

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM

Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique

Département de Chimie.

Filière : Chimie appliquée.

MEMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Chimie.

Option : **Chimie appliquée.**

THEME :

**Etude de l'effet de la bentonite dans le dessalement de l'eau de mer en vue de
l'élimination des polluants organiques (Bleu de méthylène)**

Présenté par :

❖ **Abdelaziz Majabri**

❖ **Laid Guenona**

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

Président : Pr. **Université de Mostaganem**

Examineur : **Université de Mostaganem**

Encadreur : **Mr. Kadi Abdelkader Dr. Université de Mostaganem**

Année Universitaire 2022-2023





REMERCIEMENTS

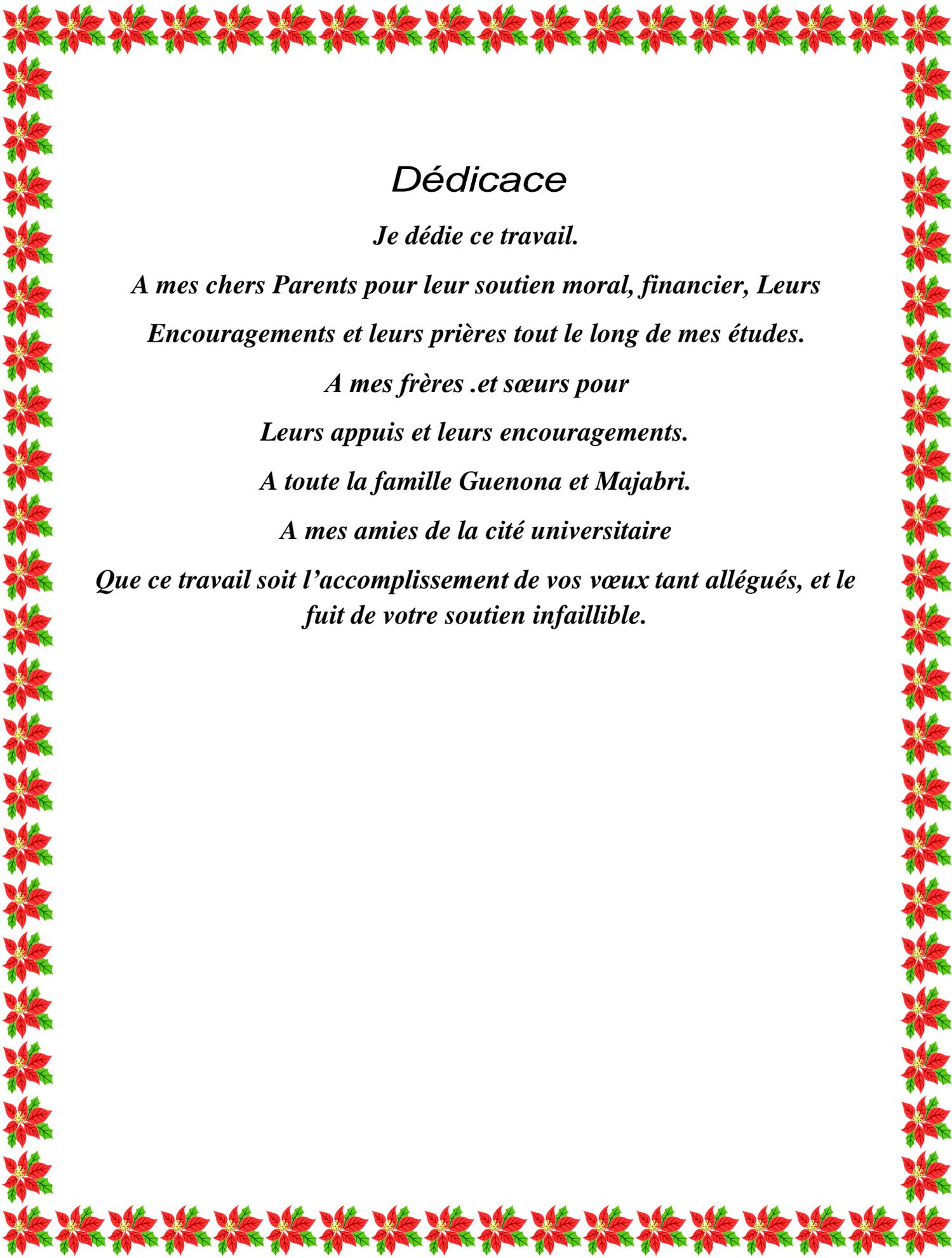
Tout d'abord, On remercie le bon Dieu pour nous avoir menés jusqu'ici. Pourquoi ne pas le dire, dans cette épreuve où seuls le courage et la maîtrise des connaissances ne suffisent pas, la force qui donne l'impulsion ne peut provenir que de Dieu.

Nous réservons une attention toute particulière à notre encadreur Mr. Kadi Abdelkader, on vous reconnaît de votre gentillesse et spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu diriger ce travail .vous êtes grandement impliqué par vos directives, vos remarques, vos écoutes, vos suggestions et votre disponibilité, mais aussi vos encouragements dans les moments clés de vos élaborations. On tient à vous remercier aussi pour la liberté que vous nous avez permise, vous nous avez inculqué la manière de penser et procéder. Laissez-nous vous dire que vous étiez frère avant d'être professeur.

Nous remercions aussi les membres de jury, président et examinateur, d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

On remercie également l'ensemble des personnes du laboratoire de chimie (Gheribi Mohamed Hmida, Bouaza Touati et Rahmani Touatia), pour leurs accueils chaleureux, pour leurs aides et leurs conseils.

On exprime également nos gratitude à tous les enseignants qui ont contribué à nos formations depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.



Dédicace

Je dédie ce travail.

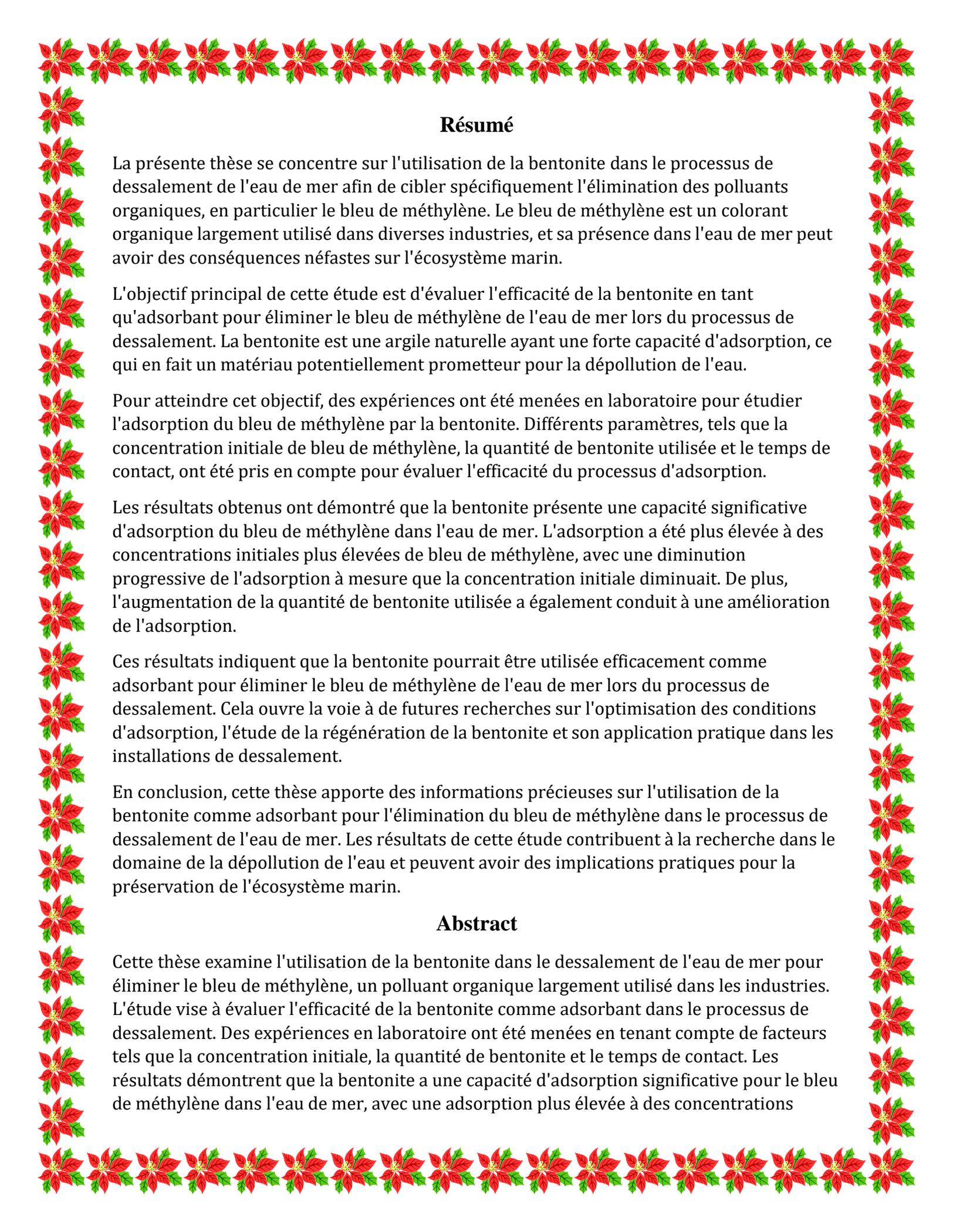
*A mes chers Parents pour leur soutien moral, financier, Leurs
Encouragements et leurs prières tout le long de mes études.*

*A mes frères .et sœurs pour
Leurs appuis et leurs encouragements.*

A toute la famille Guenona et Majabri.

A mes amies de la cité universitaire

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le
fruit de votre soutien infailible.*



Résumé

La présente thèse se concentre sur l'utilisation de la bentonite dans le processus de dessalement de l'eau de mer afin de cibler spécifiquement l'élimination des polluants organiques, en particulier le bleu de méthylène. Le bleu de méthylène est un colorant organique largement utilisé dans diverses industries, et sa présence dans l'eau de mer peut avoir des conséquences néfastes sur l'écosystème marin.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'efficacité de la bentonite en tant qu'adsorbant pour éliminer le bleu de méthylène de l'eau de mer lors du processus de dessalement. La bentonite est une argile naturelle ayant une forte capacité d'adsorption, ce qui en fait un matériau potentiellement prometteur pour la dépollution de l'eau.

Pour atteindre cet objectif, des expériences ont été menées en laboratoire pour étudier l'adsorption du bleu de méthylène par la bentonite. Différents paramètres, tels que la concentration initiale de bleu de méthylène, la quantité de bentonite utilisée et le temps de contact, ont été pris en compte pour évaluer l'efficacité du processus d'adsorption.

Les résultats obtenus ont démontré que la bentonite présente une capacité significative d'adsorption du bleu de méthylène dans l'eau de mer. L'adsorption a été plus élevée à des concentrations initiales plus élevées de bleu de méthylène, avec une diminution progressive de l'adsorption à mesure que la concentration initiale diminuait. De plus, l'augmentation de la quantité de bentonite utilisée a également conduit à une amélioration de l'adsorption.

Ces résultats indiquent que la bentonite pourrait être utilisée efficacement comme adsorbant pour éliminer le bleu de méthylène de l'eau de mer lors du processus de dessalement. Cela ouvre la voie à de futures recherches sur l'optimisation des conditions d'adsorption, l'étude de la régénération de la bentonite et son application pratique dans les installations de dessalement.

En conclusion, cette thèse apporte des informations précieuses sur l'utilisation de la bentonite comme adsorbant pour l'élimination du bleu de méthylène dans le processus de dessalement de l'eau de mer. Les résultats de cette étude contribuent à la recherche dans le domaine de la dépollution de l'eau et peuvent avoir des implications pratiques pour la préservation de l'écosystème marin.

Abstract

Cette thèse examine l'utilisation de la bentonite dans le dessalement de l'eau de mer pour éliminer le bleu de méthylène, un polluant organique largement utilisé dans les industries. L'étude vise à évaluer l'efficacité de la bentonite comme adsorbant dans le processus de dessalement. Des expériences en laboratoire ont été menées en tenant compte de facteurs tels que la concentration initiale, la quantité de bentonite et le temps de contact. Les résultats démontrent que la bentonite a une capacité d'adsorption significative pour le bleu de méthylène dans l'eau de mer, avec une adsorption plus élevée à des concentrations

initiales plus élevées et une quantité accrue de bentonite. Ces résultats suggèrent que la bentonite peut être utilisée efficacement pour éliminer le bleu de méthylène lors du dessalement de l'eau de mer, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles recherches sur les conditions optimales, la régénération et l'application pratique. Cette thèse apporte des éclairages précieux à la recherche sur la dépollution des eaux et la préservation des écosystèmes marins.

الملخص

تبحث هذه الرسالة في استخدام البنتونيت في تحلية مياه البحر لازالة الميثيلين الأزرق، وهو ملوث عضوي يستخدم على نطاق واسع في الصناعات. تهدف الدراسة إلى تقييم فعالية البنتونايت كمادة ماصة في عملية التحلية. أجريت التجارب المعملية، مع الأخذ في الاعتبار عوامل مثل التركيز الأولي وكمية البنتونيت ووقت التلامس. أظهرت النتائج أن البنتونايت له قدرة امتصاص كبيرة للميثيلين الأزرق في مياه البحر، مع امتصاص أعلى بتركيزات أولية أعلى وكمية متزايدة من البنتونيت. تشير هذه النتائج إلى أنه يمكن استخدام البنتونايت بشكل فعال لازالة الميثيلين الأزرق أثناء تحلية مياه البحر، وفتح السبل لمزيد من البحث حول الظروف المثلى، والتجديد، والتطبيق العملي. تساهم هذه الرسالة في رؤى قيمة في أبحاث إزالة تلوث المياه والحفاظ على النظم البيئية البحرية

Les Figures

Chapitre 1 : Généralité sur l'eau de mer et dessalement

Figure 1 L'eau de mer de la Méditerranée.....	2
Figure 2	2
Figure 3 substance L'électrodialyse de choc pour dessaler l'eau de mer.....	17
Figure 4 principaux procédés industriels de dessalement.....	17
Figure 5 Distillation à simple effet	18
Figure 6 Distillation à effet multiple.....	19

Chapitre 2 : la pollution de l'eau de mer

Figure 1 : bleu de méthylène	34
------------------------------------	----

Chapitre 3 : les phénomènes d'adsorption

FIGURE 1 phénomène d'adsorption	37
FIGURE 2différences type d'adsorption entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique	40
FIGURE 3La couche tétraédrique	43
FIGURE 4La couche octaédrique	44
FIGURE 5Structure de Montmorillonite	44
FIGURE 6Structure de L'illite	45
FIGURE 7 Structure de Kaolinite	46
FIGURE 8Les isothermes d'adsorption en phase	54

Chapitre 4 : Partie Expérimentale

FIGURE 1 Spectroscopie IR.....	59
FIGURE 2 spectroscopie UV-visible	59
FIGURE 3 : séchage bentonite dans étuve à 80C°	60
FIGURE 4 :filtration de la bentonite	61
FIGURE 5 :la bentonite activée.....	62
FIGURE 6 : courbe de variation de pHf-pHi en fonction de pHi.....	65
FIGURE 7 : Balayage spectrale UV-visible d'une solution de BM	67
FIGURE 8 : Courbe d'étalonnage du bleu de méthylène.....	68
FIGURE 9 : Cinétique d'adsorption de BM sur la bentonite (Temps de contact).....	69
FIGURE 10 : Application du modèle de pseudo premier ordre sur l'adsorption du bleu de méthylène par la bentonite active	70
FIGURE 11 : Application du modèle de pseudo second ordre lors l'adsorption du bleu de méthylène par bentonite active	71
FIGURE 12 :Effet de la dose de la BA sur l'adsorption du bleu de méthylène.....	73
FIGURE 13 : Effet de la dose du BA sur l'adsorption du BM	74
FIGURE 14 :isotherme d'adsorption du bleu de méthylène sur la bentonite active	76

FIGURE 15 : Modélisation des isothermes d'adsorption par l'équation de Langmuir..	77
FIGURE 16 : Modélisation des isothermes d'adsorption par l'équation de Langmuir..	78
FIGURE 17 : Représente les spectres IR de notre échantillon (bentonite active)entre 500 et 4000 cm-1	80
FIGURE 18 : Représente les spectres IR de notre échantillon bentonite +BM entre 500 et 4000 cm-1	80

Les Tableaux

Chapitre 1 : Généralité sur l'eau de mer et dessalement

Tableau 1 Composition saline des eaux des Océans	3
Tableau 2 Salinité de l'eau de mer	4

Chapitre 2 : la pollution de l'eau de mer

Tableau 1 : Classification technologique des colorants	27
Tableau 2 : Exemples d'effets toxiques de quelques colorants.....	32
Tableau 3 fiche theqnique de bleu méthylène	34

Chapitre 3 : les phénomènes d'adsorption

Tableau 1 principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.	39
Tableau 2 Analyse chimique de la bentonite naturelle	50

Chapitre 4 : Partie Expérimentale

Tableau 1 : tableau des matériels et appareillage	58
Tableau 2 : composition chimique de la bentonite de Maghenia.....	59
Tableau 3 :Tableau 3 : Caractéristiques physico-chimiques de la bentonite de maghnia	60
Tableau 4 : variation de pHf-pHi en fonction de pHi	64
Tableau 5 : les conditions opératoires du processus d'adsorption de (BM)	66
Tableau 6 : :Paramètre cinétique de modèle de pseudo 1er ordre	70
Tableau 7 : :paramètre cinétique de modèle de pseudo 2ene ordre	71
Tableau 8 :isotherme d'adsorption	76
Tableau 9 : Paramètres d'équilibres d'adsorption selon le modèle de Langmuir et celui de Freundlich.....	78

Sommaire :

Chapitre 1 : Généralité sur l'eau de mer et dessalement

Partie 1 : L'eau de mer	1
--------------------------------------	----------

I.1.1 Introduction	1
I.1.2 Définition de l'eau de mer.....	1
I.1.3 La composition chimique de l'eau de mer	2
I.1.4 Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer	3
I.1.4.1 Caractéristiques chimiques.....	3
I.1.4.2 Caractéristiques physiques	4
Partie 2 : L'eau potable	7
II.1 Introduction sur l'eau potable	7
II.2 Définition de l'eau non potable	8
II.3 Composition chimique	9
II.3.1 Les matières minérales	10
II.3.2 Les matières organiques	10
II.4. Les critères de potabilité de l'eau	11
Partie 3 : dessalement de l'eau de mer	12
III.1 Introduction	12
III.2 Définition du dessalement.....	12
III.3 Les principes de dessalement.....	12
1) Les procédés thermiques qui impliquent un changement de phase, tels que la congélation et la distillation	13
2) Les procédés utilisant des membranes, tels que l'osmose inverse et l'électrodialyse.	13
III.4 Techniques de dessalement.....	13
III.4.1 L'osmose inverse.....	13
III.4.2 Les procédés membranaires	15
III.4.3 Les procédés de distillation.....	17
III.4.4 Procédé de congélation.....	19
III.5 Inconvénients liés au dessalement.....	19
❖ La corrosion.....	20
❖ L'entartrage	20
❖ Le colmatage.....	20
III.6 Avantages liés au dessalement : [26]	21
I. Systèmes modulaires	21
II. Expansion des sources d'eau potable.....	21

III. Rendement élevé	21
----------------------------	----

Chapitre 2 : la pollution de l'eau de mer

Partie 1 : la pollution	23
Une introduction à la pollution de l'environnement	23
1. Pollution de l'eau de mer	23
1.1 Définition	23
1.2 Sources de pollutions	23
1.3 Types de pollution	24
Partie 2: LES COLORANTS	25
1- Introduction	25
2. Définition des colorants	26
3. Classification des colorants	26
➤ Classification technologique	26
➤ Classification chimique	27
4. Classification tinctoriale	28
4.1 Colorants solubles dans l'eau	29
4.2 Colorants insolubles dans l'eau	29
5. Nature des colorants	29
A. Colorant naturel	30
B. Colorants synthétiques	30
6. Utilisation et application des colorants	30
7. toxicité des colorants	31
7.1 Toxicité par les rejets industriels	31
7.2 toxicité par les colorants alimentaires	31
8. Impact sur l'environnement	32
9. Méthodes d'élimination des colorants	33
10. Bleu de méthylène	33
a. Propriétés physiques et chimique	34
b. Utilisations	35
c. Toxicité du bleu de méthylène	35

Chapitre 3 : les phénomènes d'adsorption

1. Introduction.....	37
2. Définition de l'adsorption.....	37
3. Nature de l'adsorption.....	37
3.1 L'adsorption physique.....	38
3.2 L'adsorption chimique	38
4. Généralités sur les adsorbants	40
5. Types d'adsorbants et leurs utilisations	40
5.1 Le charbon actif	40
5.2 Les adsorbants minéraux:	41
6. Généralités sur les argiles.....	41
6.1 Structure des argiles	42
A. Maille (motif cristallin).....	42
6.2 Principales argiles	44
❖ Montmorillonite	44
❖ Illite.....	44
❖ Kaolinite.....	45
6.3 Propriétés des argiles	46
❖ Forme et surface spécifique.....	46
❖ Pouvoir adsorbant et surface spécifique	46
❖ Plasticité.....	47
❖ Hydratation	47
❖ Gonflement	47
❖ Échange ionique	47
6.4 Les propriétés physico-chimiques des argiles.....	47
7 la bentonite	48
7.1 Définition	48
7.2 Origine de la bentonite	48
7.3 Structure de la bentonite	49
7.4 Propriétés physico-chimiques de la bentonite	50
- Capacité d'échange cationique (CEC).....	50

- Gonflement	50
- Dispersion	50
- Flocculation	50
- Colloïdalité.....	51
- Surface spécifique	51
7.5 Utilisations de la bentonite	51
8. Les isothermes d'adsorption	52
i. Isothermes de Langmuir	52
ii. Isothermes de Freundlich.....	52
9. Classification des isothermes d'adsorption.....	53
a. Classe L.....	54
b. Classe S	54
c. Classe H.....	55
d. Classe C.....	55
9. Critères de la bonne qualité de l'adsorbant.....	55
10. Les paramètres influençant l'adsorption	55
i. Température.....	56
ii. pH.....	56
iii. Influence de la nature de l'adsorbant sur l'adsorption	56
iv. Influence de l'adsorbat sur l'adsorption.....	56
11. La cinétique d'adsorption	57

Chapitre 4 : Partie Expérimentale

Objectif	58
Matériels et méthodes	58
1.1 Matériels et Appareillage.....	58
1.2 Les produits utilisés	59

Méthodologie de travail.....	59
2.1 Choix de la bentonite	59
2.2 Purification de la bentonite	60
2.3 Activation de la bentonite	61
.....	61
Caractérisation de la bentonite active.....	62
3.1 Mesure de la densité apparent.....	62
Optimisation des conditions d'adsorption	65
• Résultats et discussions.....	67
5.1 Adsorption du Bleu de Méthylène par la bentonite activée.....	67
Propriétés spectrophotométriques des adsorbats.....	67
5.2 Etude de l'influence de quelques paramètres de l'adsorption sur le bleu de méthylène :68	
6. Discussion	77
7 Spectroscopie Infrarouge (IR)	79
8 Principe de la méthode ;.....	79
9. Conclusion Générale.....	81

Les symboles

BM : bleu de méthylène

BA : la bentonite activée

ΔS : Entropie standard J/mol

ΔH : Enthalpie standard KJ/mol

P : Densité apparente g/ml

T : Température °c

K : Conductivité ms/cm

G : Conductance Siemens

ϵ : Porosité

R : Constante des gaz parfaits J/mol. K

Q : Capacité d'adsorption mg/g

Kd : Constante de distribution

Qe : Capacité d'adsorption à l'équilibre mg/g

Ce : Concentration à l'équilibre du soluté en solution mg/l

Qt : Quantité d'adsorbant par gramme d'adsorbant a un temps t
mg/g

Kf Et n Constantes de Freundlich caractéristiques de l'efficacité d'un Adsorbant donné vis-à-vis d'un soluté donné.

