption d'un colorant basique sur un matériau végétal en système dynamique, Algerian Journal of Environmental Science and Technology, Vol.2. No1.

[2] Purification et traitement de l'eau, [en ligne], **https://www.lenntech.fr/faq-pollution-eau-htm,** Consulté le 20/05/2023.

[3] FAQ sur la pollution de l'eau, 1998, [en ligne], https://www.lenntech.fr/faq-pollution-eau.htm?fbclid=IwAR2HcEsOkLuU1znILHCKzMIJ0T31fkTlYgrWjNluLS3PyJc9s7lo6GZCefw, Consulté le : 21/05/23.

[4] **MARCEL-M**, 1974, Les types de pollutions de l'eau, Noros, N° 82.

[5] **Hedi Ben Mansour, Oualid Boughzala, dorra Dridi, Daniel Barillier, Leila Chekir-Ghedira et Ridha Mosrati**, 2011, LES COLORANTS TEXTILES SOURCES DE CONTAMINATION DE L'EAU: CRIBLAGE DE LA TOXICITÉ ET DES MÉTHODES DE TRAITEMENT, érudit, vol. 24, n°3, p. 209-238.

[6] **BOUAZZA Fayza**, 2012, Elimination des polluants organiques par des argiles naturelles et modifiées, Mémoire magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN, Algérie.

[7] Qu'est-ce que la bentonite, 2018, [en ligne], *http://www.plastechplus.ca*, Consulté le : 01/05/23.

[8] **BENBOUABDELLAH Thanina, KABECHE Souhila**, 2021, Amélioration du traitement physico-chimique des eaux usées du complexe textile de Draa Ben Khedda par la technique de filtration sur sable et sur bentonite, Mémoire de master, Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.

[9] **GAAMOUNE Sofiane,** 2010, LE ROLE DES BIOFILMS D'ALGUES DANS LES TRAITEMENTS BIOLOGIQUES DES EAUX, mémoire magister, UNIVERSITE FARHAT ABBAS –SETIF, Algérie.

[10] **Linda SCHWEITZER, James NOBLE**T, 2018, Water Contamination and Pollution, Green Chemistry- elsevier, p 261-290**.**

[11] Chaudhry FN, Malik MF, 2017, Factors Affecting Water Pollution: A Review, Journal Ecosyst. Ecography.

[12] **Batoul BENKADDOUR**, 2018, Contribution à l'étude de la contamination des eaux et des sédiments de l'Oued Cheliff (Algérie), Thèse doctorat, UNIVERSITÉ DE MOSTAGANEM, Algérie.

[13] Types Of Water Pollution, 2022, [en ligne] , *https://atlas-scientific.com/blog/types-of-water-pollution/,* Consulté le :15/02/23.

[14] Pollutions marines : les définitions, 2013, [en ligne], https://gisposidonie.osupytheas.fr/?p=352**,** Consulté le : 15/02/23.

[15] **Akpor, O. B, Muchie, M**, 2011, Environmental and public health implications of wastewater quality, African Journal of Biotechnology, Vol. 10(13), P 2379-2387.

[16] What are the effects of water pollution, 2019, [en ligne], https://www.fairplanet.org/story/types-and-effects-of-water-pollution/, Consulté le: 14/02/23.

[17] Conséquences de la pollution de l'eau, 2020, [en ligne], https://education.toutcomment.com/article/consequences-de-la-pollution-de-l-eau-13908.html, Consulté le 14/02/23.

[18] CAUSES AND CONSEQUENCES OF WATER POLLUTION, 2021, [en ligne], https://wellwo.es/en/causes-and-consequences-of-water-pollution/, Consulté le 14/02/23.

[19] Water and Water Pollution, [en ligne], https://www.toppr.com/guides/biology/natural-resources/water-and-water-pollution/#Water_and_Water_Cycle, Consulté le : 14/02/23.