KL : La constante de Langmuir

R% : Taux d'élimination

K1 : Constante de vitesse d'adsorption de premier ordre 1/min

K2 : Constante de vitesse pour une cinétique du deuxième ordre
1/min

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE :

La désalinisation de l'eau de mer s'est imposée comme une solution cruciale pour faire face au problème croissant de pénurie d'eau à l'échelle mondiale. Avec la demande croissante en ressources en eau douce, notamment dans les régions arides et les zones côtières, la désalinisation offre un moyen viable d'obtenir de l'eau potable à partir de sources d'eau de mer abondantes. Elle a connu des avancées significatives et une adoption généralisée ces dernières années.

Cependant, le succès de la désalinisation de l'eau de mer repose non seulement sur des processus de désalinisation efficaces, mais aussi sur l'élimination des contaminants présents dans l'eau de mer. Les contaminants tels que les composés organiques dissous et les colorants synthétiques posent des défis en termes de qualité de l'eau, d'impact environnemental et de problèmes de santé humaine.

Le bleu de méthylène, un colorant synthétique largement utilisé dans diverses industries, est l'un de ces contaminants qui se retrouve fréquemment dans les sources d'eau de mer. Il est connu pour être toxique, non biodégradable et peut avoir des effets néfastes sur les écosystèmes marins. Par conséquent, l'élimination efficace du bleu de méthylène de l'eau de mer est d'une importance capitale pour garantir la production d'eau potable sûre et propre.

Bien qu'il existe plusieurs méthodes pour l'élimination des contaminants lors de la désalinisation de l'eau de mer, telles que l'osmose inverse, ces méthodes peuvent ne pas être entièrement efficaces pour éliminer des contaminants spécifiques tels que le bleu de méthylène. Il est donc nécessaire d'explorer d'autres approches pour améliorer l'efficacité d'élimination des contaminants dans le processus de désalinisation.

La bentonite, un matériau argileux naturel, présente des propriétés prometteuses pour les applications de traitement de l'eau, notamment l'adsorption et l'élimination des contaminants. Sa grande surface spécifique, sa capacité d'échange d'ions et sa capacité à

Introduction générale

former des floccs en font un candidat intéressant pour améliorer l'efficacité d'élimination du bleu de méthylène lors de la désalinisation de l'eau de mer.

Comprendre l'effet de la bentonite sur le processus de désalinisation et son efficacité pour l'élimination du bleu de méthylène est crucial pour le développement de stratégies de traitement de l'eau plus efficaces et durables. En étudiant l'interaction entre la bentonite et le bleu de méthylène, nous pouvons obtenir des informations sur le potentiel d'utilisation de la bentonite comme agent de prétraitement dans les usines de désalinisation de l'eau de mer pour améliorer l'élimination du bleu de méthylène et d'autres contaminants similaires.

Cette étude vise à combler le fossé de recherche existant en menant une investigation approfondie sur l'effet de la bentonite dans la désalinisation de l'eau de mer pour l'élimination du bleu de méthylène. Les résultats de cette recherche contribueront à l'avancement des connaissances dans les technologies de traitement de l'eau et fourniront des informations précieuses pour le développement de processus de désalinisation plus efficaces et respectueux de l'environnement.

En mettant en évidence l'importance de la désalinisation de l'eau de mer et la nécessité de méthodes efficaces pour éliminer des contaminants tels que le bleu de méthylène, cette recherche contribuera à relever les défis pressants de la pénurie d'eau à l'échelle mondiale et à promouvoir des pratiques durables de gestion de l'eau.

Chapitre 1

Généralité sur l'eau de mer et le dessalement

Partie 1 : L'eau de mer

I.1.1 Introduction

L'eau a un impact crucial sur l'économie mondiale et est un élément indispensable pour l'humanité. Une grande partie de notre planète est constituée d'eau, dont 98 % est de l'eau de mer. Les océans et les mers représentent environ 96,5 % des réserves d'eau à la surface de la Terre, soit un volume estimé à 1338 millions de km³. En dehors de cela, l'eau souterraine, dont 85 % est salée à différents degrés, joue également un rôle important [1].

Environ 70 % de la surface terrestre est recouverte d'eau, principalement sous forme d'océans, et l'eau est également présente sous forme gazeuse, liquide et solide. Le volume approximatif de l'eau sur Terre, comprenant toutes les réserves d'eau du monde, est d'environ 1 360 000 000 km³ [2].

Les eaux potentiellement utilisables comme eau potable comprennent les eaux souterraines, mais de plus en plus, les eaux de surface sont également utilisées. Alors que les eaux souterraines nécessitaient autrefois un simple traitement de désinfection, ce n'est plus toujours le cas aujourd'hui. Quant aux eaux de surface, elles ne peuvent être rendues potables qu'après des traitements longs et coûteux. En effet, les eaux de surface contiennent des composés organiques et minéraux dissous et en suspension à des concentrations variables. La matière organique des eaux de surface est un milieu très complexe, comprenant des molécules de masse moléculaire élevée ainsi que des composés organiques simples tels que les phénols, les acides aminés et les sucres [ACHOUR, 2001] [LEFEBVRE et CROUE, 1995].

I.1.2 Définition de l'eau de mer :

L'eau de mer désigne l'eau salée qui se trouve dans les milieux marins et océaniques. C'est une solution saline qui contient en moyenne environ 35 parties pour mille (35 g/L) de sels minéraux dissous. Le constituant chimique principal de l'eau de mer est le chlorure de

sodium, connu sous le nom de sel de cuisine. Cependant, elle est également composée de 79 autres éléments différents [3].



Figure 1 L'eau de mer de la Méditerranée

Figure 2

L'eau de mer à une densité de surface moyenne est de 1,025 g/ml, étant plus dense que l'eau douce et l'eau pure

I.1.3 La composition chimique de l'eau de mer :

Les eaux de mer se distinguent principalement par leur salinité, qui correspond à leur teneur en sels dissous tels que les chlorures de sodium et de magnésium, les sulfates et les carbonates. En moyenne, la salinité des mers et des océans est d'environ 35 g/L (27,2 g/L de NaCl, 3,8 g/L de MgCl₂, 1,7 g/L de MgSO₄, 1,26 g/L de CaSO₄ et 0,86 g/L de K₂SO₄) [4].

Le pH moyen des eaux de mer varie quant à lui entre 7,5 et 8,4, ce qui indique un milieu légèrement basique [4]. Ces caractéristiques de salinité et de pH peuvent influencer la biodiversité marine ainsi que les processus biogéochimiques dans les écosystèmes marins.

Constituant chimique	Concentration g/kg d'eau de mer
Calcium (Ca)	0,419
Magnésium (Mg)	1,304
Sodium (Na)	10,710
Potassium (K)	0,390
Bicarbonate (HCO ₃)	0,146
Sulfate (SO ₄)	2,690
Chlore (Cl)	19,350
Brome (Br)	0,070
Total (salinité)	35,079

Tableau 1 Composition saline des eaux des Océans

I.1.4 Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer :

I.1.4.1 Caractéristiques chimiques :

I.1.4.1.1 Salinité :

La salinité est exprimée en termes de concentration massique de la solution saline, c'est-à-dire la quantité de sel contenue dans une solution aqueuse. L'eau douce a une salinité allant de 0 à 0,5, tandis que l'eau de mer a une salinité moyenne de 35 [5]. En moyenne, l'océan contient 35 grammes de sel par kilogramme d'eau de mer. Si l'on considère le volume total de l'océan (1338 millions de kilomètres cubes), cela représente 47 millions de milliards de tonnes de sel, soit environ 94 tonnes par mètre carré sur toute la surface du globe, ou 320 tonnes par mètre carré sur les parties émergées [6].

Anions (en g/kg)		Cations (en g/kg)	
Chlore Cl^-	18,9799	Sodium Na^+	10,5561
Sulfate SO_4^{--}	2,6486	Magnésium Mg^{++}	1,2720
Bicarbonate HCO_3^-	0,1397	Calcium Ca^{++}	0,4001
Brome Br^-	0,0646	Potassium K^+	0,3800
Fluor F^-	0,0013	Strontium Sr^{++}	0,0135

Tableau 2 Salinité de l'eau de mer

I.1.4.1.2 L'alcalinité :

L'alcalinité se définit comme la capacité quantitative d'une solution aqueuse à neutraliser un acide. Elle revêt une importance particulière pour évaluer la capacité d'un flux (tel que les précipitations ou les eaux usées) à neutraliser les polluants acides.

L'alcalinité est liée au pH d'une solution et à sa basicité, mais elle mesure une propriété différente. En substance, l'alcalinité d'une solution est une mesure de la "force" des bases présentes dans celle-ci, tandis que le pH quantifie la "quantité" de bases chimiques. Un bon exemple est celui d'une solution tampon, qui peut contenir de nombreuses bases disponibles (ce qui correspond à une alcalinité élevée), tout en maintenant un pH modéré.[7]

I.1.4.2 Caractéristiques physiques :

I.1.4.2.1 Température :

Chapitre 1 Généralité sur l'eau de mer et le dessalement

La température est généralement exprimée en degrés Celsius (°C). Dans le contexte des températures océaniques, elles peuvent varier de -2°C, qui est approximativement la température de congélation des eaux de mer, jusqu'à un peu plus de 30°C.

En ce qui concerne les logiciels de traitement des données océanographiques, tels que Seasoft de la société Seabird, ils offrent le choix entre deux échelles de température : l'IPTS 68 (International Practical Temperature Scale 1968) et l'ITS 90 (International Temperature Scale 1990). La différence entre les deux échelles est minime. Pour une plage de température de 0 à 40°C, on peut utiliser la relation suivante : $t_{90} (°C) = 0,000 2 + 0,99975 t_{68} (°C)$.

Cependant, par cohérence avec les algorithmes océanographiques antérieurs à 1990, il est préférable d'utiliser l'IPTS 68.

I.1.4.2.2 Conductivités :

L'eau présente une conductivité légère. La conductivité est une mesure qui permet d'évaluer la concentration en ions d'une solution. En effet, toute espèce solvatée chargée est capable de transporter un courant électrique au sein d'une solution. La conductivité est généralement exprimée en microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) à 20°C.[8]

La conductivité de l'eau la plus pure obtenue est d'environ 4,8 microsiemens par mètre à 20°C. Cette valeur augmente lorsque des sels sont dissous dans l'eau, et elle varie en fonction de la température. Par exemple, la conductivité de l'eau de mer est d'environ 50 millisiemens par centimètre (50'000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) à 20°C.

Il convient de noter que ces valeurs sont données à titre indicatif et peuvent varier en fonction de la composition chimique et des conditions spécifiques de l'eau.

I.1.4.2.3 pH des eaux de mer :

Le pH moyen de l'eau de mer est légèrement alcalin, avec une valeur moyenne de 8,2 et des variations pouvant se situer entre 7 et 8,4.

Ces variations de pH présentent une certaine similitude avec les variations de la teneur en oxygène dissous dans l'eau. Cela s'explique en considérant l'activité photosynthétique de certains organismes : une forte production d'oxygène entraîne une diminution de la teneur en dioxyde de carbone (CO₂) et donc une augmentation du pH. En revanche, l'oxydation de la matière organique réduit la teneur en oxygène de l'eau en produisant du CO₂, ce qui abaisse le pH.

Le pH de l'eau de mer diminue avec l'augmentation de la température. Par exemple, pour une eau de mer ayant une salinité de 19,5 ‰ et un pH de 8, une augmentation de température de 1°C entre 10°C et 20°C entraîne une diminution du pH de 0,0109.[9] De même, une augmentation de pression de 100 bars produit une diminution du pH d'environ 0,02 (pour un pH de départ de 8,3).

I.1.4.2. 4 Viscosité des eaux de mer :

La viscosité diminue rapidement avec l'augmentation de la température et dépend également de la salinité (voir tableau I.5). Cette caractéristique est prise en compte dans l'équation suivante :

$$\eta = \eta_0 (1 + A \sqrt{C} + BC)$$

Dans cette équation, η_0 représente la viscosité du solvant pur, C est la concentration du soluté, et A et B sont des coefficients qui dépendent du soluté. Selon la nature des ions, le coefficient B peut prendre des valeurs positives ou négatives, ce qui peut rendre le solvant plus ou moins fluide. Les ions qui ont tendance à former des complexes ioniques peuvent augmenter la viscosité du solvant.

I.1.4.2.5 densités des eaux de mer :

Le rapport de la masse volumique de l'eau de mer à celle de l'eau distillée à une température de 4 °C est généralement compris entre 1.035 et 1.036. Cela signifie que la densité de l'eau de mer est en moyenne environ 1.035 à 1.036 fois plus grande que celle de l'eau distillée à cette température.

Il est important de noter que la densité de l'eau de mer varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment la salinité, la température et la pression. La salinité est la mesure de la concentration en sel dans l'eau de mer, et elle joue un rôle majeur dans sa densité. À mesure que la salinité augmente, la densité de l'eau de mer augmente également.

I.1.4.2.6 La turbidité :

La turbidité est une mesure de la présence de particules en suspension dans l'eau, qui perturbent la pénétration de la lumière à travers celle-ci. Elle est exprimée en unités de turbidité néphélométriques (uTN). La turbidité peut être causée par des particules fines visibles, des matières en suspension colloïdales ou dissoutes, ou la présence d'organismes planctoniques. La mesure de la turbidité permet d'évaluer la clarté de l'eau et peut être influencée par des facteurs tels que la concentration, la taille et la nature des particules, ainsi que la composition chimique de l'eau. [10]

I.1.4.2.7 La masse volumique :

la masse volumique de l'eau varie avec la température et la pression, atteignant son maximum à environ 4°C. Cette propriété a des conséquences importantes dans la nature et dans les processus de traitement de l'eau. Bien que l'eau soit généralement considérée comme un fluide incompressible, elle présente une légère élasticité. La masse volumique diminue avec l'augmentation de la température et augmente avec la diminution de la température. [10]

Partie 2 : L'eau potable

II.1 Introduction sur l'eau potable :

L'eau est une ressource vitale qui recouvre plus de 70% de la surface de la Terre. Cependant, l'eau potable est rare car elle ne représente que 2% de toute l'eau disponible. Pour répondre à nos besoins, nous utilisons des forages pour puiser de l'eau douce à partir

Chapitre 1 Généralité sur l'eau de mer et le dessalement

de sources telles que les glaciers, les nappes souterraines et les sources naturelles. Les lacs et les rivières sont également des sources d'eau douce.

Ces sources d'eau douce sont renouvelables grâce aux précipitations, comme la pluie et la neige, qui les rechargent en quantité d'environ 200 milliards de mètres cubes par an. Cependant, il est important de ne pas surexploiter ces ressources, car certaines nappes phréatiques peuvent s'épuiser si elles sont trop sollicitées. L'eau douce devient donc de plus en plus rare et précieuse.

Pour rendre l'eau douce potable, elle doit subir des traitements conformes aux normes de qualité. Ces traitements visent à éliminer les impuretés, les bactéries et les concentrations excessives de minéraux afin de la rendre sûre à la consommation humaine. Dans les pays développés, des systèmes de traitement et de distribution d'eau sont en place, utilisant des techniques telles que la décantation, l'injection d'ozone, la floculation ou la filtration sur sable.

Ces traitements sont généralement effectués dans des installations spécialisées. Cependant, il est important de sensibiliser les gens au parcours que l'eau emprunte depuis sa source jusqu'aux robinets. Savoir comment traiter l'eau à petite échelle peut être précieux, notamment pour ceux qui n'ont pas accès à un réseau collectif ou qui souhaitent être autonomes.

En conclusion, l'eau potable est une ressource limitée, représentant seulement 2% de toute l'eau disponible sur Terre. Son accès nécessite des traitements adéquats. À mesure que la demande en eau potable augmente, il est essentiel de préserver cette ressource précieuse et de développer des méthodes de traitement à petite échelle pour garantir l'accès à l'eau potable pour tous. [11]

II.2 Définition de l'eau non potable :

L'eau potable est une eau sûre à boire, sans risque pour la santé. Sa qualité est réglementée par la loi, notamment par le code de la santé publique. Les critères de qualité sont définis

dans les articles R1321.1 à R1321.5 et les arrêtés d'application correspondants. Ces réglementations sont basées sur un texte européen révisé en 1998.

Ces règles évoluent en fonction des avancées scientifiques et techniques pour garantir la potabilité de l'eau. L'objectif est de fournir de l'eau potable de qualité et de protéger la santé publique.

En résumé, l'eau potable doit respecter les critères de qualité définis par la loi, conformément aux normes européennes. Ces critères sont régulièrement actualisés pour tenir compte des avancées scientifiques et techniques. [11]

II.3 Composition chimique :

Contrairement à l'eau de source qui est généralement potable au moment de son prélèvement, la plupart des eaux que nous consommons contiennent naturellement des substances minérales et organiques, dont certaines peuvent être nocives ou pathogènes. Ces substances proviennent des roches, des couches sédimentaires ainsi que des rejets liés aux activités humaines ou à la décomposition de la biomasse.

Pour être considérée comme potable, l'eau doit être exempte de toute substance jugée nocive pour la santé, notamment :

- ❖ Les germes pathogènes tels que les bactéries et les virus
- ❖ Les micro-organismes parasites
- ❖ Les substances chimiques indésirables comme les nitrates, les phosphates, les métaux lourds, les hydrocarbures et les pesticides.

En revanche, certaines substances considérées comme nécessaires pour l'organisme et naturellement présentes dans l'eau doivent être conservées dans l'eau que nous buvons, notamment :

- ❖ Les sels minéraux tels que le calcium, le magnésium, le potassium, le chlore, etc.
- ❖ Les oligo-éléments tels que le fluor, le cuivre, le fer, le silicium, le manganèse, le zinc.

En résumé, l'eau potable doit être dépourvue de substances nocives pour la santé, telles que les germes pathogènes et les substances chimiques indésirables, tout en conservant les sels minéraux et les oligo-éléments nécessaires à notre organisme. [12]

II.3.1 Les matières minérales :

L'eau naturelle contient une variété d'ions dissous, parmi lesquels figurent le calcium (Ca^{++}), le magnésium (Mg^{++}), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), les carbonates (CO_3^{--}), les bicarbonates (HCO_3^-), les sulfates (SO_4^{--}), les chlorures (Cl^-), et les nitrates (NO_3^-). Ces ions proviennent principalement du lessivage des sols par les eaux de pluie et leur concentration dépend des types de roches présentes dans le bassin versant. Les concentrations peuvent varier de quelques milligrammes à plusieurs grammes par litre pour les eaux les plus salées.

En plus de ces ions, l'eau contient également des éléments nutritifs ou nutriments tels que l'azote (sous forme d'ammoniac, de nitrites et de nitrates), le phosphore (sous forme de phosphates) et la silice, ainsi que des traces d'autres éléments tels que l'arsenic, le cuivre, le cadmium, le fer, le zinc, le cobalt, le plomb, etc. Ces éléments peuvent provenir des roches, mais aussi des activités industrielles et domestiques. De plus, l'eau peut contenir des particules minérales en suspension telles que des argiles et des limons .[13]

II.3.2 Les matières organiques :

Les matières organiques peuvent être présentes dans l'eau sous forme dissoute, telles que les glucides, les acides humiques, les pigments et des composés artificiels tels que les hydrocarbures, les solvants chlorés et les pesticides. Elles peuvent également se trouver en suspension, notamment des déchets végétaux et du plancton. Ces matières organiques proviennent principalement de la décomposition de la matière organique présente dans l'environnement ou dans les sols lessivés par les pluies, résultant de la décomposition des plantes et des animaux. Elles peuvent également être issues d'activités humaines.

La concentration de ces matières organiques est généralement minimale dans les eaux profondes, mais peut atteindre quelques dizaines de milligrammes par litre dans les eaux de surface. [13]

II.4. Les critères de potabilité de l'eau :

Pour garantir la sécurité de la consommation d'eau, des critères de potabilité stricts sont établis par le Ministère de la Santé et le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique. Ces normes sont définies en fonction de la législation en vigueur et diffèrent selon qu'il s'agit d'eau destinée à la consommation humaine ou à un usage industriel.

Actuellement, il existe 63 critères de potabilité de l'eau, regroupés en 5 grands paramètres :

1. Les paramètres microbiologiques : Ils évaluent la présence de micro-organismes pathogènes tels que les bactéries, les virus et les parasites. Ces critères visent à garantir l'absence de contaminants biologiques pouvant causer des maladies.
2. Les paramètres physico-chimiques : Ils mesurent divers aspects physiques et chimiques de l'eau, tels que la turbidité (clarté de l'eau), le pH, la conductivité électrique, la dureté, la température, ainsi que la présence de substances indésirables telles que les nitrates, les métaux lourds, les pesticides et les hydrocarbures.
3. Les paramètres organoleptiques : Ils évaluent les caractéristiques sensorielles de l'eau, notamment son goût, son odeur et sa couleur. L'eau potable doit être agréable à boire et ne pas présenter de signes de contamination ou de pollution.
4. Les paramètres radioactifs : Ils mesurent la radioactivité de l'eau et s'assurent qu'elle ne présente pas de niveaux dangereux pour la santé humaine.
5. Les paramètres de traitement : Ils concernent les résidus de produits chimiques utilisés lors du traitement de l'eau, tels que le chlore. Ces critères veillent à ce que les produits chimiques utilisés ne dépassent pas les limites fixées et n'entraînent pas de risques pour la santé. [14]

En respectant ces critères de potabilité, on s'assure que l'eau consommée est sûre et ne présente pas de risques pour la santé humaine.

Partie 3 : dessalement de l'eau de mer

III.1 Introduction :

La désalinisation de l'eau de mer est un processus essentiel pour répondre aux besoins croissants en eau douce dans le monde. Avec la pénurie d'eau douce de plus en plus prononcée, en particulier dans les régions arides ou en développement, la désalinisation de l'eau de mer offre une solution prometteuse pour obtenir une source d'eau potable durable.

La désalinisation de l'eau de mer consiste à éliminer le sel et les impuretés présents dans l'eau de mer pour la rendre propre à la consommation humaine et à d'autres utilisations. Il existe différentes technologies et méthodes de désalinisation, notamment l'osmose inverse, l'évaporation à plusieurs étages et la distillation à effet multiple. Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients en termes d'efficacité, de coût et d'impact sur l'environnement.

III.2 Définition du dessalement :

Le dessalement de l'eau, également connu sous le nom de désalage ou désalinisation, est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce à partir d'une source d'eau saumâtre ou salée, telle que l'eau de mer. Contrairement à ce que son nom suggère, il ne s'agit pas seulement de retirer le sel de l'eau, mais plutôt d'extraire de l'eau douce à partir de cette source. Le dessalement peut également être appelé désalinisation ou dessalage. Il consiste à séparer l'eau des sels présents dans une source d'eau brute, qu'il s'agisse de l'eau de mer ou d'une eau saumâtre provenant de sources continentales. [15] [16]

III.3 Les principes de dessalement :

Les principales technologies utilisées pour le dessalement de l'eau sont regroupées en deux catégories, en fonction du principe appliqué :

- 1) Les procédés thermiques qui impliquent un changement de phase, tels que la congélation et la distillation.
- 2) Les procédés utilisant des membranes, tels que l'osmose inverse et l'électrodialyse.

Parmi ces procédés, la distillation et l'osmose inverse sont les technologies les plus largement utilisées et éprouvées pour le dessalement de l'eau de mer. En effet, elles sont les plus couramment commercialisées sur le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un développement significatif dans ce domaine en raison de problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et/ou aux investissements importants qu'elles requièrent.

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comprennent généralement quatre étapes :

1. Prise d'eau de mer à l'aide d'une pompe et d'une filtration grossière.
2. Pré-traitement comprenant une filtration plus fine, l'ajout de composés biocides et de produits anti-tartre.
3. Processus de dessalement lui-même.
4. Post-traitement éventuel comprenant la reminéralisation de l'eau produite.

Après ces quatre étapes, l'eau de mer devient potable ou peut être utilisée à des fins industrielles, à condition de contenir moins de 0,5 g de sels par litre. [17]

III.4 Techniques de dessalement :

III.4.1 L'osmose inverse :

L'osmose inverse est un procédé qui permet de séparer l'eau des sels dissous en utilisant des membranes semi-perméables sous l'effet de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et ne nécessite pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les

Chapitre 1 Généralité sur l'eau de mer et le dessalement

molécules d'eau tout en empêchant le passage des particules, des sels dissous et des molécules organiques d'une taille de 10⁻⁷ nm.

L'énergie requise pour l'osmose inverse provient principalement de l'électricité consommée par les pompes haute pression.

La teneur en sels de l'eau obtenue par osmose inverse est d'environ 0,5 g/L. [17]

Principe de l'osmose inverse :

L'osmose est le transfert d'un solvant (généralement de l'eau) à travers une membrane semi-perméable en réponse à un gradient de concentration.

Dans un système composé de deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes (voir figure 1), l'osmose se traduit par un flux d'eau de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on applique une pression sur la solution concentrée pour empêcher ce flux d'eau, la quantité d'eau transférée par osmose diminuera. Il arrivera un point où la pression appliquée équilibrera le flux d'eau, annulant ainsi le transfert. Pour simplifier, si nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique.

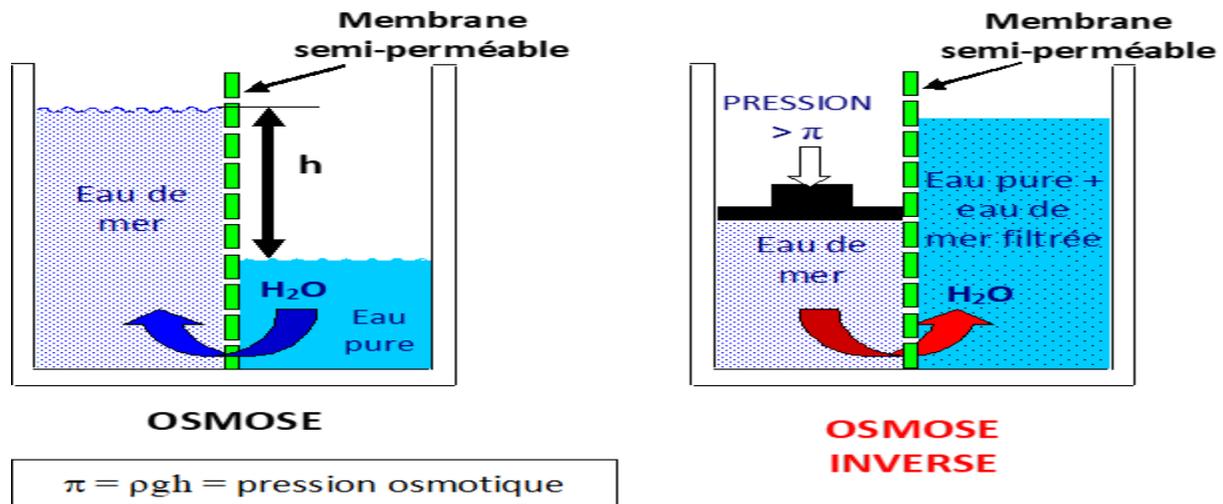


Figure 2 osmoses inverses

Chapitre 1 Généralité sur l'eau de mer et le dessalement

Lorsque la pression est augmentée au-delà de la pression osmotique, cela entraîne un flux d'eau dirigé dans le sens inverse du flux osmotique (voir figure 1), c'est ce qu'on appelle l'osmose inverse.

Pour les solutions suffisamment diluées, la pression osmotique, notée π , peut être calculée à partir de la loi de Van't Hoff :

$$\pi = i \times C \times R \times T, \text{ où :}$$

i : est le nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte,

C : est la concentration en sels en mol/m^3

R : est la constante des gaz parfaits ($R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$),

T : est la température absolue de la solution en kelvins.

Exemple d'application :

La pression osmotique d'une solution d'eau à 20°C contenant 35 g de chlorure de sodium par litre est : $\pi = 2 \times (35 \times 10^{-3} / 58,5) \times 8,314 \times 293 = 29,14 \times 10^5 \text{ Pa} = 29,14 \text{ bar}$.

Le débit spécifique J_1 (débit massique par mètre carré de membrane) de l'eau osmosée& produite est proportionnel à la différence entre la pression appliquée P et la pression osmotique π de la solution concentrée.

$J_1 = A \times (P - \pi)$, où A est le coefficient de perméabilité vis-à-vis de l'eau pure.

Le flux spécifique de sel traversant la membrane est également proportionnel à la différence de concentration de part et d'autre de la membrane.

$J_2 = B \times \pi C$, où B est le coefficient de perméabilité vis-à-vis du sel. [17]

III.4.2 Les procédés membranaires :

Au lieu de recourir à l'évaporation pour extraire l'eau douce de l'eau de mer, il est possible d'utiliser des membranes sélectives pour séparer l'eau des sels dissous. Deux procédés

utilisant de telles membranes sont actuellement disponibles sur le marché, à savoir l'électrodialyse et l'osmose inverse. Une membrane est une interface physique mince qui contrôle le transfert de substances chimiques entre deux milieux qu'elle sépare. Elle peut être homogène au niveau moléculaire, avec une composition et une structure uniformes, ou elle peut être chimiquement et physiquement hétérogène, contenant des pores de taille finie ou des couches superposées. Les membranes se présentent sous différentes formes telles que des films plats (feuilles), des spirales, des tubes ou des fibres creuses, et elles sont intégrées dans des modules regroupant un ou plusieurs éléments de base [18]

❖ L'électrodialyse à membranes sélectives

Le procédé repose sur l'utilisation de la mobilité des ions présents dans un électrolyte soumis à un champ électrique. Les anions se déplacent vers l'anode, tandis que les cations se déplacent vers la cathode. Le transfert des charges électriques se fait par le biais des ions qui se déchargent sur les électrodes. Le processus de dessalement est réalisé en utilisant deux types de membranes, les membranes anioniques perméables aux anions et les membranes cationiques perméables aux cations, agissant comme des "clapets ioniques". En disposant ces membranes de manière alternée, on crée des compartiments de dessalement où la concentration ionique diminue, et des compartiments de concentration qui recueillent les sels extraits (Figure I-4). Les compartiments situés aux extrémités permettent les réactions secondaires liées à l'électrolyse. Pour chaque faraday (96 490 coulombs) qui traverse le dispositif, une quantité de sel équivalente à $N/2$ équivalents-grammes est séparée, N étant le nombre total de compartiments autres que ceux contenant les électrodes [19].

Inconvénients et avantages liés au dessalement

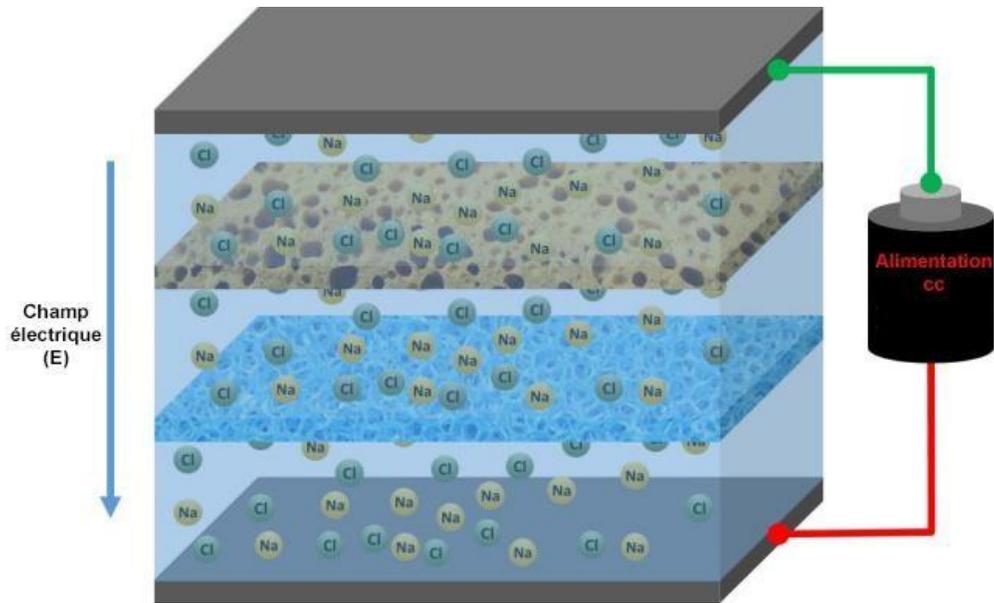


Figure 3 substance L'électrodialyse de choc pour dessaler l'eau de mer

III.4.3 Les procédés de distillation :

Il existe plusieurs principes physiques utilisés pour la désalinisation de l'eau, tels que la distillation qui se base sur le changement de phase de l'eau en vapeur, ainsi que la séparation entre le sel et l'eau en utilisant des membranes semi-perméables. Ces membranes sont actionnées soit par la pression (osmose inverse), soit par un champ électrique (électrodialyse) [20]. Actuellement, les deux technologies largement utilisées à l'échelle industrielle pour la désalinisation sont la distillation et l'osmose inverse. [21].

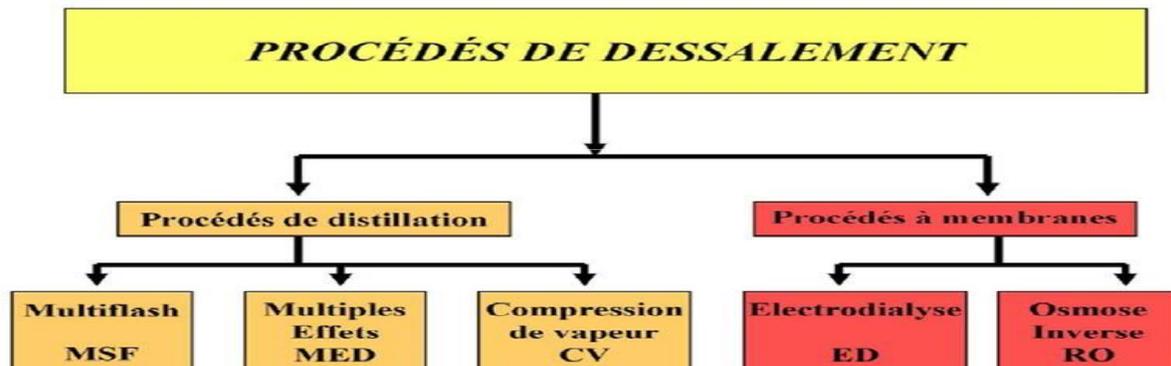


Figure 4 principaux procédés industriels de dessalement

1 Distillation à simple effet :

Ce procédé est largement utilisé depuis longtemps, notamment sur les navires, où il est possible de récupérer une quantité significative de chaleur provenant des moteurs diesel. Son principe est simple : il reproduit le cycle naturel de l'eau. Dans un système clos, l'eau de mer est chauffée à ébullition à l'aide d'un serpentin de chauffage (**Figure I-5**). La vapeur produite est ensuite condensée au contact d'un deuxième serpentin alimenté en eau de mer froide. Un éjecteur ou une pompe est utilisé pour éliminer les gaz non condensables. Un groupe électropompe est utilisé pour collecter le distillat (l'eau condensée), tandis qu'un deuxième groupe collecte l'eau de mer concentrée, également appelée saumure. [22]

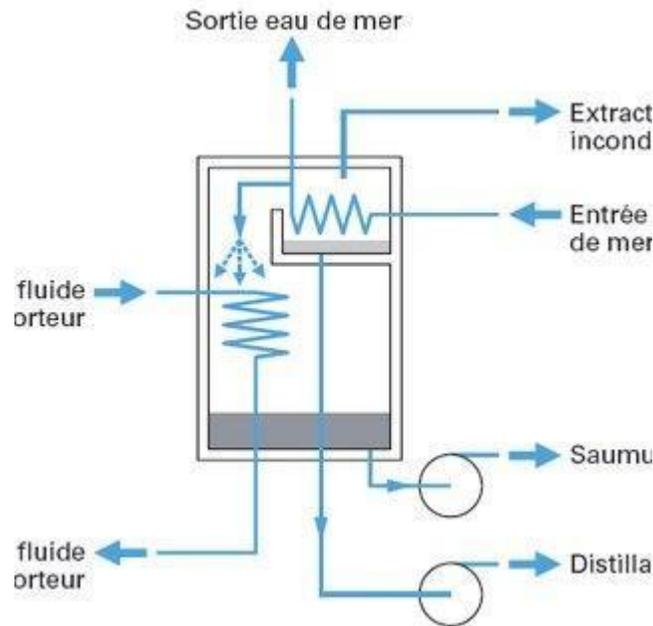


Figure 5 Distillation à simple effet

2 Distillation à effet multiple :

Une installation de distillation à effet multiple est composée de plusieurs cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple (Figure I-6). Dans cette configuration, le fluide de réchauffage fait bouillir l'eau de mer dans la première cellule, qui est également la cellule où la température et la pression sont les plus élevées. La vapeur produite par l'ébullition de l'eau de mer est transférée à la cellule voisine, où le condenseur maintient une pression

Chapitre 1 Généralité sur l'eau de mer et le dessalement

légèrement plus basse. Comme la température d'ébullition diminue avec la pression, une partie de l'eau de mer présente dans la deuxième cellule est vaporisée, constituant ainsi le deuxième effet. Ce processus peut être répété plusieurs fois, avec la limite inférieure étant la température de l'eau de mer froide (Figure I-6). [22]

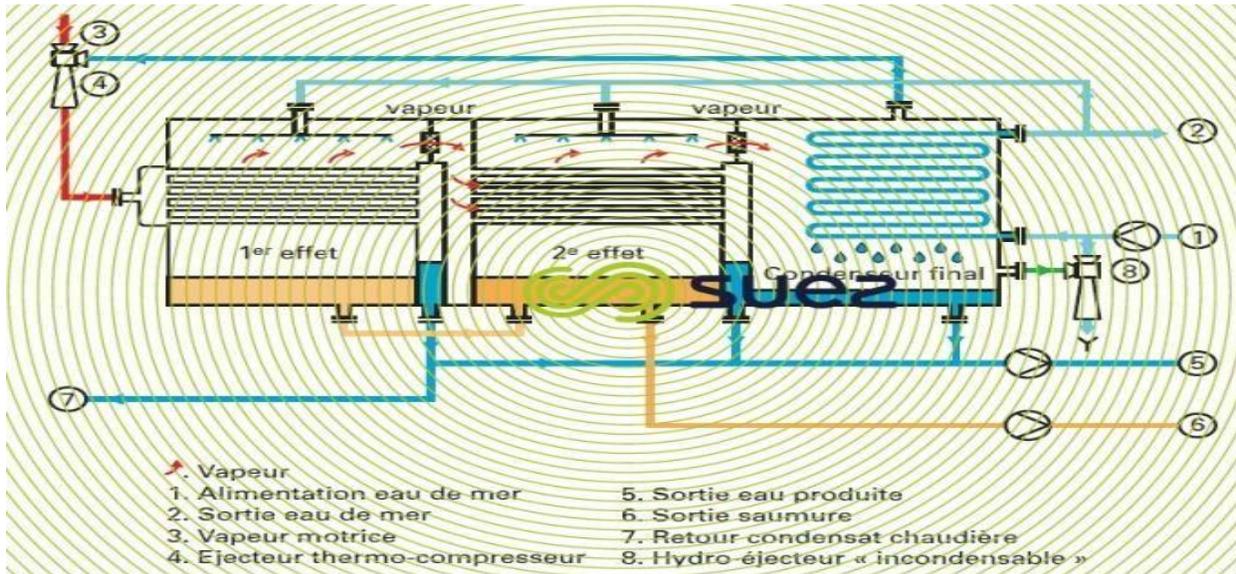


Figure 6 Distillation à effet multiple

III.4.4 Procédé de congélation :

Le procédé de congélation est une autre méthode de dessalement qui repose sur la différence de points de congélation entre l'eau douce et l'eau salée. Ce procédé est particulièrement intéressant dans les régions où la température de l'eau de mer est souvent inférieure à 0°C. Lorsque la température est suffisamment basse, des bassins sont remplis avec une profondeur d'environ 1 à 1,5 cm. Les cristaux de glace sont ensuite séparés de la saumure, lavés pour éliminer le sel, puis fondus, ce qui permet d'obtenir de l'eau douce [23].

III.5 Inconvénients liés au dessalement :

Les problèmes techniques rencontrés dans les procédés de dessalement sont principalement liés à l'utilisation de solutions salines concentrées ou à la production d'eaux agressives. Ces problèmes comprennent la corrosion, l'entartrage et le colmatage.

❖ La corrosion :

La corrosion, influencée par divers facteurs tels que la concentration de chlorures, la présence d'oxygène dissous et de H₂S, ainsi que la conductivité élevée de l'eau de mer, impacte la durée de vie des installations de dessalement. Pour prévenir la corrosion, il est recommandé d'utiliser des matériaux résistants tels que des aciers austénitiques, ferritiques ou du titane dans les procédés d'osmose inverse à haute pression et les évaporateurs traitant de l'eau de mer chaude. Lors de la distillation ou de l'osmose inverse, une rééquilibration des eaux agressives est nécessaire avant leur utilisation, pouvant être réalisée par neutralisation avec de la chaux ou de la soude, et parfois une reminéralisation est requise en ajoutant de la chaux combinée avec du gaz carbonique pour obtenir l'équilibre approprié. [24]

❖ L'entartrage :

Lors du processus de dessalement, deux problèmes majeurs peuvent survenir : la formation de dépôts minéraux et la corrosion. La formation de dépôts se produit lorsque des sels minéraux s'accumulent sur les surfaces d'échange thermiques et membranaires, entraînant une concentration ionique élevée. Pour éviter la formation de dépôts, différentes solutions peuvent être envisagées, telles que l'apport supplémentaire de chaleur dans le cas des procédés de distillation ou l'application d'une pression plus élevée dans les procédés membranaires. Un prétraitement de l'eau peut également être réalisé, impliquant l'ajout d'acide pour éliminer le gaz carbonique, l'ajout de chaux et de germes de cristallisation pour favoriser la précipitation du carbonate de calcium, ou l'utilisation d'inhibiteurs de dépôts tels que les polyphosphates ou les polymères polycarboxyliques. Cependant, toutes ces solutions augmentent le coût global du processus de dessalement. [25]

❖ Le colmatage :

Le colmatage est un autre problème rencontré lors du dessalement. Les eaux brutes naturelles peuvent contenir des substances organiques et des microorganismes. En osmose inverse, ces organismes peuvent s'accumuler sur les membranes, formant un biofilm qui peut obstruer les membranes et entraîner une diminution de la capacité de production. Cela se traduit par des coûts supplémentaires pour le processus de dessalement. Pour éviter le

colmatage, un prétraitement approprié est nécessaire. Dans certains cas, une étape de coagulation-floculation suivie d'une filtration est indispensable. Cela permet de réduire la présence d'organismes et de substances indésirables, préservant ainsi la performance des membranes et la productivité de l'installation. [25]

III.6 Avantages liés au dessalement : [26]

I. Systèmes modulaires :

Les systèmes de dessalement par osmose inverse sont conçus de manière modulaire, ce qui les rend compacts, faciles à déplacer et à installer. Cela réduit les coûts en capital et les rend adaptés aux applications municipales et commerciales où l'espace est limité mais la demande en eau potable est élevée.

II. Expansion des sources d'eau potable :

Le dessalement de l'eau de mer permet d'exploiter une nouvelle source d'eau potable. Les océans représentent une ressource abondante, constituant plus de 95% de toute l'eau sur Terre. En exploitant cette ressource, on peut augmenter de manière significative l'approvisionnement en eau potable, ce qui est particulièrement important dans les régions où les autres sources d'eau sont limitées.

III. Rendement élevé :

Le processus d'osmose inverse offre un rendement supérieur par rapport aux autres méthodes de dessalement, notamment les procédés thermiques. L'osmose inverse élimine efficacement les impuretés et les particules indésirables de l'eau, produisant ainsi une eau plus propre. Comparé aux procédés thermiques, l'osmose inverse nécessite moins d'eau de mer pour produire la même quantité d'eau potable.

IV. Eau pure :

L'eau produite par osmose inverse est extrêmement pure. Cependant, elle peut manquer de certains minéraux essentiels pour la santé humaine et avoir un goût plat. Pour remédier à

Chapitre 1 Généralité sur l'eau de mer et le dessalement

cela, un processus de reminéralisation est souvent utilisé pour réintroduire les minéraux nécessaires et ajuster le pH de l'eau, assurant ainsi sa qualité et son goût.

En résumé, le dessalement offre des avantages tels que des systèmes modulaires, une expansion des sources d'eau potable, un rendement élevé et la production d'eau pure. Ces avantages en font une solution attrayante pour répondre aux besoins croissants en eau potable dans de nombreuses régions du monde.

Chapitre 2

Pollution de l'eau de mer

Partie 1 : la pollution

Une introduction à la pollution de l'environnement :

La pollution se réfère à la détérioration ou à la dégradation d'un écosystème ou de la biosphère causée par l'introduction, généralement d'origine humaine, de substances ou d'agents (physiques, chimiques ou biologiques), ou de radiations qui perturbent le fonctionnement normal de cet écosystème. La pollution a des effets significatifs sur la santé et la biosphère. Cela se manifeste notamment par l'exposition aux polluants et le changement climatique qui altère le climat de la Terre et son écosystème. Ces modifications entraînent l'émergence de maladies auparavant inconnues dans certaines régions géographiques, des migrations d'espèces et même leur extinction si elles ne peuvent pas s'adapter à leur nouvel environnement physique et biologique. [27]

1. Pollution de l'eau de mer :

1.1 Définition :

La Commission Océanographique Internationale de l'UNESCO a défini la pollution marine comme suit :

"La pollution marine est l'introduction, directe ou indirecte, par l'activité humaine, de substances ou d'énergie dans l'environnement marin, pouvant entraîner des effets néfastes tels que des dommages aux ressources biologiques, des risques pour la santé humaine, des perturbations des activités maritimes, y compris la pêche, la détérioration de la qualité de l'eau de mer pour son utilisation et la réduction des possibilités de loisirs."

Cette définition souligne l'importance de l'origine humaine de la pollution marine. Par exemple, l'accumulation de branches dans un port après une tempête est considérée comme un phénomène naturel, tandis que l'accumulation de débris plastiques après la même tempête est considérée comme une forme de pollution. Cependant, il peut parfois être difficile d'établir une frontière nette entre ces deux aspects. [27]

1.2 Sources de pollutions :

La majeure partie des polluants provient des activités terrestres, et à long terme, tous les polluants rejetés dans l'environnement finissent par atteindre le milieu marin. Les sources de pollution sont nombreuses :

- ❖ Les rejets domestiques tels que les eaux usées, qui sont déversées directement près des côtes ou en pleine mer par le biais de canalisations spécifiques.
- ❖ Les zones portuaires et les centres urbains contribuent à la pollution marine, car les hydrocarbures et les métaux lourds s'écoulent lors des précipitations ou du nettoyage des routes.
- ❖ Les fleuves transportent les pollutions continentales, notamment les rejets industriels et les pesticides agricoles.
- ❖ Les centrales thermiques, les raffineries et les grandes industries déversent des eaux chaudes et des produits chimiques dans la mer.
- ❖ déversent des eaux chaudes et des produits chimiques dans la mer.
- ❖ Les navires contribuent également à la pollution marine, que ce soit par le déballastage des eaux de ballast ou par l'utilisation de peintures anti-salissures.
- ❖ Les naufrages peuvent également provoquer des pollutions marines importantes.
- ❖ La pollution atmosphérique retombe dans la mer par les précipitations.

Enfin, la pollution directe d'origine humaine comprend des déchets tels que les mégots de cigarette, les produits solaires et les déchets alimentaires, qui sont souvent liés aux activités de loisirs en mer.

Toutes ces sources contribuent à la pollution marine et ont des conséquences néfastes sur l'écosystème marin. [27]

1.3 Types de pollution:

1.3. a Pollutions chimiques :

Il existe différentes formes de pollution marine causées par le déversement de substances chimiques, notamment :

1.3. b Pollutions biologiques :

La pollution marine peut être causée par des germes provenant des égouts, ainsi que par l'introduction d'espèces marines étrangères. Les germes peuvent se propager dans le milieu marin et avoir des effets néfastes sur les organismes marins et la santé humaine. Par exemple, la prolifération de l'espèce marine "Caulerpa tarificai" peut perturber l'écosystème en supplantant les espèces indigènes. De même, l'introduction de la jacinthe d'eau dans les cours d'eau et les lacs d'eau douce peut éliminer les espèces indigènes et avoir un impact profond sur les écosystèmes.