[20] **YAHIAOUI Tariq,** 2015, Contribution à l'étude de l'élimination des colorants textiles par adsorption sur des matériaux naturels traités, diplôme de MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS- SETIF-1-, Algérie.

[21] **Alberghina G, Bianchini R, Fichera M, Fisichella S**, 2000, Dimerization of Cibacron Blue F3GA and other dyes: influence of salts and temperature. Dyes and Pigments, 46, P129-137.

[22] **Swamy,J,** 1998, The biodecoloration of textile dyes by the white rot fungus trametes versicolor, these doctorat, university Kingston , Canada.

[23] **BOUSNOUBRA Ibtissem,** 2017, Contribution à l'élimination de colorants (Vert de méthyle et Bromocrésol pourpre) par procédés photochimiques en phase homogène (séparés et mélangés), en phase hétérogène en milieu aqueux et par adsorption (Vert de méthyle) sur ZnO, DIPLOME DE DOCTORAT, UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE1, Algérie.

[24] **Cebli Derradji**, 2012, Traitement des eaux usées industrielles : Dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique, Mémoire Doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS, Algérie.

[25] **HARABI Nassima, ZEBICHE Saliha**, 2020, Optimisation des paramètres d'adsorption de méthyle orange sur un charbon actif réalisé à base de coquilles d'amande, Mémoire de Master, UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, Algérie.

[26] **Zawlotzki guivarch**. **E**, 2004, Traitement des polluants organiques en milieux aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée "Electro- Fenton". Application à la minéralisation des colorants synthétiques, thèse doctorat, Université de Marne-La-Vallée

[27] **Oubagha N**, 2012, Décontamination des eaux contenant les colorants textiles et les adjuvants par des matériaux naturels et synthétiques, mémoire magister, Université Mouloud Mammeri, Algérie.

[28] **F. Larbi**, 2008, Contribution à la décoloration des eaux résiduaires textiles par des argiles naturelles, Mémoire de Magister, Université d'Oran, Algérie.

[29] **BENAMRAOUI Faouzia,** 2014, Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture, Diplôme de MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF-1UFAS, Algérie.

[30] Dermatoses professionnelles aux colorants, [en ligne], file:///C:/Users/IT%20Doctor/Downloads/ta71-1.pdf, Consulté le 03/03/23.

[31] **Haddad Djamel, MOKHETARI Said**, 2010, Elimination de polluants sur une argile anionique modifiée, Mémoire d'ingéniorat université USTO, Algérie.

[32] **Alok Mittal, Arti Malviya, Dipika Kaur, Jyoti Mittal, Lisha Kurup**, 2007, Studies on the adsorption kinetics and isotherms for the removal and recovery of Methyl Orange from wastewaters using waste materials, Journal of Hazardous Materials, P 229-240.

[33] Material Safety Data Sheet Methyl Orange, [en ligne], https://fscimage.fishersci.com/msds/60355.htm#:~:text=Skin%3A%20May%20cause%20skin%20irritation,May%20cause%20respiratory%20tract%20irritation, Consulté le 13/03/23.

[34] **F. AGOUILLAL, H. MOGHRANI, N. NASSRALLAH, R. MAACHI**, 2015, Wastewater treatment using extraction industries wastes: Methyl Orange Removal by Bio-sorbent, Journal of Materials, Processes and Environment, Vol.3. No1.

[35] **A. Bellifa, M. Makhlouf and Zh, Hechemi Boumila**, 2017, Comparative Study of the Adsorption of Methyl Orange by Bentonite and Activated Carbon, ACTA PHYSICA POLONICA, Vol. 132. No.3, P 466-468.

[36] **Emna ZOUAOUI, Férial KRID, Hanène ZAAFOUR, AbdelHak MOUMEN, Mohamed Salah MEDJRAM**, 2017, Synthèse de catalyseur à base de cuivre supporté sur la bentonite pour l'élimination de polluants de l'eau, PhytoChem & BioSub Journal, Vol.11 No. 1.