Ces introductions d'espèces et la prolifération de germes peuvent entraîner des perturbations importantes des écosystèmes marins et d'eau douce, y compris la disparition d'espèces indigènes. Il est donc essentiel de prendre des mesures de prévention et de contrôle pour préserver la santé et l'équilibre de ces écosystèmes.

1.3.c Pollutions physiques :

Physique par divers facteurs. Il peut s'agir d'un rejet d'eau douce qui fera baisser la salinité d'un lieu, comme la centrale hydroélectrique de Saint-Chamas, au nord de l'étang de Berre, d'un rejet d'eau réchauffée ou refroidie (par une centrale électrique ou une usine de regazéification de gaz liquide), d'un rejet liquide ou solide de substances modifiant la turbidité du milieu (boue, limon...), d'une source de radioactivité... La plupart du temps, un rejet n'est jamais une source unique et les différents types de pollution sont mélangés et agissent les uns sur les autres (effet de synergie). Ainsi, un égout rejette des déchets organiques, des détergents dont certains s'accompagnent de métaux lourds (pollution chimique), des micro-organismes (pollution biologique), le tout dans de l'eau douce (pollution physique). [27]

Partie 2: LES COLORANTS

1- Introduction

Depuis longtemps, l'homme a utilisé les colorants pour ses vêtements, pour sa nourriture et pour l'ornement de sa demeure. Ainsi dès l'antiquité, il a su extraire les matières colorantes à partir de végétaux comme l'indigo et d'animaux comme le carmin extrait de la cochenille.

Ceci a permis le développement du commerce entre les différentes peuplades de l'époque.

L'utilisation de ces colorants naturels s'est prolongée jusqu'à la première moitié du XIXème

2. Définition des colorants:

Un colorant est une substance chimique qui a la capacité de se fixer sur une surface. La coloration, plus ou moins intense, des différentes substances est liée à leur composition chimique. À l'origine, les premiers colorants étaient d'origine végétale (comme la garance, l'indigo, la gaude et le campêche) ou même animale (comme la cochenille). De nos jours, presque tous les colorants utilisés sont dérivés des hydrocarbures présents dans le goudron de houille. Les colorants qui possèdent un caractère acide ou basique prononcé ont une affinité particulièrement élevée pour les fibres. Ces caractéristiques spécifiques des colorants organiques augmentent leur persistance dans l'environnement et les rendent peu susceptibles de se dégrader naturellement [28].

3. Classification des colorants :

La classification des colorants les plus couramment utilisés est effectuée selon le "Color Index", qui répertorie la majorité des colorants disponibles sur le marché. Il existe deux systèmes de classification complémentaires: l'un utilise des appellations courantes, basées sur le mode d'utilisation et d'application du colorant, tandis que l'autre se base sur la structure chimique (numéro du Color Index).

➤ Classification technologique :

La classification technologique fournit aux consommateurs des informations sur les domaines d'utilisation des colorants ainsi que sur leurs propriétés telles que la solubilité, l'affinité pour certains types de fibres ou de matériaux, et le mode de fixation.

Les principales classes d'application des colorants, ainsi que leurs caractéristiques et leurs utilisations, sont répertoriées dans le tableau [29].

Chapitre 2 la pollution de l'eau de mer

Classe de colorants	Caractéristiques	Utilisations
Colorants acides métallifères ou non	/	Soie, laine, poils (mohair, cachemire...)
Colorants à base de composants azoïques	Fabrication d'un colorant solide avec fixation dans la fibre solide	Cellulosiques
Colorants basiques	/	Acryliques
Colorants développeurs	/	Coloration capillaire
Colorants disperses	Très peu solubles dans l'eau	Polyester Acétate, triacétate de cellulose Polyamides Acryliques PVC Jamais sur fibres naturelles
Agents fluorescents	Colorants blancs avec pouvoir fluorescent qui donnent un aspect plus blanc	Toutes fibres
Colorants alimentaires	/	Coloration des aliments
Colorants formés in situ	/	/
Mordant (au chrome)	Nécessité d'un traitement associé avec un sel métallique pour	Laine Polyamides

Tableau 1 : Classification technologique des colorants

En résumé, la classification chimique est essentielle pour les fabricants de matières colorantes, tandis que la classification par domaines d'application est plus pertinente pour les teinturiers dans leur recherche de colorants appropriés.

➤ **Classification chimique :**

Les colorants dont la formule chimique est révélée sont également classés selon l'index de couleur (numéro CI). À partir de cette classification, les colorants sont répartis en 10 classes :

- Colorants nitro (CI 10300-10999) : Certains de ces colorants ont la diphénylamine comme structure de base
- Dérivés du triphénylméthane (CI 42000-44999) : Ils sont peu utilisés.
- Dérivés de xanthène (CI 46000-46999) : Cela inclut des colorants tels que la fluorescéine et l'éosine, utilisés à des fins médicales.
- Dérivés de l'acridine (CI 46000-46999) : Ces composés étaient autrefois utilisés comme antiseptiques.
- Dérivés de la quinoléine : Principalement utilisés dans les cosmétiques, les médicaments et l'alimentation.
- Azines (CI 50000-50999) .
- Colorants anthraquinoniques (CI 58000-72999) : Il s'agit de la deuxième classe de colorants textiles la plus utilisée après les colorants azoïques. Ils représentent environ 20 à 25% du marché des colorants textiles.
- Colorants indigoïdes (CI 73000-73999) : Utilisés pour la teinture des textiles, ils sont également appelés "vat pigments" ou pigments de cuve.
- Phtalocyanines (CI 74000-74999) : On les retrouve dans les couleurs bleu turquoise et vert vif.
- Bases d'oxydation : Il s'agit de composés aromatiques utilisés comme intermédiaires dans les colorations permanentes des cheveux. Ils représentent les sensibilisants les plus puissants des colorations capillaires chez les coiffeurs. [30]

4. Classification tinctoriale :

Alors que la classification chimique est utile pour les fabricants de matières colorantes, les teinturiers préfèrent une classification basée sur les domaines d'application. Cela leur permet de connaître la solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité avec différentes fibres et la nature de sa fixation. La force de cette fixation peut varier

en fonction du type de liaison entre le colorant et le substrat, qu'il s'agisse d'une liaison ionique, hydrogène, de van der Waals ou covalente. Différentes catégories tinctoriales sont définies en fonction de l'autochrome utilisée [31-32].

4.1 Colorants solubles dans l'eau :

- ✧ Colorants acides Ou anioniques.
- ✧ Colorants basiques Ou cationiques.
- ✧ Colorants à complexe métallique.
- ✧ Colorants à mordant.
- ✧ Colorants de cuve.
- ✧ Colorants directs. [33]

4.2 Colorants insolubles dans l'eau :

Une catégorie de colorants est désignée sous le terme de "colorants Plast solubles". Ces colorants ont été développés en réponse aux difficultés rencontrées lors de la teinture des acétates de cellulose. En plus des colorants Plast solubles, il existe plusieurs autres classes de colorants insolubles dans l'eau, tels que les colorants de cuve, les colorants au soufre et les colorants d'oxydation. [34]

5. Nature des colorants :

Les colorants sont des substances chimiques colorées, soit d'origine naturelle, soit synthétiques, qui ont la capacité de teindre de manière durable le support sur lequel ils sont appliqués dans des conditions spécifiques. Dans le contexte industriel moderne, un colorant est généralement défini comme un produit contenant du colorant organique pur accompagné de divers additifs et agents de mélange pour faciliter son utilisation [35].

On distingue deux types de colorants :

A. Colorant naturel :

Les colorants naturels sont moins nombreux que les colorants synthétiques, avec seulement une dizaine de colorants naturels identifiés, tandis que les colorants synthétiques se comptent par milliers. Les colorants naturels sont extraits de diverses sources telles que les plantes, les arbres, les lichens, les insectes et les mollusques. Parmi les colorants naturels, les colorants jaunes sont les plus abondants. On distingue généralement deux catégories principales de colorants naturels : les colorants à mordant et les colorants de cuve. Les colorants à mordant ont une faible solubilité dans l'eau, contrairement aux colorants de cuve.

B. Colorants synthétiques :

Les colorants synthétiques ont progressivement pris le dessus sur les colorants naturels. La découverte fortuite de la Mauvéine par le chimiste britannique W.H. Perkin en 1856 marque le début des colorants de synthèse [36]. Ce colorant a été obtenu à partir de l'aniline, dérivée du goudron de houille, grâce à l'action de l'acide sulfurique en présence de bichromate de potassium. La Mauvéine est connue pour sa capacité à teindre la soie en violet [37]. Depuis cette découverte, de nombreux autres colorants synthétiques ont été développés, offrant une large gamme de couleurs et de propriétés de teinture.

6. Utilisation et application des colorants :

Les colorants trouvent de larges domaines d'application dans différents secteurs :

- Dans l'industrie textile, notamment pour la coloration des vêtements, des articles de décoration, des textiles utilisés dans la construction, le transport et le domaine médical.
- Dans l'industrie des matières plastiques, où ils sont utilisés sous forme de pigments pour donner de la couleur aux plastiques.
- Dans l'industrie du bâtiment, plus précisément dans la fabrication de peintures, où les colorants sont utilisés pour teinter les peintures.

- Dans l'industrie pharmaceutique, où les colorants sont utilisés pour donner une couleur distinctive aux médicaments.
- Dans l'industrie des cosmétiques, pour la coloration des produits de maquillage, des produits capillaires, etc.
- Dans l'industrie agroalimentaire, où les colorants alimentaires sont utilisés pour donner une couleur attrayante aux aliments.
- Dans diverses industries, notamment dans le domaine des carburants et des huiles, où les colorants sont utilisés pour diverses applications spécifiques.
- Dans l'industrie de l'imprimerie, où les colorants sont utilisés dans les encres et les papiers pour l'impression. [38]

7. toxicité des colorants :

7.1 Toxicité par les rejets industriels :

Les industries textiles rejettent des eaux usées chargées en colorants dans les rivières, ce qui peut avoir des conséquences néfastes sur les espèces animales, végétales et les microorganismes présents dans ces eaux. Cette nuisance peut être liée à la diminution de la concentration d'oxygène dissous dans ces milieux. De plus, les colorants ont une biodégradabilité très faible, voire inexistante, en raison de leur poids moléculaire élevé et de leurs structures complexes, ce qui les rend potentiellement dangereux. Ces caractéristiques leur permettent de persister dans l'environnement pendant de longues périodes.

le bleu de méthylène est nocif pour les algues et les petits crustacés à partir des concentrations respectives de 0,1 mg/l et 2 mg/l [39,40].

7.2 toxicité par les colorants alimentaires :

L'utilisation de plusieurs colorants dans la fabrication des aliments a entraîné des problèmes de santé chez les humains en raison de la toxicité de ces composés. Le tableau I.4 présente quelques exemples de ces colorants et de leur toxicité .[41]

Colorant	Effets	Auteur
la tartrazine	- Asthme et éruptions cutanées (urticaires) - Allergie digestive	-LOCK (1959) JUHLIN (1972) GATELAIN(1977)
L'erythrosine	- Allergie	- CLEMENT
Le Jaune AB et le Jaune OB	- Irritation du tube digestif. - Diminution de la croissance. - Augmentation du poids des reins et du foie	/
Le bleu de méthylène	- Anémie	/
- Les dérivés du triphénylméthane	- Eczéma et troubles gastriques (diarrhées)	/
- Les colorants azoïques - Les dérivées du triphénylméthane -Les dérivées du diphenylamine - Les dérivées de la phtaléine	- Effets Cancérigènes	/

Tableau 2 : Exemples d'effets toxiques de quelques colorants

8. Impact sur l'environnement :

Les colorants présents dans l'eau contribuent aux problèmes de pollution en raison de la présence d'eaux usées contenant des résidus de colorants. Ces résidus peuvent entraîner une eutrophisation de l'eau, perturbant ainsi la vie aquatique. De plus, il existe un danger potentiel de bioaccumulation, où les colorants peuvent s'accumuler dans les organismes vivants et se transmettre à travers la chaîne alimentaire, ce qui peut affecter les êtres humains. [42]

9. Méthodes d'élimination des colorants :

Il existe plusieurs méthodes qui peuvent être utilisées pour éliminer les contaminants colorés de l'eau. Certaines de ces méthodes comprennent :

- Sédimentation et filtration : Le processus mécanique de sédimentation et de filtration peut être utilisé pour éliminer les contaminants colorés de l'eau.
- Oxydation et coagulation : Des oxydants tels que le chlore ou le dioxyde de chlore peuvent être utilisés pour décomposer les contaminants colorés en composés inoffensifs.
- Charbon activé : Le charbon actif peut être utilisé pour absorber les contaminants colorés de l'eau.
- Lumière ultraviolette : La lumière ultraviolette peut être utilisée pour stériliser l'eau et éliminer les contaminants de couleur.
- Technologie membranaire : La technologie membranaire peut être utilisée pour éliminer les contaminants colorés de l'eau.
- Distillation et évaporation : Les processus de distillation et d'évaporation peuvent être utilisés pour éliminer les contaminants colorés de l'eau. [43]

Dans notre étude on s'intéresse par un procédé très important qui est le phénomène d'adsorption

10. Bleu de méthylène :

Le bleu de méthylène, également connu sous le nom de chlorure de méthylthioninium, est un composé organique solide cristallisé. Il est soluble dans l'eau et dans une moindre mesure dans l'éthanol. À l'état pur, il se présente sous forme d'une poudre vert foncé. Sur le marché, il est également disponible sous forme d'un sel double avec le chlorure de zinc, ce qui lui confère une couleur brune.

Le bleu de méthylène est un agent d'oxydoréduction, ce qui signifie que sa couleur dépend de son état rédox. Il est incolore à l'état réduit, mais devient bleu lorsqu'il est oxydé. [44]



Figure 1 : bleu de méthylène

Identification de la substance	Bleu de méthylène (C.I. 52015)
Numéro d'article	A514
Formule moléculaire	$C_{16}H_{18}ClN_3S$
Masse molaire	319.9 g/mol
Pictogrammes	 GHS07 Attention
T° de fusion	180°C

Tableau 3 fiche technique de bleu méthylène

a. Propriétés physiques et chimique :

- ❖ Masse molaire : 319,852 g/mol
- ❖ Point de fusion : 190°C
- ❖ Solubilité :

Eau : 1 g / 25 mL

Éthanol : 1 g / 65 mL

Chloroforme : soluble

Éther diéthylique : insoluble

Aspect : poudre de couleur verte foncée

- ❖ Agent d'oxydoréduction : Le bleu de méthylène est capable de subir des réactions d'oxydation et de réduction, ce qui lui confère une variation de couleur en fonction de son état rédox.
- ❖ Structure chimique : Le bleu de méthylène est un composé organique constitué d'un noyau tricyclique, qui comprend trois cycles benzéniques fusionnés.
- ❖ Coloration : À l'état oxydé, le bleu de méthylène présente une couleur bleue intense, ce qui lui vaut son nom. Cependant, il peut également exister sous forme réduite incolore. [45]

b. Utilisations

- ❖ Comme indicateur d'oxydo-réduction. Oxydé, il est bleu tandis que réduit, il est incolore.
- ❖ Comme colorant du collagène des tissus en histologie.
- ❖ Comme antiseptique en aquariophilie
- ❖ Comme moyen de lutte contre la méthémoglobine (il réduit l'ion fer ferrique Fe^{3+} de l'hémoglobine incapable de fixer l'oxygène en ion ferreux Fe^{2+} remplissant correctement sa fonction de transport de l'oxygène. [45])

c. Toxicité du bleu de méthylène :

Les études toxicologiques menées sur le bleu de méthylène ont démontré qu'il ne présente pas de danger lorsqu'il est utilisé en tant que médicament, à condition que la dose totale administrée ne dépasse pas 7 mg/kg. Cependant, des effets indésirables peuvent survenir en cas de surdosage Ou d'exposition prolongée.

Parmi les effets indésirables signalés, on peut citer des douleurs thoraciques, une dyspnée (difficulté respiratoire), de l'anxiété, des tremblements et des hypertension. De plus, à des doses élevées, le bleu de méthylène peut entraîner une coloration de la peau.

Il convient de noter que le bleu de méthylène n'est pas considéré comme hautement dangereux, mais il peut avoir des effets nocifs sur les organismes vivants et les écosystèmes aquatiques.

En cas d'exposition aiguë à ce produit, certains effets indésirables peuvent se produire. Par exemple, une exposition externe au bleu de méthylène peut entraîner une irritation de la peau et causer des dommages permanents aux yeux.

Il est donc essentiel de prendre des précautions appropriées lors de l'utilisation et de la manipulation du bleu de méthylène, en respectant les doses recommandées et en évitant une exposition prolongée ou excessive. En cas de symptômes ou de préoccupations, il est recommandé de consulter un professionnel de la santé ou de contacter un centre antipoison pour obtenir des conseils appropriés. [46]

Chapitre 3

Les phénomènes d'adsorption

1. Introduction

L'adsorption est un phénomène physico-chimique qui se produit à l'interface de deux phases non miscibles, entraînant une modification de concentration. Il diffère de l'absorption, qui est un processus de pénétration en profondeur. Il existe cinq types d'interfaces, à savoir gaz/liquide, gaz/solide, liquide/liquide, liquide/solide et solide/solide, en fonction de la nature des deux phases impliquées. Dans cette étude, nous nous concentrons sur les phénomènes d'adsorption qui se produisent à l'interface liquide/solide, en particulier l'adsorption de liquides purs ou en mélange par des solides considérés généralement comme des phases pures. [47]

2. Définition de l'adsorption

L'adsorption est un processus par lequel des molécules d'un fluide, qu'il s'agisse d'un gaz ou d'un liquide, se fixent à la surface d'un solide. Les molécules adsorbées forment ce qu'on appelle un soluté ou un adsorbat, tandis que le solide sur lequel elles se fixent est appelé adsorbant. La surface du solide comprend à la fois les surfaces externes et internes créées par le réseau de pores et de cavités à l'intérieur de l'adsorbant. [48]



FIGURE 1 phénomène d'adsorption

3. Nature de l'adsorption :

Selon la nature des forces qui retiennent la molécule adsorbée à la surface du solide, on distingue deux types d'adsorption :

3.1 L'adsorption physique :

La physisorption est un processus qui implique des liaisons faibles telles que les forces de Van der Waals. Elle se produit à des pressions bien inférieures à la pression de vapeur saturante du gaz et à des températures relativement basses, proches du point d'ébullition de la phase adsorbée. La physisorption est un phénomène non spécifique et généralement réversible, où un équilibre est atteint lorsque les taux d'évaporation et de condensation sont égaux. [49, 50]

3.2 L'adsorption chimique :

L'adsorption chimique se produit lorsque des forces de liaison de nature chimique, impliquant le partage ou le transfert d'électrons, sont établies entre le réactif et les sites actifs de l'adsorbant. Ces liaisons chimiques sont beaucoup plus fortes que les interactions physiques, avec une énergie d'adsorption supérieure à 80 kJ.mol^{-1} . Contrairement à l'adsorption physique, l'adsorption chimique est spécifique et difficilement réversible. La vitesse d'adsorption est lente et la désorption est difficile.

L'adsorption physique peut se produire en monocouche ou en multicouches, tandis que l'adsorption chimique est exclusivement mono-moléculaire en raison des liaisons de valence formées entre l'adsorbat et l'adsorbant, ce qui exclut la formation de couches multimoléculaires. [51]

Le Tableau suivant résume les principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique :

Propriété	Adsorption physique	Adsorption chimique
Chaleur d'adsorption	Environ 5Kcal/mol	Environ 10Kcal/mol
Température de processus	Relativement basse	Plus élevée
Liaison entre gaz – solide	Physique	Chimique

Spécificité cristallographique	Processus non spécifique (pratiquement indépendant de la géométrie atomique extérieure)	Processus spécifique
Désorption	Facile	Difficile
La distance entre les molécules et la surface de solide	Grande	Petite
la vitesse d'adsorption	Rapide	Lente
Les énergies de liaison	0 et 40 KJ/mol	> 40 KJ/mol
Nature de sorbat	La quantité d'adsorbat enlevée dépend davantage de l'adsorbat que sur l'adsorbant	Dépend de l'adsorbant et de l'adsorbat

Tableau 1 principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique

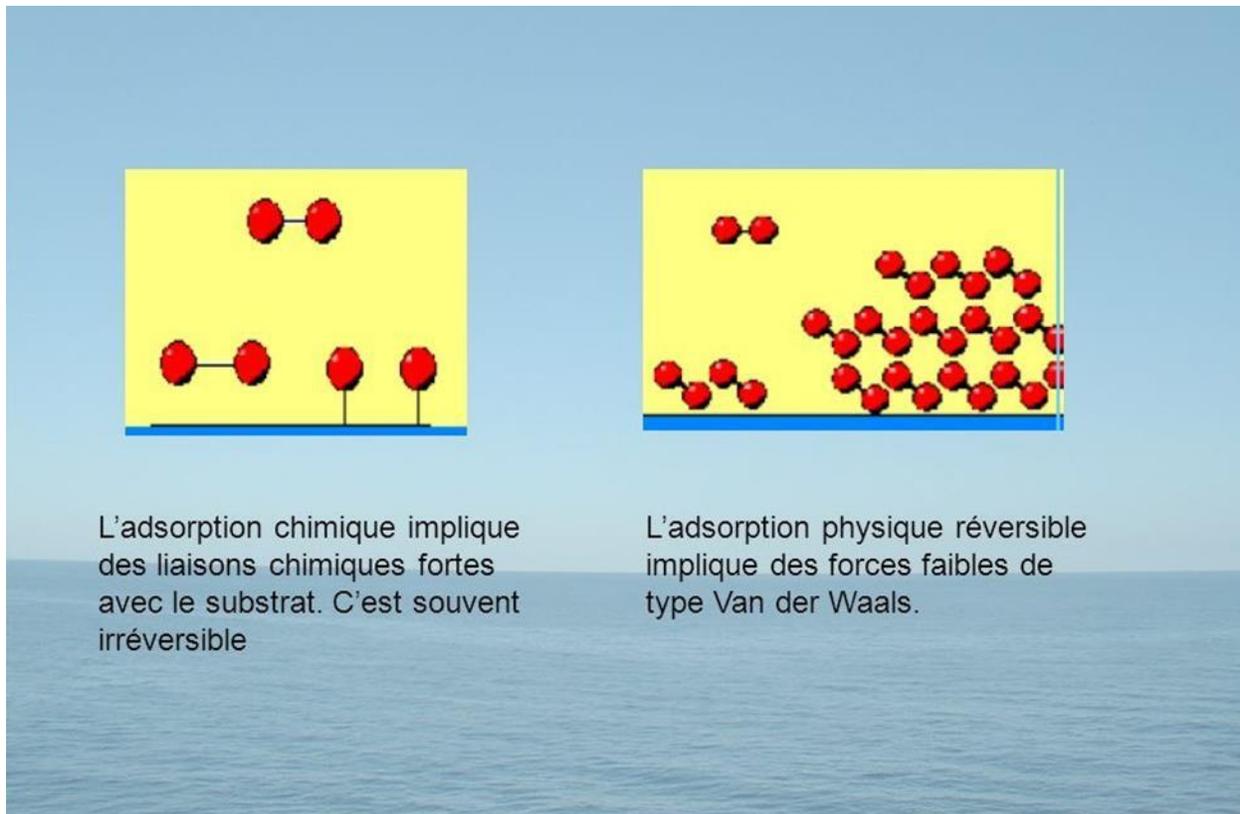


FIGURE 2 différences type d'adsorption entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique

4. Généralités sur les adsorbants :

Il existe une variété de matériaux adsorbants, tant conventionnels que non conventionnels, qui peuvent être utilisés dans les processus d'adsorption liquide/solide. Chaque type d'adsorbant présente ses propres avantages et inconvénients. Le défi réside dans le choix du matériau approprié en fonction de la solution à purifier. Ce choix est souvent basé sur un compromis, et la priorité donnée à une propriété spécifique dépendra de l'application souhaitée. En général, lors du choix d'un matériau, l'accent est mis sur sa capacité à dépolluer la solution, c'est-à-dire son efficacité en termes de rétention élevée. [52]

5. Types d'adsorbants et leurs utilisations :

5.1 Le charbon actif :

Le charbon actif est largement reconnu pour ses propriétés adsorbantes et est utilisé depuis longtemps dans l'industrie pour la purification de fluides. Il est également utilisé dans l'industrie chimique en raison de ses capacités de catalyse . [53]

Sa structure poreuse et sa chimie de surface lui confèrent un pouvoir d'adsorption élevé. Le Conseil Européen des Fédérations de l'Industrie Chimique (C.E.F.I.C) définit le charbon actif comme un matériau carboné possédant une structure poreuse qui offre une surface de contact interne très étendue. Ces matériaux, fabriqués à partir de procédés industriels, ont la capacité d'adsorber une large variété de substances en fixant les molécules à leur surface interne. C'est pourquoi ils sont appelés des adsorbants. [54]

5.2 Les adsorbants minéraux:

Les adsorbants minéraux peuvent exister à l'état naturel ou synthétisés. [55]

Nous sommes intéressés par nos recherches sur les adsorbants naturels (Argiles de la bentonite)

6. Généralités sur les argiles :

Le terme "argile" est couramment utilisé dans le langage quotidien, mais il peut parfois être imprécis. Il est important de le préciser en se basant sur des connaissances minéralogiques confirmées afin de définir ses limites. Les argiles appartiennent à la famille des silicates, plus précisément aux phyllosilicates. [56-57]

La notion d'argile englobe une grande variété de minéraux, et les experts préfèrent utiliser les termes "argiles" (au pluriel) ou "minéraux argileux". Cependant, il est important de faire une distinction claire entre les termes "minéraux argileux" et "argile", selon les directives des comités de nomenclature de l'Association Internationale Pour l'Étude des Argiles (AIPEA) et de la Clay Mineral Society (CMS). [58]

Le terme "minéraux argileux" fait généralement référence aux minéraux silicatés caractérisés par une structure en feuillets (phyllosilicates), qui confèrent une certaine plasticité à l'argile et durcissent lorsqu'ils sont séchés ou cuits.

Le terme "argile" se réfère au matériau naturel (la roche) qui contient principalement des minéraux argileux associés à d'autres minéraux qui n'induisent aucune plasticité, tels que le quartz, le calcaire, la dolomie, le gypse, les oxydes, les hydroxydes, etc. De plus, l'argile ne durcit pas nécessairement lorsqu'elle est séchée ou cuite.

Dans le cadre de cette étude, nous définissons l'argile comme une matière première minérale plastique à l'état humide, composée principalement de minéraux argileux (appartenant aux phyllosilicates) et dont le diamètre moyen des particules est relativement fin ($< 2 \mu\text{m}$). [59]

6.1 Structure des argiles :

Les minéraux argileux sont un assemblage de minéraux cristallins qui confèrent plasticité et cohésion au sol. Dans un sol argileux, en plus des minéraux non argileux tels que le quartz, le feldspath, le mica et la calcite, on peut trouver un ou plusieurs minéraux argileux composés de feuilles microscopiquement fines. Chimiquement, les minéraux argileux sont composés de silicate d'aluminium ou d'une combinaison de silicate de fer et de magnésium, certains contenant également des alcalino-terreux. [60]

La structure des minéraux argileux doit être considérée dans le contexte de la construction de tous les silicates stratifiés auxquels ils appartiennent. Leurs plaquettes sont composées de minuscules paquets de cristaux, normalement empilés face à face. Une seule plaquette est appelée une couche unitaire, composée de 2 à 3 feuillets planaires disposés parallèlement les uns aux autres.

Les minéraux argileux sont constitués d'un empilement de feuillets séparés par des

Intervalles qu'on appelle espaces interfoliaires. L'association de ces derniers représente l'unité structurale du minéral phylliteux qui est composé de :

A. Maille (motif cristallin) :

La maille cristalline est un arrangement régulier et répétitif des atomes ou des ions constituant un cristal. Pour les argiles, le motif cristallin dépend du type d'argile spécifique.

Parmi les argiles les plus couramment rencontrées, on trouve la montmorillonite, l'illite et la kaolinite, chacune ayant une structure cristalline différente. [61]

❖ La couche tétraédrique :

La couche tétraédrique est composée d'un arrangement de tétraèdres (Figure -3-) où chaque tétraèdre est constitué de quatre ions d'oxygène (O^{2-}). Ces ions d'oxygène entourent un ion de silicium (Si^{4+}) qui est équidistant des quatre ions d'oxygène. Cette structure forme une cavité située entre trois sphères en contact, dans une configuration hexagonale d'oxygène. Le tétraèdre est représenté par la présence d'une sphère et est en contact avec une sphère de la couche adjacente d'oxygène. L'épaisseur de la couche tétraédrique mesure 4,6 Å. [62]

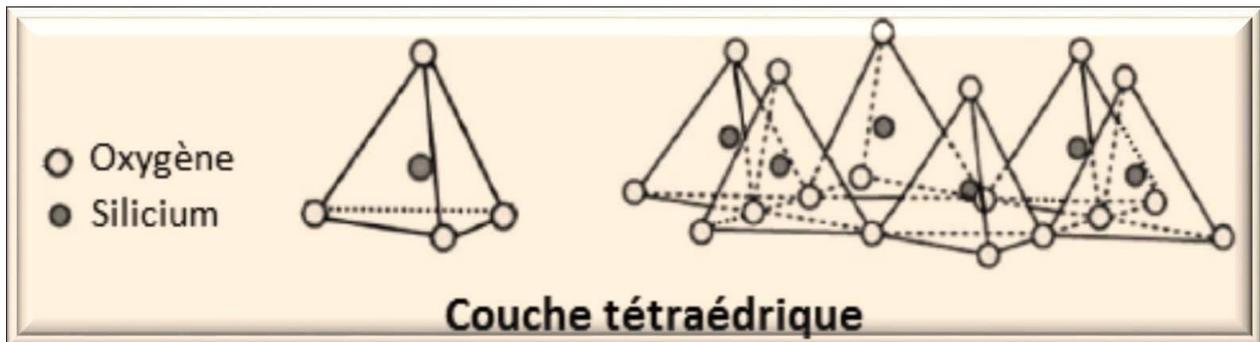


FIGURE 3 La couche tétraédrique

❖ La couche octaédrique :

La couche octaédrique se compose d'un octaèdre (Figure -4-) avec un ion d'aluminium (Al^{3+}) ou de magnésium (Mg^{2+}) situé au centre, à égale distance des six hydroxydes (OH^-) aux sommets. Ces octaèdres se combinent pour former des couches planes appelées couches octaédriques, et la liaison avec la couche tétraédrique se fait au niveau des atomes d'oxygène.

L'épaisseur de cette couche octaédrique mesure 5,05 Å. [62]

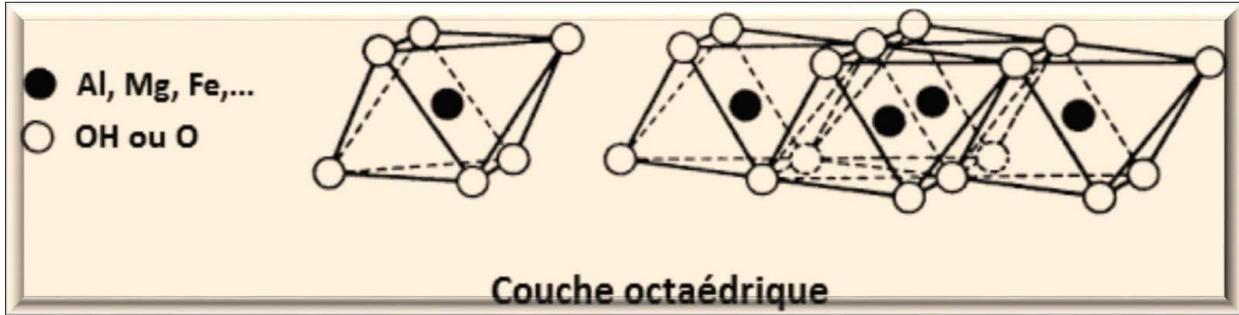


FIGURE 4 La couche octaédrique

6.2 Principales argiles :

❖ Montmorillonite :

La montmorillonite est une argile du groupe des smectites. Sa maille cristalline est constituée de feuillets en forme de sandwich, avec des couches de tétraèdres de silice (SiO_4) alternant avec des couches d'octaèdres d'hydroxydes d'aluminium (AlO_6). Les couches sont maintenues ensemble par des forces de Van der Waals. La maille de la montmorillonite est généralement monoclinique. [62]

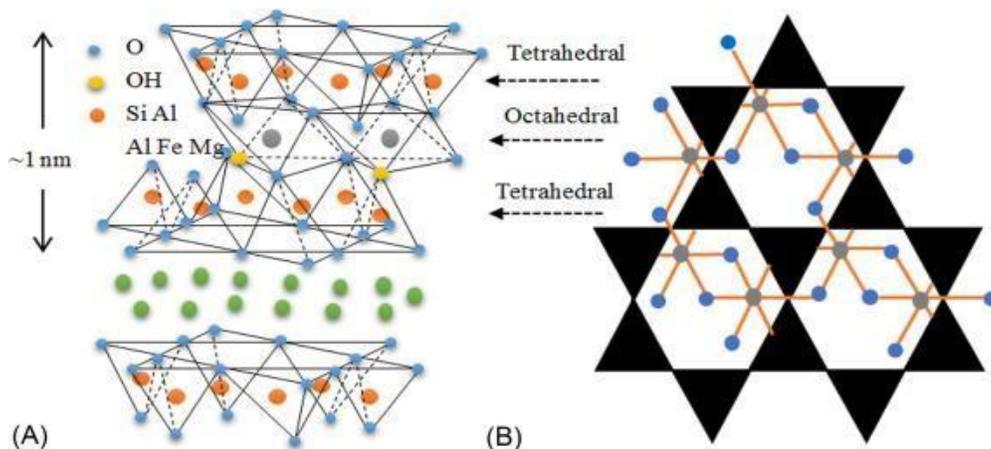


FIGURE 5 Structure de Montmorillonite

❖ Illite :

L'illite est une argile du groupe des micas. Sa maille cristalline est constituée de feuillets en forme de sandwich, similaires à ceux de la montmorillonite. Cependant, les feuillets d'illite

contiennent plus d'aluminium et de potassium que ceux de la montmorillonite. La maille de l'illite est généralement monoclinique. [62]

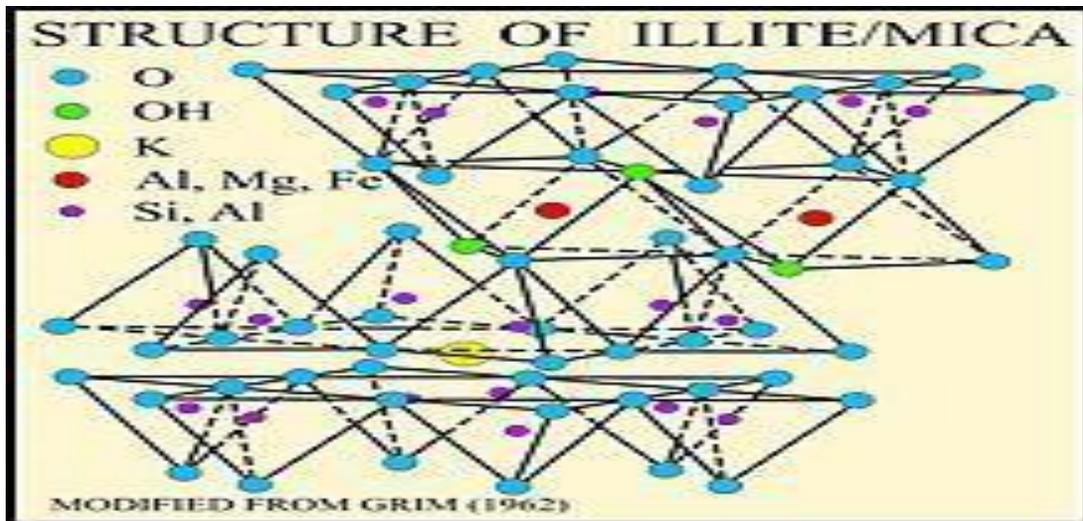


FIGURE 6 Structure de L'illite

❖ Kaolinite :

La kaolinite est une argile du groupe des kaolins. Sa maille cristalline est constituée de feuillets en forme de sandwich, mais avec une structure différente de la montmorillonite et de l'illite. Les feuillets de kaolinite sont composés de tétraèdres de silice (SiO_4) liés à des octaèdres d'aluminium (AlO_6), mais les couches d'octaèdres sont désordonnées. La maille de la kaolinite est généralement triclinique. [62]

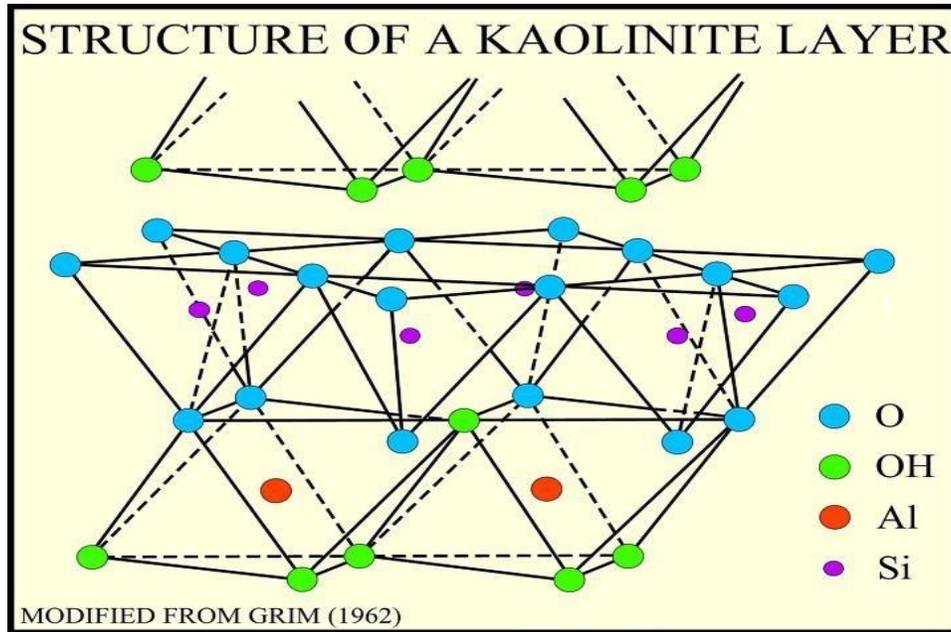


FIGURE 7 Structure de Kaolinite

6.3 Propriétés des argiles :

Les minéraux argileux présentent des propriétés bien particulières, dont les plus importantes sont : [63]

❖ **Forme et surface spécifique :**

Les argiles peuvent adopter trois formes principales :

En flocons : ces argiles se caractérisent par des dimensions similaires dans les deux directions principales et une épaisseur équivalente à environ 1/20ème de la longueur.

En plaquettes : ces argiles ont une dimension plus longue, mais leur épaisseur reste généralement équivalente à environ 1/20ème de la longueur.

En aiguilles : ces argiles ont deux dimensions identiques, tandis que la troisième dimension est considérablement plus grande.

❖ **Pouvoir adsorbant et surface spécifique :**

Les argiles sont connues pour leur capacité d'adsorption élevée, ce qui est attribuable à la petite taille de leurs particules et à leur surface spécifique importante. La surface spécifique correspond à la quantité de surface disponible par unité de masse de matériau. Plus la surface spécifique est élevée, plus la capacité d'adsorption de l'argile est grande. Le pouvoir adsorbant d'une argile est donc un paramètre essentiel qui permet de comprendre sa capacité à adsorber des substances. Il joue également un rôle crucial dans l'activation de l'argile, déterminant son potentiel d'adsorption.

❖ **Plasticité :**

Les argiles ont la propriété de se déformer de manière souple sous l'effet des contraintes. Lorsqu'elles sont hydratées, les argiles forment une pâte molle qui peut être facilement travaillée.

❖ **Hydratation :**

Les argiles, lorsqu'elles sont desséchées, ont la capacité d'absorber activement l'eau. Cependant, si l'argile est chauffée au-dessus de 500 °C, elle perd son hydratation chimique et ne peut plus absorber d'eau. On parle alors d'argile calcinée.

❖ **Gonflement :**

Les argiles ont la capacité de fixer l'eau par adsorption à leur surface, ce qui entraîne une augmentation de leur volume par gonflement. Elles agissent ainsi comme une réserve d'eau.

❖ **Échange ionique :**

Les argiles sont capables de réaliser des échanges ioniques, que ce soit entre des ions de même valence ou de valences différentes. Ces échanges se produisent en formant des solutions colloïdales qui flocculent lorsque les charges de surface des particules sont neutralisées par des ions. Ce phénomène d'échange ionique est réversible. [63]

6.4 Les propriétés physico-chimiques des argiles :

Les propriétés physico-chimiques des argiles comprennent les caractéristiques suivantes :

Fragilité : Les roches argileuses sont fragiles et se cassent facilement. Elles peuvent également être rayées avec peu d'effort.

Couleur : Les argiles sont naturellement colorées et leur couleur varie en fonction des minéraux présents dans leur composition. Différents minéraux peuvent donner aux argiles des teintes allant du blanc au rouge, du jaune au brun, voire même du vert au bleu.

Transformabilité : Les argiles ont la capacité d'être transformées par le processus de cuisson. En les chauffant à des températures élevées, on peut obtenir des céramiques, où les argiles subissent des changements structuraux et chimiques pour devenir des matériaux solides et durables.

Non miscibilité à l'eau : Les argiles ne se dissolvent pas dans l'eau, mais elles ont la propriété de gonfler lorsqu'elles sont en contact avec l'eau. Cela signifie qu'elles absorbent l'eau et se transforment en une pâte molle et malléable, ce qui les rend idéales pour des applications telles que la poterie et la céramique. [63]

7 la bentonite :

7.1 Définition :

La bentonite est une roche argileuse caractérisée par sa friabilité, sa texture douce et onctueuse au toucher. Sa couleur varie en fonction des composés minéraux et des impuretés qui lui sont associés, tels que la matière organique et les oxydes métalliques. Elle peut être blanche, grise ou légèrement jaune. La bentonite se distingue par ses propriétés spécifiques, notamment sa capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement. Ces caractéristiques en font un matériau précieux dans de nombreux domaines, tels que la géotechnique, l'industrie pétrolière, la construction, et d'autres applications industrielles et médicales [64] [65] [66].

7.2 Origine de la bentonite :

Les cendres des tufs volcaniques riches en verre subissent une altération et une transformation hydrothermale qui entraînent la formation de nouveaux minéraux argileux, principalement du groupe des smectites. Ces roches argileuses nouvellement formées sont connues sous le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton dans le Wyoming, aux États-Unis. La bentonite contient plus de 75 % de montmorillonite, qui a été découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de la Vienne en France [67].

En Algérie, les gisements de bentonite les plus économiquement importants se trouvent dans la région de l'Oranie, dans l'ouest du pays. En particulier, on trouve la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) avec des réserves estimées à un million de tonnes, ainsi que celle de Mostaganem (M'zila) avec des réserves de deux millions de tonnes. [68]

7.3 Structure de la bentonite :

La montmorillonite, représentée dans la Figure III.4, est le principal constituant de la bentonite. Il s'agit d'un type de phyllosilicate 2:1 appartenant à la famille des smectites. Dans cette structure, la charge négative de la couche est équilibrée électriquement par une charge égale de cations échangeables tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , K^+ , NH_4^+ et Na^+ . Ces cations se trouvent principalement entre les couches silicates et ne font pas partie intégrante de la structure de la montmorillonite. Ils conservent une certaine mobilité, ce qui leur permet de participer à des échanges ioniques réversibles. [66]

La bentonite, également connue sous le nom commercial de montmorillonite, est composée principalement de montmorillonite, qui représente plus de 80% de la composition totale du minéral. Le reste de la composition comprend des impuretés. Voici l'analyse d'un échantillon de bentonite présentée dans le tableau suivant :

Composition chimique de l'échantillon de bentonite :

- Montmorillonite : Plus de 80%

Impuretés : Moins de 20%

Oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	H ₃ O ⁺	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
(%)	61,0	16,10	2,80	3,53	3,15	1,50	1,60	0,04	0,22	10.16	6,44
Éléments en trace	Ba	Sr	Cu	Pb	Zn	S	SO ₄				
Ppm	210	160	20	35	70	270	810				

Tableau 2 Analyse chimique de la bentonite naturelle [69].

7.4 Propriétés physico-chimiques de la bentonite :

- Capacité d'échange cationique (CEC) :

La montmorillonite possède une capacité d'échange cationique en raison des substitutions isomorphiques dans sa structure cristalline. Ces substitutions créent une charge négative à la surface des feuillets. Cette charge permanente permet à la montmorillonite d'échanger des cations avec son environnement. [70] [71]

- Gonflement :

La bentonite a la capacité de gonfler lorsqu'elle est en contact avec l'eau. Cela est dû à la nature hydrophile de sa surface, qui attire les molécules d'eau entre les feuillets de la montmorillonite et les sépare. Le gonflement se produit jusqu'à une distance interfoliaire d'équilibre sous une pression donnée. [72]

- Dispersion :

Les argiles, y compris la bentonite, ont la propriété de se disperser dans l'eau pour former des suspensions plus ou moins solides. Cette dispersion est le résultat de l'interaction entre l'eau et les cations échangeables présents dans la bentonite, en particulier le sodium. [73]

- Flocculation :

La floculation est le phénomène inverse de la dispersion, où les particules argileuses se rassemblent au fond du récipient. Cela se produit généralement après l'addition d'un agent flocculateur. [74]

- **Colloïdalité :**

La bentonite présente une caractéristique colloïdale en raison de la présence de charges négatives à la surface de chaque grain d'argile. Cela entraîne la formation d'une double couche d'ions hydrosolubles de charges opposées autour de chaque grain. [75]

- **Surface spécifique :**

Les argiles, y compris la bentonite, ont une grande surface spécifique, ce qui signifie qu'elles ont une grande quantité de surface par unité de masse. Cette surface spécifique est composée de deux parties : une surface externe entre les particules et une surface interne correspondant à l'espace interfoliaire. Une surface spécifique plus élevée se traduit par un pouvoir de gonflement plus important et un potentiel de gonflement plus élevé. La surface spécifique est un paramètre important pour caractériser précisément l'argile. [76] [77]

7.5 Utilisations de la bentonite :

La bentonite, grâce à sa principale composante, la montmorillonite, est une argile industrielle polyvalente largement utilisée dans différents domaines en raison de ses capacités d'absorption et de gonflement élevées. Voici quelques-unes de ses utilisations :

- ❖ Protection environnementale
- ❖ Forage
- ❖ Céramiques
- ❖ Peintures
- ❖ Agroalimentaire
- ❖ Décoloration des huiles
- ❖ Raffinage du pétrole
- ❖ Fabrication du papier

- ❖ Génie civil
- ❖ Traitement des eaux usées
- ❖ Pharmacie et cosmétique

La bentonite présente une large gamme d'applications grâce à ses caractéristiques uniques, ce qui en fait un matériau précieux dans de nombreux secteurs industriels. [78] [79]

8. Les isothermes d'adsorption :

i. Isothermes de Langmuir :

Une isotherme d'adsorption décrit la relation entre la quantité de substance adsorbée à la surface d'un matériau et la pression ou la concentration de cette substance dans le milieu environnant, à une température donnée. Il existe plusieurs types d'isothermes d'adsorption couramment utilisées, telles que l'isotherme de Langmuir, l'isotherme de Freundlich et l'isotherme de BET (Brunauer-Emmett-Teller).

L'isotherme de Langmuir, utilisée couramment pour décrire l'adsorption sur des surfaces solides, repose sur l'hypothèse d'une surface d'adsorption homogène et d'une adsorption mono moléculaire. Elle permet de modéliser l'adsorption en solution.