[37] **Chennouf-Abdellatif.Z, Checknane.B, Zermane.F, Gaigneaux Eric.M, Hadj Sadok A.B, Mohammedi. O, Bouchenafa-Saib.N**, 2015, Preparation of activated carbon based on synthetic and agricultural wastes: application to the adsorption of methyl orange, Revue des Energies Renouvelables,Vol. 18, no.4, P 575-586.

[38] **Kingsley O. lwuozor, Joshua O. lghalo, Ebuka Chizitere Emenike, Lawal Adewale Ogunfowora, Chinenye Adaobi lgwegbe**, 2021, Adsorption of methyl orange: A review on adsorbent performance, Current Research in Green and Sustainable Chemistry, v4.

[39] Quels traitements sophistiqués pour rendre l'eau potable, 2008, [en ligen]**,** **https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/quels-traitements-sophistiques-pour-rendre-leau-potable/,** Consulté le : 03/04/23.

[40**] Houda Ben Slama, Ali Chenari Bouket, Zeinab Pourhassan, Faizah N. Alenezi, Allaoua Silini, Hafsa Cherif-Silini, Tomasz Oszako, Lenka Luptakova, Patrycja Golińska, Lassaad Belbahri**, 2021, Diversity of Synthetic Dyes from Textile Industries, Discharge Impacts and Treatment Methods, MDPI Journal List, V. 11 Issue.14.

[41] **MAKHLOUFI Noureddine,** 2011, MODELISATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA COAGULATION FLOCULATION POUR LES EAUX POTABLES, MEMOIRE DE MAGISTER, École Nationale Polytechnique (ENP), Algérie.

[42] **Lujie Zhang, Qian Liu, Pan Hu, Ruihua Huang**, 2015, Adsorptive removal of methyl orange using enhanced cross-linked chitosan/bentonite composite, Desalination and Water Treatment.

[43] **Ch. Leodopoulos, D.Douila, K. Gimouhopoulos, T.M.Triantis**, 2012, Single and simultaneous adsorption of methyl orange and humic acid onto bentonite, Pages 84-90.

[44] **Mohamed LAABD, Abdelhadi EL JAOUHARI, Hafsa CHAFAI, Nouh AARAB, Mohammed BAZZAOUI, Abdallah ALBOURINE**, 2015, Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption des colorants monoazoïques sur la polyaniline (Title), Journal of materials and environmental science.

[45] **Mohamed Bagane, Sami Guiza,** 2000, Elimination d'un colorant des effluents de l'industrie textile par adsorption, Annales de Chimie Science des Matériaux, Pages 615-625.

[46] Desjardins R , 1990, Le traitement des eaux , 2 ème édition.

[47] **Zeghache Hadjer,** 2019, Etude de l'adsorption des colorants sur un matériau poreux ‹‹charbon actif››, Diplôme de DOCTORAT, Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi, Algérie.

[48] **DOUADI Mohammed, MEDAKENE Abderrahmane,** 2017, Etude de l'adsorption d'une eau polluée par des hydrocarbures sur charbon actif, Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Algérie.

[49] **Nora SEDIRA,** 2013, Etude de l'adsorption des métaux lourds sur un charbon actif issu de noyaux de dattes, diplôme de MAGISTER, Université Mohamed Chérif Massaadia Souk-Ahras, Algérie.

[50] **YAHYAOUI Nouara**, 2012, Etude de l'adsorption des composés phénoliques des calciums, Hydroxyapatite et charbon actif, mémoire de magister, Option : chimie de l'environnement, Université Mouloud Mammeri.

[51] **CHELMOUH Djamila, MEBREK Fatma**, 2016, Etude de l'adsorption compétitive des composés organiques, mémoire de master, Option : Pollution Chimique et Gestion Environnemental, UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, Algérie.

[52] **Rebouh, S**, 2015, Utilisation des différents techniques d'intelligence artificielle pour la modélisation du procédé de séparation par adsorption solide-liquide, étude comparative, Thèse de doctorat, Université de Médéa, Algérie.