L'équation de Langmuir, dérivée de la cinétique et basée sur des arguments d'équilibre, s'exprime comme suit dans le cas de l'adsorption en solution :

$$Q_e = Q_o * K_L * C_e / (1 + K_L * C_e)$$

Dans cette équation, Q_e représente la quantité de quantité adsorbé à l'équilibre (en mol/g), C_e est la concentration à l'équilibre (en mol/L), Q_o est la capacité maximale d'adsorption (en mol/g), et K_L est la constante de Langmuir, une constante qui dépend de la température et du système adsorbant-adsorbat étudié. [80]

ii. Isothermes de Freundlich :

L'isotherme de Freundlich est basée sur l'idée que l'adsorption se produit sur des sites hétérogènes avec une énergie d'adsorption variant selon la surface. Elle est souvent utilisée

pour décrire l'adsorption sur des matériaux poreux et des surfaces adsorbantes non homogènes. L'équation de l'isotherme de Freundlich est la suivante :

$$Q_e = K_F C_e^{1/n}$$

où Q_e représente la quantité adsorbée à l'équilibre, K_F est la constante d'adsorption de Freundlich et O est un paramètre d'ajustement lié à l'intensité de l'adsorption. [80]

9. Classification des isothermes d'adsorption :

Les isothermes d'adsorption sont des courbes expérimentales qui représentent la variation de la masse ou du volume du substrat adsorbé (gaz ou liquide) en fonction du poids de l'adsorbant, en prenant en compte la concentration (en phase liquide) ou la pression (en phase gazeuse). Les systèmes adsorbant-adsorbât peuvent se comporter différemment les uns des autres. On distingue expérimentalement quatre classes principales : S (Sigmoide), L (Langmuir), H (Haute affinité) et C (partition constante). La Figure III.1 présente cette classification. [80]

Après avoir décrit ces différentes classes, nous aborderons leur interprétation.

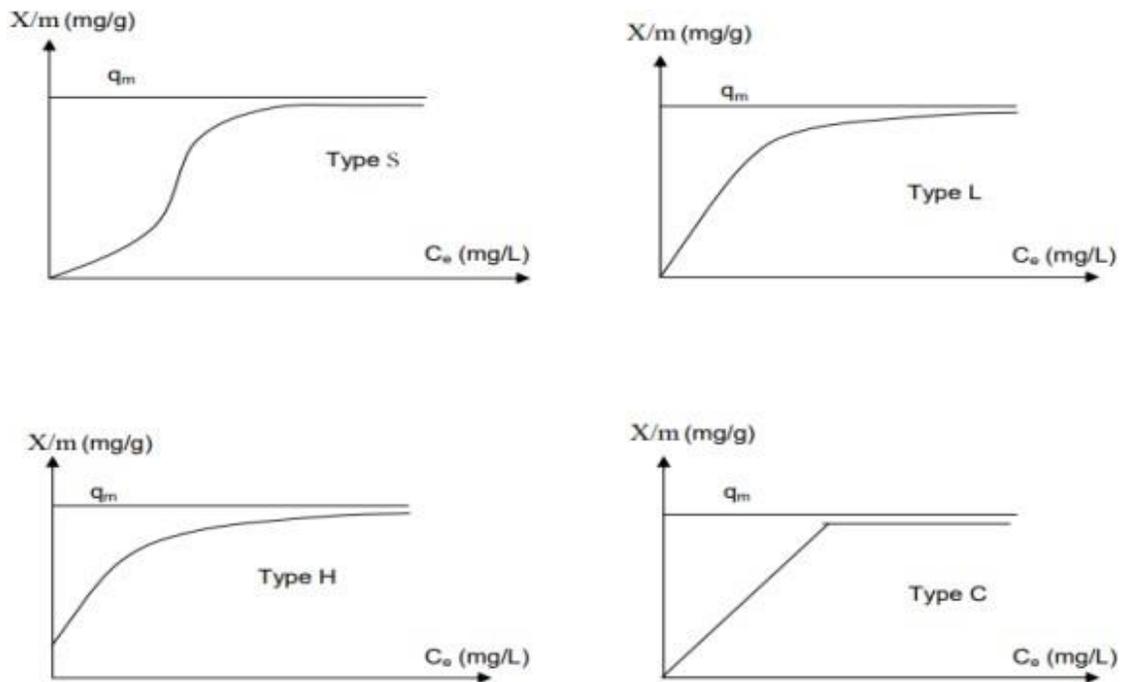


FIGURE 8 Les isothermes d'adsorption en phase

a. Classe L :

Les isothermes de classe L présentent une concavité orientée vers le bas aux faibles concentrations de la solution. Cette courbe traduit une diminution des sites d'adsorption disponibles à mesure que l'adsorption progresse. Ce phénomène se produit lorsque les forces d'attraction entre les molécules adsorbées sont faibles. Il est souvent observé lorsque les molécules sont adsorbées à plat, ce qui réduit leur attraction mutuelle. Cette concavité peut également apparaître lorsque les molécules sont adsorbées verticalement et que la compétition entre le solvant et le soluté est faible. Dans ce cas, l'adsorption des molécules individuelles est suffisamment forte pour rendre négligeables les interactions latérales. [81]

b. Classe S :

Les isothermes de cette classe présentent une concavité orientée vers le haut à faible concentration. Les molécules adsorbées favorisent l'adsorption supplémentaire d'autres

molécules (adsorption coopérative) en raison des forces d'attraction de Van der Waals. Elles se regroupent en îlots où elles se rapprochent les unes des autres. Ce comportement est favorisé lorsque les molécules de soluté sont adsorbées verticalement, notamment celles avec un seul groupe fonctionnel, et lorsqu'il y a une forte compétition d'adsorption avec le solvant. [55]

c. Classe H :

L'isotherme de classe H se caractérise par une partie initiale presque verticale, indiquant une adsorption importante même à une concentration quasi 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. On observe également cette isotherme lors de l'adsorption de micelles ou de polymères formés à partir des molécules de soluté. [81]

d. Classe C :

Les isothermes de la classe C se caractérisent par une partition constante entre la solution et le substrat jusqu'à atteindre un palier. La linéarité de ces isothermes indique que le nombre de sites libres reste constant tout au long de l'adsorption. Cela suggère que les sites sont créés pendant le processus d'adsorption. En d'autres termes, les isothermes de cette classe sont obtenues lorsque les molécules de soluté ont la capacité de modifier la texture du substrat en ouvrant des pores qui n'étaient pas préalablement accessibles au solvant. [81]

9. Critères de la bonne qualité de l'adsorbant :

Lorsqu'il s'agit d'utiliser des adsorbants dans différents traitements, il est essentiel qu'ils présentent certaines qualités, telles que : une capacité d'adsorption élevée, une grande efficacité d'adsorption, une sélectivité élevée, la possibilité d'être facilement régénérés et réutilisés. Cependant, il convient de noter que ces adsorbants peuvent être coûteux. [82]

10. Les paramètres influençant l'adsorption :

L'adsorption d'un matériau est influencée par plusieurs paramètres importants, parmi lesquels :

i. Température :

L'adsorption physique se produit à des températures basses (phénomène exothermique), tandis que l'adsorption chimique nécessite des températures plus élevées (phénomène endothermique). Il est donc nécessaire de définir la température du processus dès le départ. En pratique, il n'y a pas de modifications significatives dans la plage de température de 5 à 20 °C. [83]

ii. pH :

Le pH peut avoir un effet significatif sur les caractéristiques de l'adsorption. Dans de nombreux cas, les meilleurs résultats sont obtenus à des pH plus bas. Cette tendance est particulièrement observée dans l'adsorption de substances acides. [83]

iii. Influence de la nature de l'adsorbant sur l'adsorption :

Les adsorbants peuvent être classés comme suit :

- ❖ Adsorbants apolaires : Ces adsorbants ont une plus grande affinité pour les substances non polaires. Parmi les exemples d'adsorbants apolaires, on trouve le charbon, le graphite, le talc, etc.
- ❖ Adsorbants polaires : Ces adsorbants ont la capacité d'adsorber des électrolytes, ce qui rend l'adsorption sélective. Selon la charge de surface de l'adsorbant, les cations ou les anions peuvent être fixés. Parmi les exemples d'adsorbants polaires, on trouve le gel de silice (silicagel) et différentes argiles. [83]

Cette classification des adsorbants en fonction de leur polarité permet de mieux comprendre leurs propriétés d'adsorption spécifiques et leurs applications potentielles.

iv. Influence de l'adsorbat sur l'adsorption :

La structure chimique des substances dissoutes influence également l'adsorption de la manière suivante : les composés aromatiques ont tendance à s'adsorber plus efficacement par rapport aux composés aliphatiques ayant le même nombre de carbones. De plus, l'incorporation de groupes hydroxyle dans les composés tend généralement à réduire l'ampleur de l'adsorption. [84]

11. La cinétique d'adsorption :

La cinétique d'adsorption se réfère à l'évolution de la quantité adsorbée en fonction du temps de contact entre l'adsorbant et l'adsorbat.

La vitesse d'adsorption d'un soluté à partir d'une solution dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature de l'adsorbant, l'adsorbat et la vitesse d'agitation du milieu. [85]

Des études ont montré que l'adsorption des adsorbats est relativement rapide sur un solide non poreux, où l'équilibre est atteint en quelques minutes. Cependant, l'adsorption sur un solide poreux est beaucoup plus lente. [86]

Cela signifie que la cinétique d'adsorption peut varier en fonction de la structure de l'adsorbant et de la présence de pores, ce qui peut affecter la vitesse à laquelle l'équilibre d'adsorption est atteint.

Chapitre 4

Partie Expérimentale

Objectif :

Notre objectif est d'éliminer le polluant organique bleu de méthylène de l'eau de mer par le procédé d'adsorption sur la bentonite activée.

1. Matériels et méthodes :**1.1 Matériels et Appareillage :****Tableau 1 : tableau des matériels et appareillage**

Matériels	Appareillage
Bécher (50ml, 250ml) – Erlenmeyer – cristalliseur	Une balance analytique type (OHAUS)
Éprouvette graduée	Une étuve +
Buchner	Hotte aspirante
Tubes d'essais	Pompe à pression
Fiole jaugée (50ml, 100ml, 250ml, 1000ml)	pH-mètre (de type OHAUS)
Entonnoir	Agitateur magnétique
papier filtre	barreau magnétique
papier joseph	Centrifugeuse (nuve NF 200)
Verre de montre	Spectroscopie IR (de type IRPrestige-21)
Mortier	spectroscopie UV-visible type
spatule	(SPECORD 210) analytikjena
spatule verre	
Pipette graduée	
pissette	
Tubes d'essais	



FIGURE 2 spectroscopie UV-visible

FIGURE 1
Spectroscopie IR

1.2 Les produits utilisés :

- Bentonite brute
- Bentonite active (BA)
- Eau distillé
- Hydroxyde de sodium (Na OH).
- Chlorhydrique (HCL).
- Chlorure de sodium (Na CL).
- Acide sulfurique (H₂SO₄)
- Bleu de Méthylène (BM)

2. Méthodologie de travail :

2.1 Choix de la bentonite :

L'argile utilisée est une montmorillonite naturelle extraite de gisement de Roussel provenant de Maghnia (Algérie). Les tableaux IV.2 et IV.3 présentent quelques caractéristiques de cette bentonite.

Constituants	SiO ₂	Al ₃ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Na ₂ O	As
%massique	69.4	14.7	1.2	3.56	0.8	0.81	0.2	0.33	0.05

Tableau 2 : composition chimique de la bentonite de Maghnia

Tableau 3 : Caractéristiques physico-chimiques de la bentonite de

Bentonite	Surface spécifique (m ² /g)	pH	Cations échangeables (meq /100g)			
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Maghnia	80	6,2	30,6	12 ,8	36,2	9,5

maghnia

2.2 Purification de la bentonite :

- La bentonite est lavée à l'eau distillé plusieurs fois jusqu'à ce que le Ph se stabilise et Le mélange est laissé se décanter à l'aire libre (50 g de bentonite)
- Séchage à l'étuve 80 °C pendant 24 et puis finement broyée.



FIGURE 3 : séchage bentonite dans étuve à 80C°

2.3 Activation de la bentonite :

- On introduit une masse (35 mg) de bentonite dans une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 à 0.1 M sous agitation pendant 48 heures environ
- Le mélange est laissé se décanter à l'air libre, puis lavé à l'eau distillée jusqu'à pH neutre (pH de l'eau distillée) pour éliminer l'excédent de H_2SO_4
- Séchage à l'étuve 80 °C pendant 24 heures et puis finement broyée.

Enfin, il a été finement broyé et tamisé avec un tamis de 150 µm

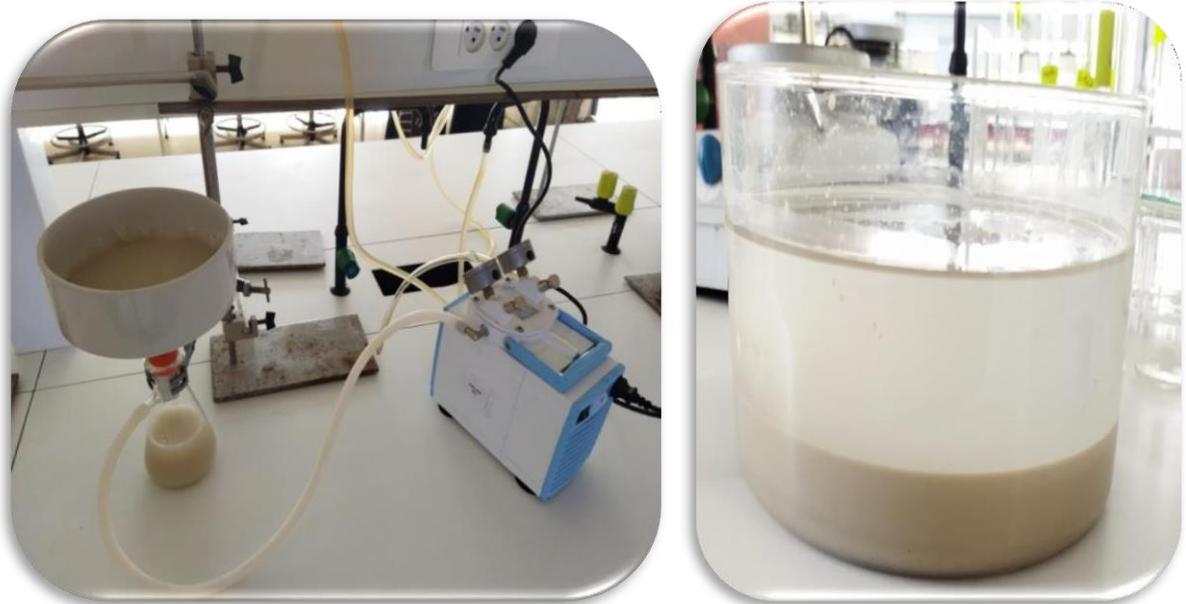


FIGURE 4 :filtration de la bentonite



FIGURE 5 :la bentonite activée

3. Caractérisation de la bentonite active :

La bentonite activée ayant donnée un maximum d'adsorption du BM est caractérisé au moyen des expériences suivante :

3.1 Mesure de la densité apparente :

Dans une éprouvette graduée, une masse de bentonite m occupera un volume V_a . La densité apparente peut être calculée au moyen de l'équation suivante :

$$p = \frac{M}{V_a} \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad [87]$$

Dans une éprouvette graduée on introduit 1 g de bentonite qui correspond a 1 ml donc la densité apparente de notre bentonite est

$$P=1g/ml$$

3.2 Mesure de la porosité :

Pour mesure cette grandeur, il suffit de mettre dans une éprouvette de 10 ml, une masse de bentonite m_1 équivalente à un volume de V_1 de 1 ml en suite d'ajouter du méthanol jusqu' à atteindre, un volume V_2 de 2 ml correspondant à une masse totale. La porosité est calculée au moyen de la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{\frac{m_2 - m_1}{f_{\text{methanol}}} - V_2}{V_1} \quad [88]$$

- m_1 : masse de la bentonite
- m_2 : masse de la bentonite + méthanol
- f méthanol : masse volumique du méthanol

$$\varepsilon = 35\%$$

3.3 Mesure du taux d'humidité :

Peser une masse m_1 5 g de l'échantillon m_1 sur un verre a montré, Sécher a l'étuve a une température de 105°C , suivre l'évolution de la masse pendant le temps jusqu'à un poids constant m_2 . L'humidité (H) a été déterminée en appliquant la relation suivante :

$$\text{Taux d'humidité}(\%) = \left[\frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \right] \times 100 \quad (\text{IV.1})$$

H : Humidité.

m_1 : Masse de l'échantillon avant séchage.

m_2 : Masse de l'échantillon après séchage.

après le séchage nous avons obtenu une masse $m_2 = 4,2 \text{ g}$ en appliquant l'équation IV.3 on obtient :

$$\text{Taux d'humidité} = \frac{5 - 4,02}{5} \times 100$$

Taux d'humidité est de 16 %

✚ On en déduit que notre masse de bentonite est constitué 16% d'eau soit une masse de 0.8 g.

3.4 Mesure du ph de suspension :

Une masse de 1 g de de bentonite est introduite dans 100 d'eau distillé .la solution est agitée d'une manière continue pendant 24h puis filtré. Le ph est mesuré au repos sur le filtrat a chaque intervalle de 3 jours à l'aide d'un pH-mètre

3.5 Point de charge zéro (PZC) de la bentonite active :

Le PZC a été déterminé par une méthode électrochimique simple, nous avons ajouté dans une série de béchers de 50 ml le NaCl (0.01M), puis ajusté le pHi de chacun des valeurs précises de 2,04 à 11,854(par addition de NaOH et HCl 0.1M) ensuite nous avons ajouté dans chaque bécher 25 mg de bentonite active. Les suspensions ont été maintenues en agitation pendant 24 h, afin de déterminer le pH final.

Le point de charge zéro (PZC) correspond à l'intersection de la courbe portant $\Delta pH = pH_f - pHi$ en fonction de pHi avec l'axe des abscisses

N°	1	2	3	4	5	6	7
Phi	2.04	2.99	4.28	4.48	5.87	8.02	11.84
Phf	2.07	3.05	4.49	4.69	5.79	6.27	10.23
Phf-phi	003	006	022	021	-0.08	-1.75	-1.61

Tableau 4 : variation de pHf-pHi en fonction de pHi

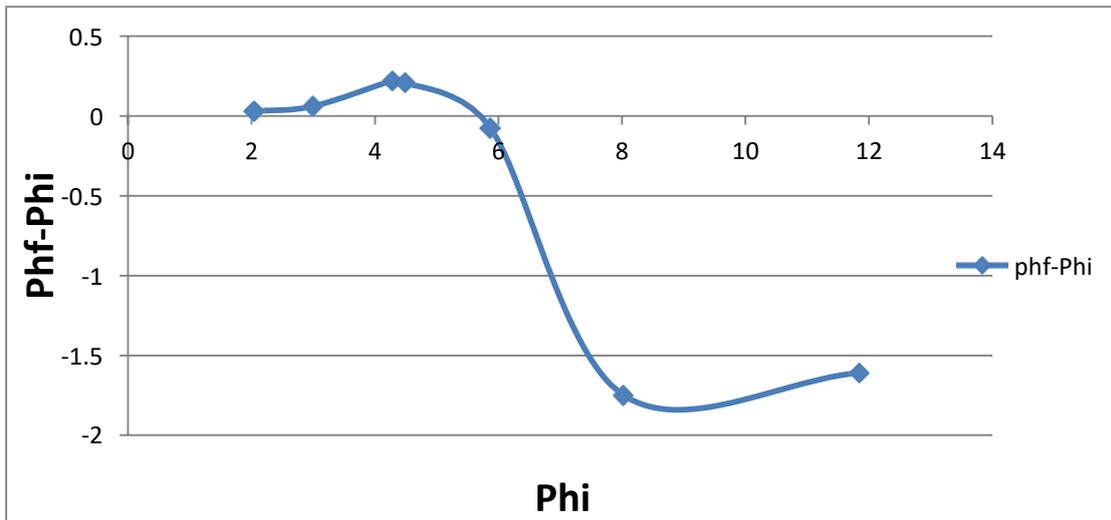


FIGURE 6 : courbe de variation de pH_f-pH_i en fonction de pH_i

Le PZC est de 5.8 ce qui signifie que la surface d'adsorbant est chargée positivement au pH inférieur à 5.8, et négativement à un pH supérieur à 5.8.

4. Optimisation des conditions d'adsorption :

Dans le but d'optimiser les conditions en faveur d'une meilleure adsorption du Bleu de Méthylène sur la bentonite active précédemment caractérisée, nous avons étudié, l'effet de trois paramètres sur le processus d'adsorption du Bleu de Méthylène à savoir :

1. Le temps de contact
2. La dose de bentonite active
3. Le PH

Les conditions opératoires sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 5 : les conditions opératoires du processus d'adsorption de (BM)

Paramètres	Conditions opératoire
Temps de contact	<ul style="list-style-type: none"> • Masse (bentonites) =50 mg • V =50 ml (eau de mer + BM) • Temps=(5-10-20-25-30-40-60-120)min • PH de solution • Température ambiante
Masse de bentonite active	<ul style="list-style-type: none"> • Masse (bentonites)=(25-50-75-100-125-150)mg • V =50ml (eau de mer + BM) • Temps de contact =30min • Température ambiante
Le PH	<ul style="list-style-type: none"> • PH de solutions (2.4 -4 -5-7.05 -8.03 -9.9) • Temps de contact =30min • Masse (bentonites) =50 mg • V =50ml (eau de mer + BM) • Température ambiante

La quantité de sel adsorbée par unité de masse de bentonite est calculée par la formule suivante :

$$Q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} * V \quad (\text{IV.2})$$

Le Taux d'élimination R% de la saumure on a calculé par cette équation suivent :

$$R\% = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \quad (\text{IV.3})$$

- **Résultats et discussions :**

5.1 Adsorption du Bleu de Méthylène par la bentonite activée :

Propriétés spectrophotométriques des adsorbats :

La méthode d'analyse utilisée est la spectrophotométrie UV visible. La première étape est la détermination de la longueur d'onde maximale (λ_{max}),

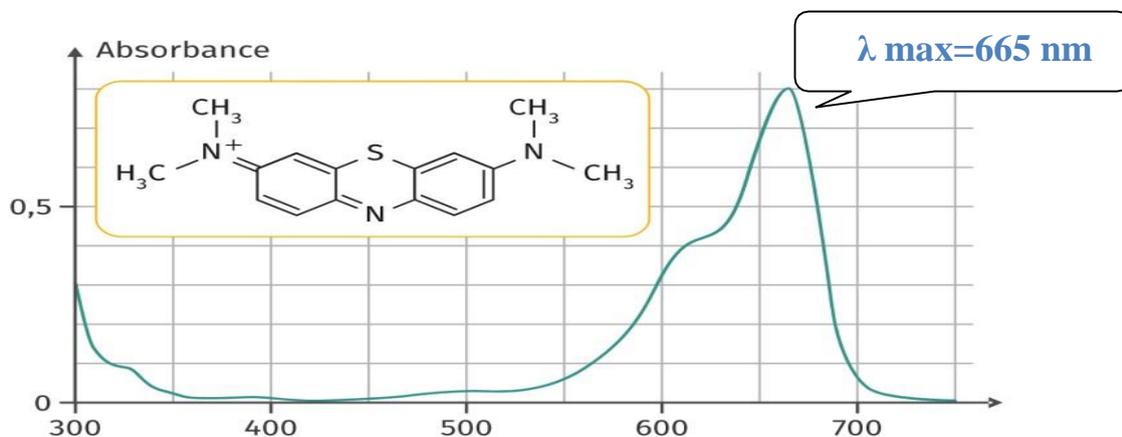


FIGURE 7 : Balayage spectrale UV-visible d'une solution de BM

montre que le maximum d'absorption de ce polluant organique (BM) se situe à une longueur d'onde optimale de 665 nm. à cette valeur λ (max) nous avons établi

la courbe d'étalonnage de bleu de méthylène, dans un domaine de concentration comprise entre 0 et 10 (mg/l).