[53] **Ediline, F**, 1998, L'épuration physicochimique, théorie et technologie des eaux, Ed. CEBEDOC Sprl, liége.

[54] **Moreau, S**, 2003, L'adsorption et l'environnement.

[55] Brevet APG-RCC : PCT / FR 99 / 00748 du 31 mars,(1999).

[56] La franque,Pollet, JP.,Garforth,N., Phytoma,B.Phys.Chem, 9, 5-49,(1993).

[57] **Serraye .L. Et M.A. Souigat**, 2017, « Étude Comparative de la Capacité Adsorbant de Deux types de Charbon Actif à Partir des Fibres de Palmier Dattier », Mémoire de Master de Génie chimique, université kasdi merbah ouargla, Algérie.

[58] **D.Guignard**, 1992, L'essentiel de la cinétique et de la thermodynamique chimique, Edition Eyrolles, 85-96, Paris.

[59] **E.G. Dégréement**, 1996, Polyamines adsorbées sur silice caractérisation physico-chimique :Application au traitement des eaux : Etude préliminaire, Thèse de Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, France.

[60] **BEN AMOR Lakhdar, NASRI Ali**, 2018, Elimination des polluants organiques sur la vermiculite modifiée, diplôme de MASTER, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, Algérie.

[61] **Asmaa Bennani Karim, Badia Mounir, Mohsine Hachkar, Mina Bakasse and Abdelghani Yaacoubi**, 2010, Élimination du colorant basique « Bleu de Méthylène » en solution aqueuse par l'argile de Safi Removal of basic dye "Methylene Blue" in aqueous solution by Safi clay, Journal of Water Science, p 375- 385.

[62] **BAARA Ramzi, MECHERI Abderrezak,** 2020, Etude d'adsorption de la Fuchsine sur la biomasse Pleurotus mutilus calcinée, diplôme d'ingénieur d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie.

[63] **Fares Houssem Eddine**, 2013, ETUDE DE L'ADSORPTION D'UNE AMINE SUR LE CARBONATE DE CALCIUM, diplôme de Master, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI (OUM EL BOUAGHI), Algérie.

[64] **LAMRAOUI Sana**, 2022, ETUDE CINETIQUE DE L'ADSORPTION DE TRIAZACYCLOHEXANE, DIPLOME DE MASTER, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, Algérie.

[65] **Noureddine BARKA**, 2004, Etude comparative des propriétés d'adsorption de quelques micro-polluants sur les phosphates naturels et le charbon actif, Diplôme d'études supérieures, Algérie.

[66] **Jianlong Wang, Xuan Guo**, 2020, Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method, Journal Pre-proof.

[67] **J. Huang, Y. Liu, Q. Jin, X. Wang, J. Yang**, 2007, Adsorption of a water soluble dye, Reactive RedMF-3B, using sonication-surfactant-modified Attapulgite clay, Journal of Hazardous Materials,P 541-548.

[68] **Amira Tadjer**, 2014, Adsorption du phénol sur la bentonite naturelle, Projet de Fin d'Etudes pour l'Obtention du Diplôme D'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie.

[69] **Abdelouhab C**, 1987, Elimination sur quelques argiles bentonitiques algériennes de métaux lourds présents dans les eaux résiduaires industrielles cas du Cd (II) et Zn (II). Thèse de Magister, U.S.T.H.B, Alger, Algérie.

[70] **F.BOUAZZA**, 2012, Elimination des polluants organiques par des argiles naturelles et modifiées, mémoire de magistère, université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, Algérie.

[71] **Zahaf faiza**, 2017, Etude Structurale Des Argiles Modifiées Appliquées À L'adsorption Des Polluants, Thése de Doctorat, Université Mustapha Stambouli- Mascara, Algérie.

[72] **Jonathan Piard**, Clément Doré, Jean-Pierre Placial, 2022, Discussion sur les limites de loi de Beer-Lambert. Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, ffhal-03885627.