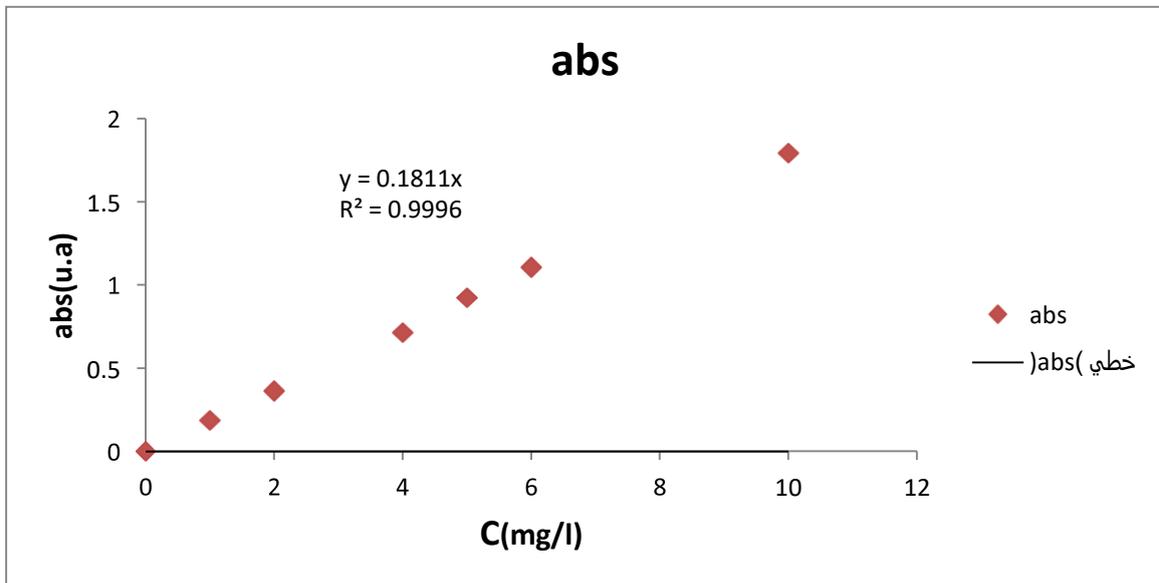


FIGURE 8 : Courbe d'étalonnage du bleu de méthylène.

5.2 Etude de l'influence de quelques paramètres de l'adsorption sur le bleu de méthylène :

5.2.a Cinétique d'adsorption en fonction du temps de contact :

Comme illustrent la figure qui représente l'évolution de la quantité adsorbée en fonction du temps. On remarque que les cinétiques d'adsorption des BM sur les bentonite utilisées présentent les mêmes allures peut être décomposée en deux phase : une première très rapide , suivi d'une deuxième de rapidité faible .

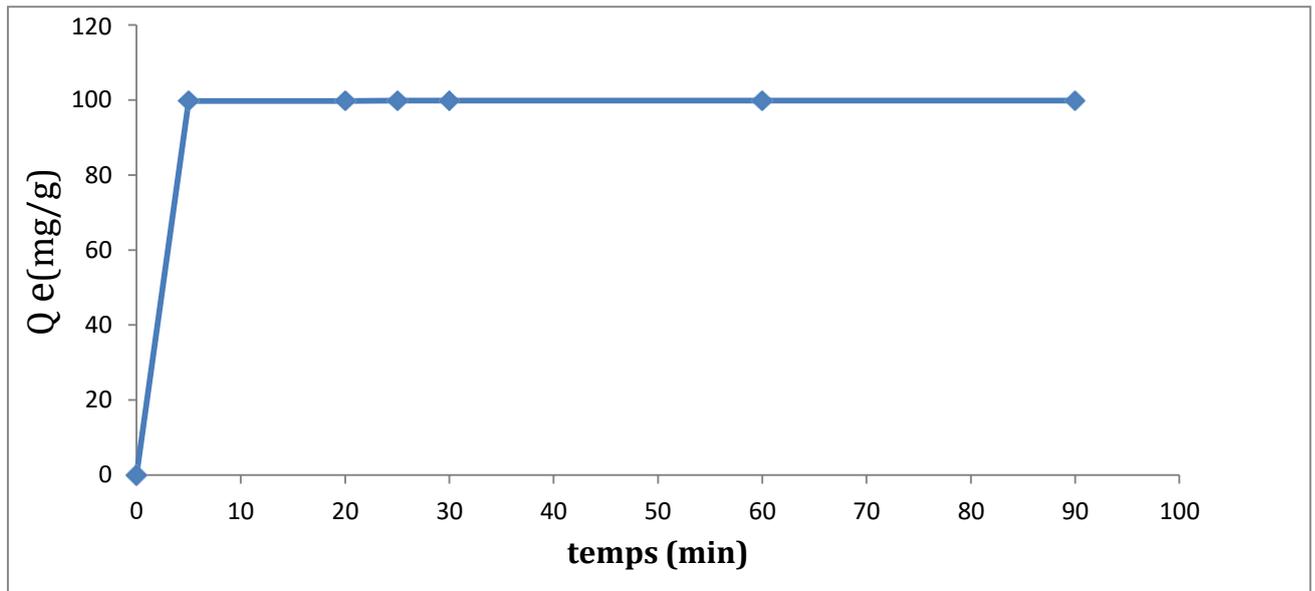


FIGURE 9 : Cinétique d'adsorption de BM sur la bentonite (Temps de contact)

Conditions : V=50ml ; m=50mg; C= 100mg/L; Vitesse d'agitation = 500 tr/min

Les premières constatations montrent que la vitesse d'adsorption était très rapide à la période initiale de temps de contact, puis diminuait graduellement avec le temps jusqu'à ce que l'adsorption soit atteinte au point d'équilibre. Cette tendance de la cinétique d'adsorption était due à l'adsorption du colorant sur la surface extérieure de l'adsorbant à la période initiale du temps de contact. Lorsque l'adsorption sur la surface extérieure atteint un point de saturation, le colorant diffuse dans les pores de l'adsorbant et est adsorbé par la surface intérieure de l'adsorbant.[1][2]

Le temps d'équilibre est 30 min .

5.2.b Modèle pseudo premier ordre :

Les résultats obtenus à partir du graphe IV.10 nous permet de conclure si la cinétique de l'adsorption du bleu de méthylène dans l'eau de mer par la bentonite activée est du premier ordre. Le tracé de $\log (q_e - q_t) = f(t)$ en utilisant l'équation :

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad \text{IV.4}$$

q_e : quantité d'adsorbant à l'équilibre par gramme d'adsorbant (mg g⁻¹).

t: temps de contact (min).

K₁: constante de vitesse d'adsorption pour le premier ordre (min⁻¹).

Les résultats obtenus en appliquant le modèle cinétique du pseudo-premier ordre sont présentés dans la figure IV.1

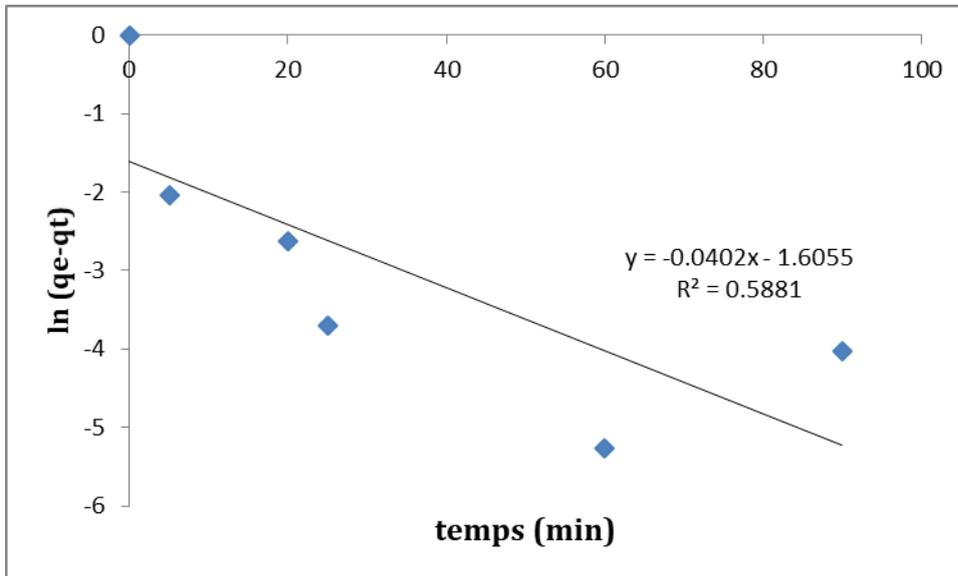


FIGURE 10 : Application du modèle de pseudo premier ordre sur l'adsorption du bleu de méthylène par la bentonite active

Nous constatons que ce modèle n'est pas en bonne adéquation avec nos résultats car on a obtenu des courbes au lieu des droites.

Tableau 6 : Paramètre cinétique de modèle de pseudo 1er ordre

qe (Ex) (mg .g-1)	qe (Cal) (mg. g-1)	k1 (min-1)	R ²
99.83	0.2008	0.00044	0.588

les paramètres de ce modèle confirment son invalidité. Car il existe une différence entre les quantités adsorbées expérimentales Q_{exp} et les quantités adsorbées calculées Q_{cal} et les faibles valeurs des coefficients de détermination R^2 .

5.2.c Modèle cinétique du pseudo second ordre :

les résultats obtenus à partir du graphe V-11 nous permettent de conclure si la cinétique de l'adsorption de bentonite est du second ordre. Le tracé de $t/q_t = (t)$ en utilisant

l'équation :
$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{q_e^2 K_2} + \frac{1}{q_e^2} t \quad \text{IV.5}$$

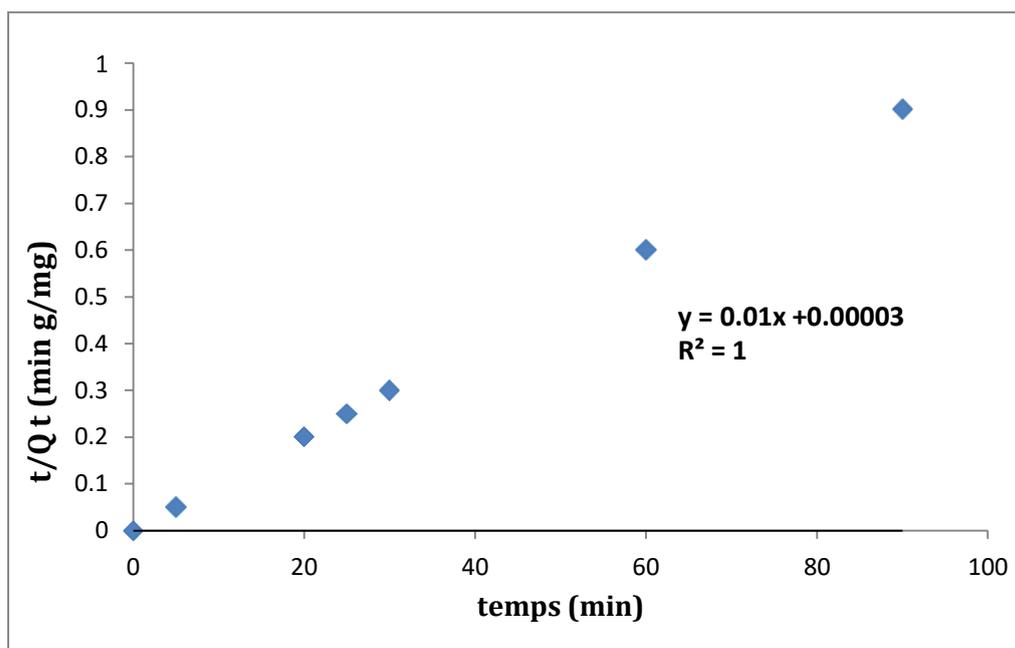


FIGURE 11 : Application du modèle de pseudo second ordre lors l'adsorption du bleu de méthylène par bentonite active

Tableau 7 : paramètre cinétique de modèle de pseudo 2eme ordre

qe (Ex) (mg .g-1)	qe (Cal) (mg. g-1)	k1 (g. mg ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	qe ²
99.84	100	3.33	1	10000

D'après le tableau IV. 1 et la figure IV.2, on remarque que l'adsorption du BM suit parfaitement le modèle second ordre ; le coefficient de détermination tendent vers 1.

L'effet de la dose du adsorbant :

La figure (IV.8) montre l'influence de la variation de la dose de chaque adsorbant sur le pouvoir d'adsorption de bleu de méthylène. Nous remarquons que la quantité adsorbée à l'équilibre est 99.83 mg/g qui correspond à (1 g/L)de adsorbant .

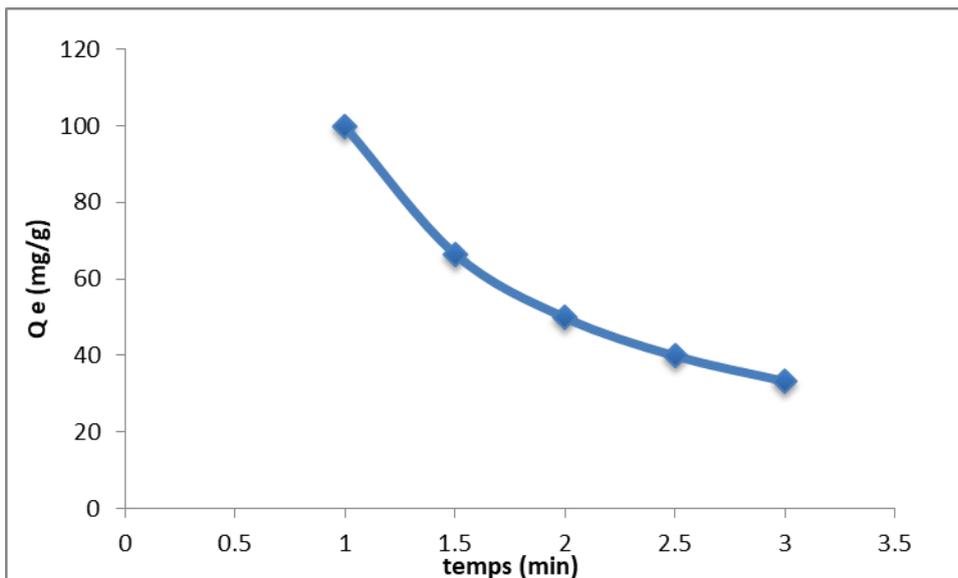


FIGURE 12 :Effet de la dose de la BA sur l'adsorption du bleu de méthylène

Conditions : V=50ml; C= 100mg/L; Vitesse d'agitation = 500 tr/min

Donc la meilleure quantité d'adsorption du BM est attribuée à une dose d'adsorbant égale à 1g/L pour bentonite activée.

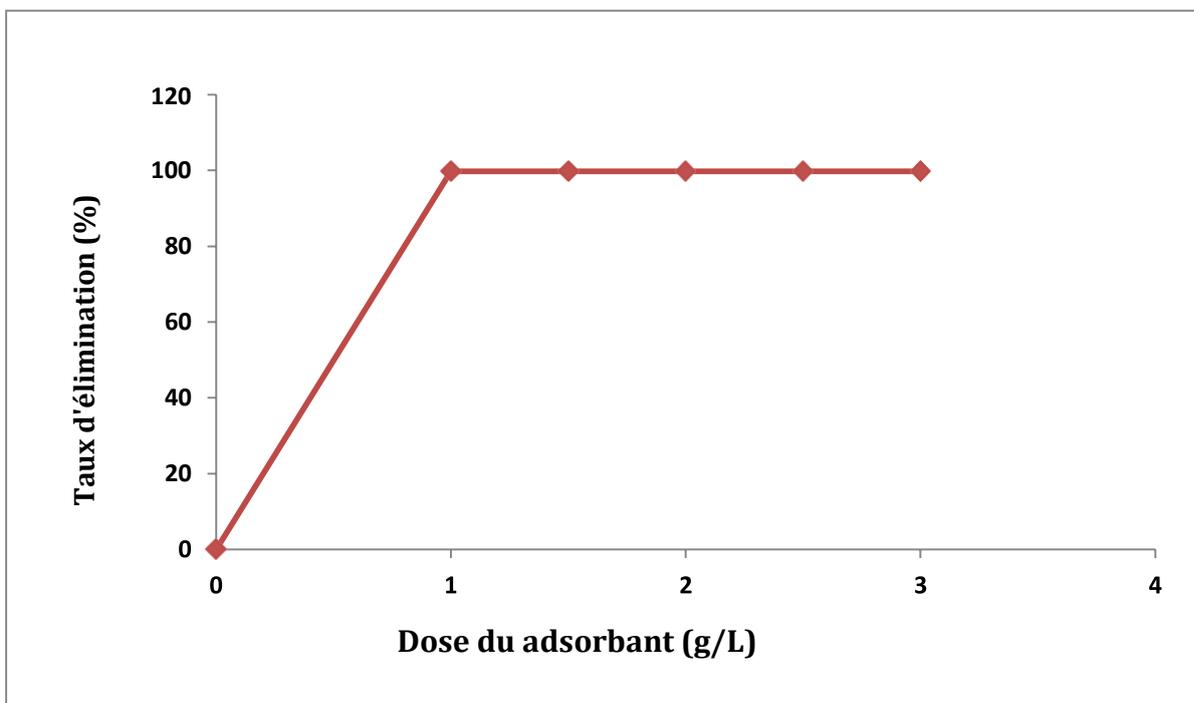


FIGURE 13 : Effet de la dose du BA sur l'adsorption du BM

Conditions : $V=50\text{ml}$; $C= 100\text{mg/L}$; Vitesse d'agitation = 500 tr/min.

La dose de l'adsorbant est l'un des paramètres qui affectent fortement sur le processus d'adsorption. L'effet de la dose de l'adsorbant a été étudié dans l'intervalle (1- 3)g L⁻¹ et l'évolution du taux d'élimination est représentée dans la Figure 13. Les résultats obtenus montrent que le taux d'élimination augmente progressivement avec l'augmentation de la dose de l'adsorbant, par contre la capacité d'adsorption diminue.

La meilleure taux élimination du bleu de méthylène est de 99.84 % à une dose optimale de 2 g/L

Effet du pH sur l'adsorption :

La figure (IV.10) montre l'effet de la différence de pH sur la capacité d'adsorption du bleu de méthylène. On remarque que la quantité absorbée ne change pas avec le changement du pH de la solution.

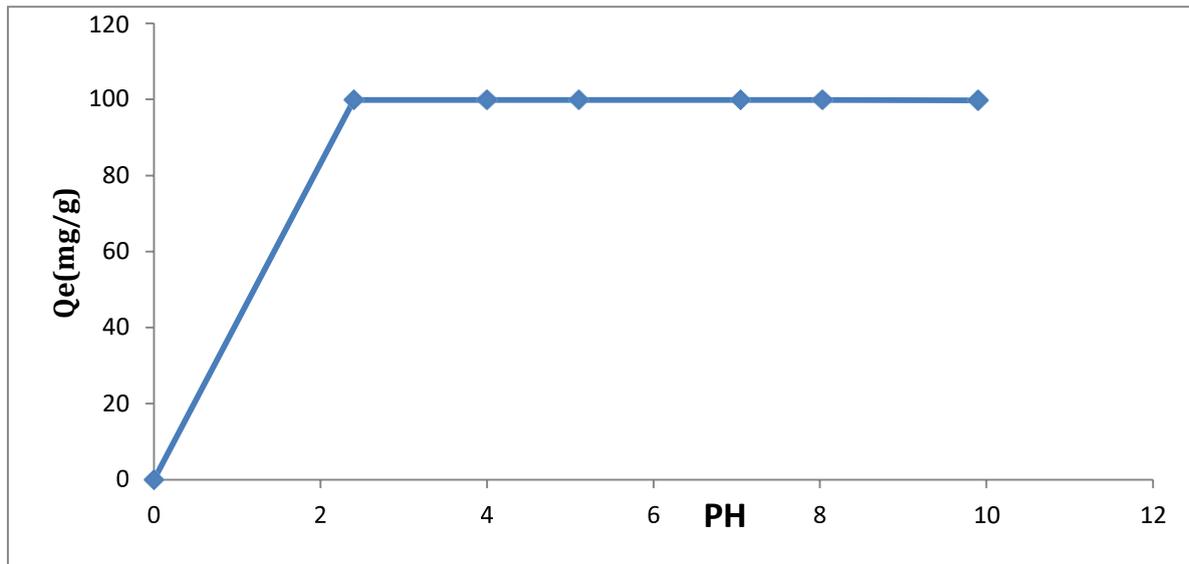


Figure 3 : Effet de pH de l'argile sur l'adsorption du bleu de méthylène
Conditions : V=50ml; La dose= 1.5g/L; Vitesse d'agitation = 500 tr/min T = 30min

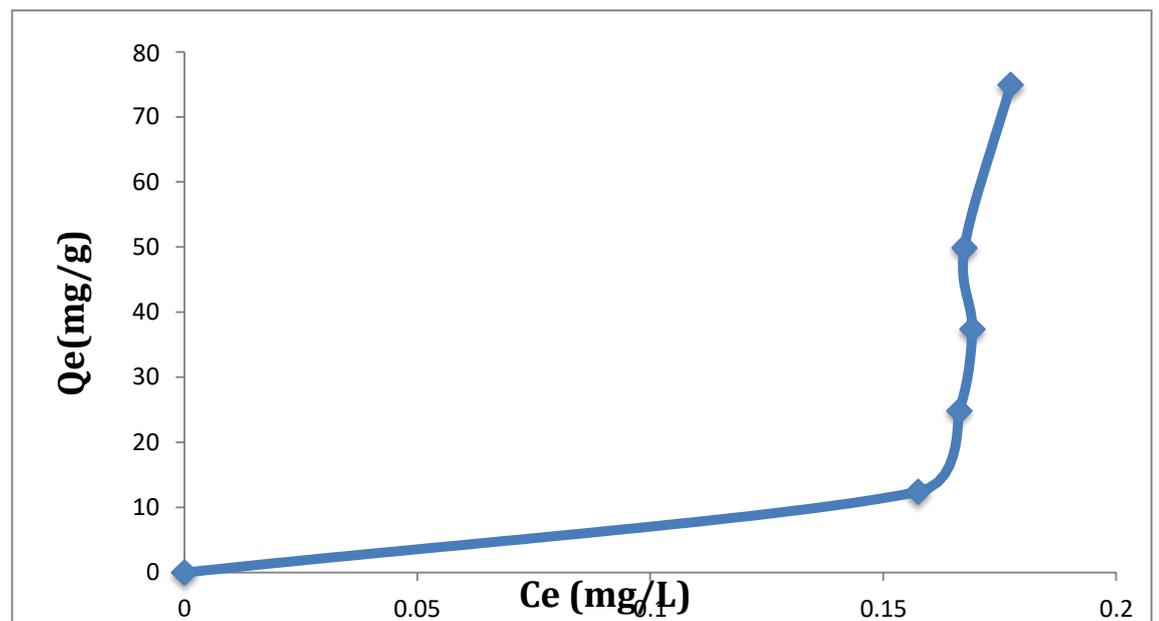
5.2.d Isothermes d'adsorption du colorant :

Afin d'évaluer la quantité adsorbée du colorant BM, une étude des isothermes d'adsorption a été réalisée pour des concentrations allant de 25 mg.L à 150 mg.L-1. La courbe de la figure VI.13 traduit l'isotherme d'adsorption à température ambiante.

- La figure ci-dessous montre que l'isotherme d'adsorption du bleu de méthylène sur la bentonite active qui est du type S

Tableau 8 :isotherme d'adsorption

Ci (mg/l)	Ce(mg/l)	Qe(mg/g)
25	0.157	24.842
50	0.166	49.833
75	0.169	74.830
100	0.167	99.832
150	0.177	149.822

**FIGURE 14 :isotherme d'adsorption du bleu de méthylène sur la bentonite active**

Conditions : V=50ml; La dose= 1.5g/L; Temps : 30 min Vitesse d'agitation = 500 tr/min

6. Discussion :

La courbe indique qu'à mesure que la concentration initiale en colorant augmente, la quantité adsorbée augmente verticalement vers une valeur non limitée et la concentration en équilibre reste presque constante, 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,

6.1 Modèle de Langmuir :

La forme linéaire de l'isotherme de Langmuir est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L}$$

La droite est obtenue en traçant C_e/q_e en fonction de C_e permet d'obtenir les valeurs de K_L et q_m , à partir de l'intersection avec l'ordonnée à l'origine et la pente de la droite $C_e/q_e = f(C_e)$ respectivement :

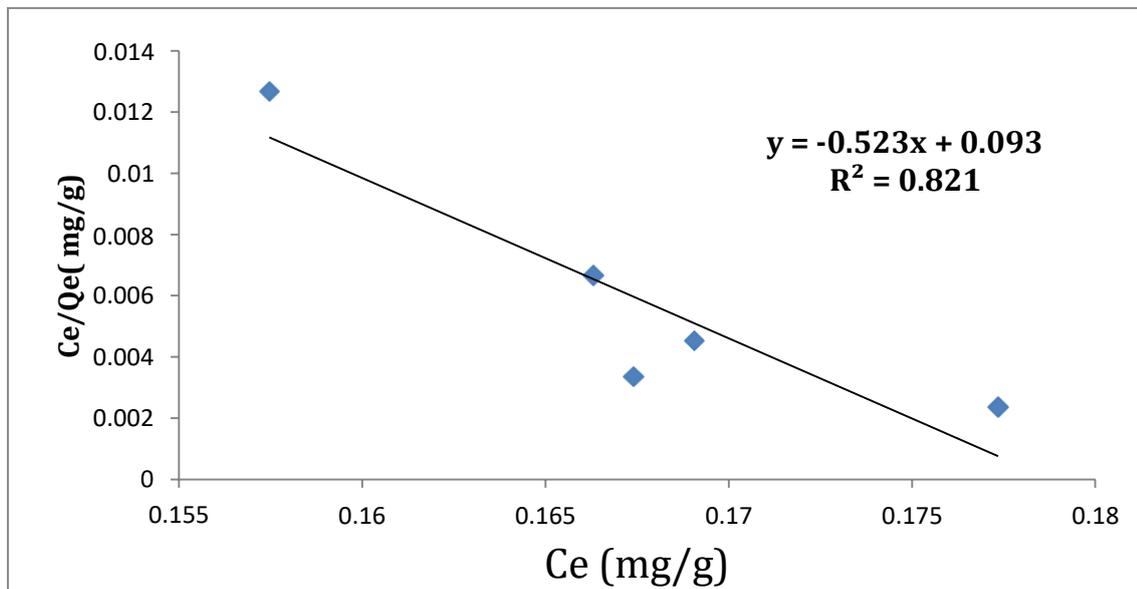


FIGURE 15 : Modélisation des isothermes d'adsorption par l'équation de Langmuir

6.2 Modèle de Freundlich :

La relation de Freundlich est souvent utilisée pour restituer graphiquement les données d'adsorption empirique dans une représentation graphique $\ln(Q_e)$ en fonction de $\ln(C_e)$.

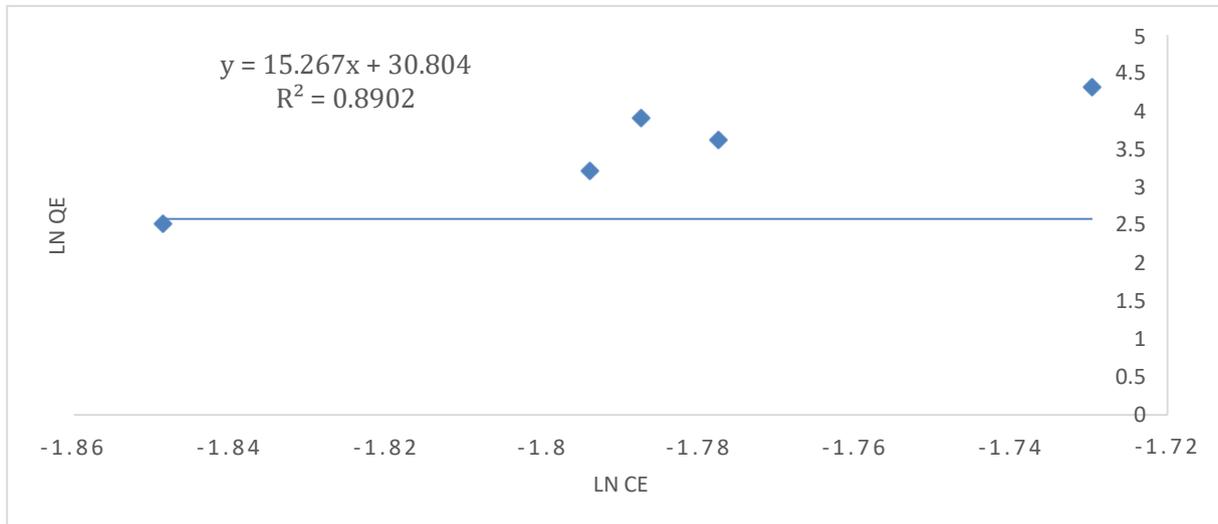


FIGURE 16 : Modélisation des isothermes d'adsorption par l'équation de Langmuir

Tableau 9 : Paramètres d'équilibres d'adsorption selon le modèle de Langmuir et celui de Freundlich.

Modèles					
Langmuir			Freundlich		
Q m	KL	R ²	Nf	Kf	R ²
-1.912	-5.623	0.821	0.0655308	30.8	0.89

D'après les résultats obtenus des deux modèles, on constate que le coefficient de détermination du modèle de Freundlich est supérieur à celui de Langmuir, et la valeur de n , inférieur à l'unité signifie que l'adsorption selon le modèle de Freundlich est favorable. La capacité d'adsorption calculée (Q_e cal) à partir du modèle de Langmuir est très loin de valeur obtenue expérimentalement (Q_e exp) Donc le modèle de

Freundlich décrit mieux nos isothermes expérimentales comparativement au modèle de Langmuir.

7 Spectroscopie Infrarouge (IR) :

La spectrométrie Infrarouge est l'un des outils les plus utilisés pour la caractérisation et l'identification des molécules organiques vu sa sensibilité aux molécules existantes et la rapidité de caractérisation

8 Principe de la méthode ;

La spectrométrie Infrarouge est la mesure de la diminution de l'intensité du rayonnement qui traverse un échantillon en fonction de la longueur d'onde, dont le rayonnement Infrarouge dispose suffisamment d'énergie pour stimuler les vibrations moléculaires à des niveaux d'énergie supérieure. En plus du mouvement de vibration, chaque molécule diatomique possède un mouvement de rotation, d'énergie moindre qui induit l'existence d'une structure fine des transitions .

Les spectres des poudres étudiés représentent soit leurs absorbances, soit leurs transmittances T_r , en fonction du nombre d'onde dans un domaine de 400cm^{-1} à 4000cm^{-1} .

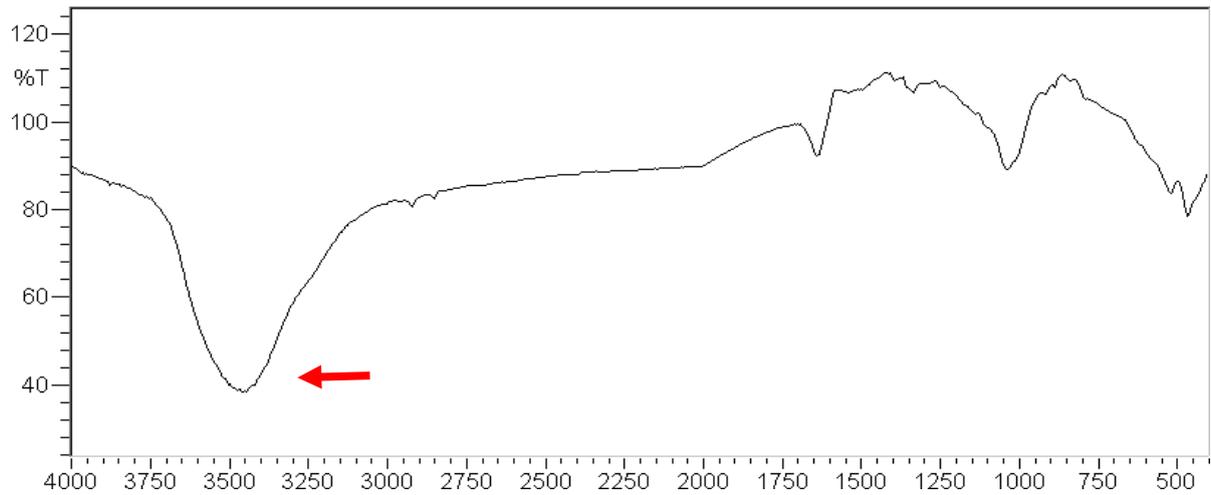


FIGURE 17 : Représente les spectres IR de notre échantillon (bentonite active) entre 500 et 4000 cm-1 .

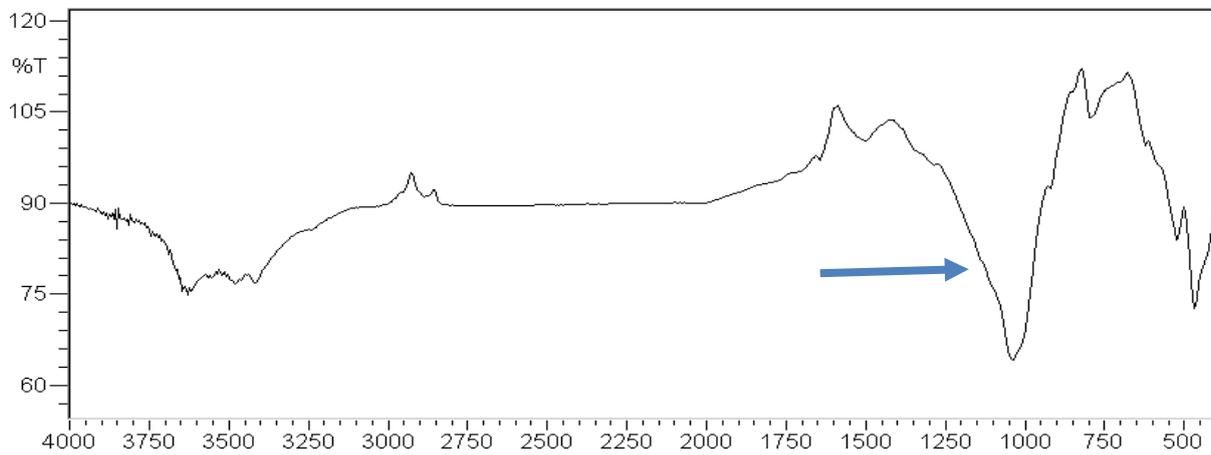


FIGURE 18 : Représente les spectres IR de notre échantillon bentonite +BM entre 500 et 4000 cm-1

Pour la bentonite active sans bleu de méthylène, on observe deux bandes d'absorption caractérisant les liaisons O-H situées respectivement entre 3200-3800 cm^{-1}

la bentonite active avec le bleu de méthylène, on observe une bande d'absorption caractérisant C-O et C-C et C-N situées respectivement entre 1000-1100 cm^{-1} et on observe absence de bande de liaison O-H

9. Conclusion Générale :

Notre objectif principal est tout simplement d'éliminer le polluant organique (Bleu de méthylène) de l'eau de mer par le procédé d'adsorption sur la bentonite active. Enfin de préserver les matériaux de la station de dessalement et protéger l'écosystème marin

Les paramètres considérés suite à une optimisation sont un ratio solide/solution: temps de contact à l'équilibre: 30 min qu'une masse de la bentonite active correspondant à une dose 2 g L⁻¹ est une masse optimale et la concentration initiale (100 mg L⁻¹), la quantité maximale adsorbé $Q_{\text{max}} = 99.83 \text{ mg/g}$ et taux d'élimination du bleu de méthylène est 99.84 %

On remarque la quantité maximale adsorbé n'est pas affectée par le changement de pH de solution (2 à 9.9) et la présence des sels n'affecte ni la capacité ni la cinétique de rétention du bleu de méthylène sur bentonite activée

Les résultats spectroscopiques (IR) utilisés confirment la structure bentonite active qui a BM adsorbé (cycle aromatique ; composé C-O).

Pour déterminer la vitesse et le mécanisme contrôlant le phénomène d'adsorption, deux modèles cinétiques ont été mis à contribution soient les modèles de pseudo-premier ordre, pseudo-second ordre et le modèle cinétique le plus adapté à la modélisation de la cinétique d'adsorption du polluant BM sur la bentonite activée est le modèle du pseudo-second ordre .

Les isothermes sont De type S d'après la classification de Giles et al.

Nous avons conclu de cette étude que la dose de bentonite (2g/L) et le temps de contact (30) min avec une température ambiante , la capacité d'adsorption de la bentonite activée pour le bleu de méthylène est très élevée

Références

Référence bibliographique chapitre 1:

- [1] : pierre Barthélémy, <>, sur Passeurs des sciences (consulté le 29 janvier 2022)
- [2] : <https://www.ade.dz>
- [3] : <https://www.aquaportail.com/definition-6142-eau-de-mer.html>
- [4] : <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/thermodynamique-chimique/le-dessalement-de-l-eau-de-mer-et-des-eaux>
- [5] : Capitaine Robert A. Pawlowski / NOAA (page consultée le 03/02/2022). Salinité : qu'est-ce que c'est ? Définition | Salinité | Futura Sciences (futura-sciences.com)
- [6] : (Calvé, 2002). (Page consulté le 01/03/2022). récupéré sur (<Http://isitv.univtln.fr/~lecalve/oceano/>)
- [7] : <https://www.aquaportail.com/definition-3739-alkalinite.html#:~:text=Par%20d%C3%A9finition%2C%20l'alkalinit%C3%A9%20est,pr%C3%A9cipitations%20ou%20des%20eaux%20us%C3%A9es.>
- [8] : Gérard Compin-Montegut. Techniques Ingénieur, 2002-Propriétés physiques de l'eau de mer
- [9] : R.A. HORNE << Marine chemistry the structure of water and the chemistry of the hydrosphere >> weley –interscience, 1969
- [10] : <https://www.aquaportail.com/definition-136-turbidite.html>
- [11] : COJAN ET RENARD M. (2003). Sédimentologie. Edition Dunod, France p136.
- [12] : B.HACHEMAOUI. (2014). « qualité physico-chimique de l'eau dessalée et traitée par la station de dessalement de l'eau de mer de souk tlata », Mémoire master, université de telemcen.p91.
- [13] : <http://traitementeaux.e-monsite.com/pages/introduction/>
- [14] : Philippe Beaulieu (page consultée le 17/03/2022). L'eau potable : sa définition, ses origines, ses critères de potabilité et ses traitements | Centre d'information sur l'eau (cieau.com)
- [15] : <https://www.cnrs.fr>
- [16] : <https://www.cieau.com/espace-enseignants-et-jeunes/les-enfants-et-si-on-en-apprend-plus-sur-leau-du-robinet/la-definition-de-leau-potable/>
- [17] : Maurel A, Dessalement de l'eau de mer des eaux saumâtres et d'autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Technique et Documentation 2^{ème} Edition (2006).

- [18] : LA CITE DE LA MER – Cherbourg, La mer à boire, Rapport Technopole CherbourgNormandie, 33p., Avril 2012
- [19] : B, CHENAOU, Dessalement de l'eau de mer à la station de MAINIS et son impact sur l'environnement, thèse d'ingénieur, Université de Chlef, 2010.
- [20] : Jean Dunglas, (2014), le dessalement de l'eau de mer une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau, l'Académie d'agriculture de France. PP 1
- [21] : <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/thermodynamique-chimique/le-dessalement-de-l-eau-de-mer-et-des-eaux>
- [22] : Publication- Copyright : libre, sous réserve de mentionner l'origine ARCEA/GASN supplément au journal « Uranie » de l'ARCEA/GIF N°ISSN 1637.4916- Dépôt légal : 2 semestres 2008. Fiche N° 32 Dessalement
- [23] : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/eau-dessalement-de-l-eau-de-mer/4-l-electrodialyse-a-membranes-selectives/>
- [24] : https://www.univ-chlef.dz/Uhbc/seminaires_2010/Article_Tahri_C13.pdf
- [25] : B. Dawoud, Y.H. Zurigat, B. Klitzing, T. Aldoss, G. Theodoridis, On the possible techniques to cool the condenser of seawater greenhouse, Desalination 195 (2006) 119140.
- [26] : LEGRAND L. et LEROY P. (1995) Prévention de la corrosion et de l'entartrage dans les réseaux de distribution d'eau. Ed. Cifec, p35

Référence bibliographique chapitre 2:

- [27] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/pollution/3-les-principales-causes-de-pollution/>
- [28] : Bouanimba. N. (2009) *Modélisation et optimisation de la cinétique de dégradation photo catalytique de polluants organiques en solution*, Mémoire de Magister, Université Frère Mentouri, Constantine, Algérie, présenté en : 2009.
- [29] : Benathmane, M., Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine (2005).
- [30] : Colour Index, Vol. 4, 3rdEd, The Society of Dyers and Colourists, Bradford, UK, 1971

[31] : Mr. Noureddine BARKA, Thèse : Grade de docteur ès science, UFR : physicochimie des Matériaux à caractères appliqués. L'élimination des colorants de synthèse par adsorption sur un phosphate nature et par dégradation photo catalytique sur TiO₂ supporté, Université IBN ZOHR (Faculté des sciences) AGDIR, 07/07/2008, P (7,8,9,17,18,19,20,21).

[32] : BOUSNOUBRA Ibtissem, Mémoire de Magister en chimie analytique et physique), Etude comparative de la photo dégradation du vert de Méthyle par Divers procédés photochimiques en milieu aqueux, Université Mentouri- Constantine, 08/12/2010,p(5,6).

[33] : Abdelmalk. F. (2003) *Plasma chimie des solutions aqueuses application à la dégradation de composés toxiques*, Thèse de Doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, Algérie, présenté en : 2003.

[34] : Cleenewerck, M. B. "CDMT, 59015 Lille Cedex, France." *Progrès en dermatologie: Lyon, 1999 5* (1999): 113.

[35] : Doré. M. (1989) *Chimie des Oxydants et Traitement des eux*, Technique et Documentation-Lavoisier, Paris.

[36] : Valette. C., Capon. M., and Courilleau-Haverlant. V. (1996) *Chimie des Couleurs et des Odeurs*, Cultures et Techniques, Berlin Springer.

[37] : Miocque. M., Combet-Farnoux. C., and Moskowitz. H. (1982) *Fonction Complexes, Molécules d'Intérêt Biologique - Abrégé de Chimie Organique*, Masson, Paris.

[38] : ZIDANI Leila, Thèse magister ; Etude de la dégradation de quatre colorants azoïques par photo-catalyse comparaison avec d'autres procédés d'oxydation avancés (POA), Université Batna, 2009.

[39] : Kebiche, O., Biodégradabilité, adsorbabilité et échange ionique de quelques colorants cationiques présents dans les effluents liquides de la teinturerie de l'unité couvertex de Ain.DJASSER. Thèse de Magistère Université Mentouri Constantine (1996).

[40] : Meink, F., Stoof, H., Kohschuter H., Les eaux résiduaires industrielles. Masson 2ème édition (1977)

[41] : Lederer, J., Encyclopédie de l'hygiène alimentaire Tome IV Edition Nauewelears. Malone S.A. Edition (1986).

[42] : Pagga, U., Brown, D., The degradation of dyestuffs: Part II Behaviour of dyestuffs in aerobic biodegradation tests, *Chemosphere* 15(4) (1986) 479-491.

[43] : Shirsath. S. R., Patil. A. P., Patil. R., Naik. J. B., Gogate. P. R., and Sonawane. S. H.

(2013), *Removal of brilliant green from wastewater using conventional and ultrasonically prepared poly (acrylic acid) hydrogel loaded with kaolin clay : A comparative study*, Ultrasonics Sonochemistry, 20(3), 914 – 923. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.11.010>

ultsonch.2012.11.010

[44] <https://sante.journaldesfemmes.fr/fiches-medicaments/2796787-bleu-methylene-indication-utilisation-danger-contre-indications/>

[45] : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-bleu-methylene-17006/>

[46] Saidi. F. Z. (2013), *Élimination du bleu de méthylène par des procédés d'oxydation avancée*, Mémoire de Magister, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, Présenté en : 2013.

Référence bibliographique chapitre 3

[47] L.NAIDJA, *Élimination des colorants orange en solution aqueuse, par voie photocchimique et par adsorption*, Constantine: Université de Mentouri, 2010.

[48] AMEN, *adsorption-définitions et explications*, Thechno-Science.net.

[49] Edeline, F. *L'épuration physico-chimique des eaux : théorie et technologie*; Liège Cebedoc Paris Lavoisier Tec & Doc, 1992.

[50] Rytwo, G.; Ruiz-Hitzky, E. J. *Therm. Anal. Calorim.* 2003, 71, 751. Doi:10.1023/A:1023309806214.

[51] Krishna, B. S.; Murty, D. S. R.; Jai Prakash, B. S. J. *Colloid Interface Sci.* 2000, 229, 230. doi:10.1006/jcis.2000.7015.

[52] (Sancey, 2011), *Développement de la bio-adsorption pour décontaminer des effluents de rejets industriels*, L'UFR des sciences & techniques de l'université de Franche-Comté, page 112 .

[53] Brasquet, C. et Le Cloirec, P. (1997). *Adsorption sur les ACF, applications aux traitements de l'eau et de l'air*. Carbone, 35 (9),1307-1313.

[54] Pavie, 1987 *Nouveaux développements dans l'utilisation de charbon actif en poudre Pour le traitement de l'eau potable*. L'eau, L'industrie, Les nuisances, (108).

[55] (Sedira, 2013) , *Open Journal of Inorganic Chemistry*, Vol.11 No.4, 26 octobre 2021

[56] S.Caillere., S.Henin., M.Rautureau., *Minéralogie des argiles*, 2 tomes, Masson, Paris, 1982.

[57] G. Millot, *Géologie des argiles*, Masson, Paris, 1964.

[58] *Association Internationale Pour l'Etude des Argiles*, Newsletter n°32, February 1996.

[59] M. Tatiana DIATTA., « Matière première argileuses du Sénégal : caractéristique et applications aux produits céramiques de grande diffusion », these de doctorat, Ecole Doctorale Sciences, Technologies et Ingénierie (ED-STI) & Ecole Doctorale, Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Energétique et Aéronautique (SI-MMEA), Université Assane Seck De Ziguinchor et l'Université De Limoges, Le 23 Mai 2016.

[60] Gangopadhyay S.: Engineering Geology; Oxford University Press India, (2013).

[61] : Melle GUENOUN Narimane & Melle GADA Sadia (2017) Activation de la Bentonite de Maghnia pour usage pharmaceutique. Thèse de master, chimie pharmaceutique, université mouloud mammeri de tizi-ouzou .2p

[62] H. Mohamed., « Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique » ,Mémoire de magister, Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur, Département de genie des procedes, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2007

[63]- Harrat M , « Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique étude sur site : unité Maghreb. » mémoire Master .

[64] N.BOUGDAH, Etude de l'adsorption de micropolluants organique sur la bentonite, mémoire de magisters Université 20 Août 55, Skikda 2007, pp 30-32.

[65] O. BOURAS, propriétés adsorbants d'argile pontées organophiles : synthèse et caractérisation, thèse de doctorat, université de Limoger, 2003, pp 23- 24

[66] F.BOUAZZA, Elimination des polluants organiques par des argiles naturelles et modifiées, mémoire de magistère, université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2012,pp 9-11.

[67] BOURAS O. (2003) propriétés adsorbants d'argiles pontées organophiles synthèse et caractérisation .Mém.Doctorat.Univ. LIMOGES.

[68] F.AL MARDINI, Etude de l'adsorption du pesticide Bromacil sur charbon actif en poudre en milieu aqueux effet compétiteur des matières organiques naturelles, thèse de doctorat, université de Poitiers, 2006, p 80.

[69] MAKHOUKHI B. 2008. Optimisation de l'activation acide de la bentonite et son application a la décoloration des huiles. Thèse Doctorat. Univ. Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.

[70] RUELLAN A, DELETANG J, Les phénomènes d'échange de cations et d'anions dans les sols, Orstom, Paris, 1983, 14, 123.

[71] J MERING, gonflement, dispersion et hydratation des argiles, Ints-Nations, de recherche chimiques appliquée, France, bull. Gr. Fr. Argiles, 1978, 14,115.

[72] DENG Y, WHITE G.N. DIXON J.B. effect of structural stress on the intercalation rate of Kaolinite, Journal of colloid and interface science, 2002,250, 379.

[73] MAILLOT G. Geologie des argiles : Altérations, Sédimentologie, géochimie, Masson et Cie, 1965, 47, 387.

[74] VELDE B. Introduction to clay minerals: chemistry, origins, uses and environmental significance, Chapman ET Hall, London, 1992, 35,256

[75] GILLOT E, JOHN W, Clay engeneering geology.1987, 81, 484.

[76] OZCANE A. Modification of bentonite with a cationic surfactant: An adsorption study of textile dye Reactive Blue 19. Journal of Hazardous Materials. 2007, 140, 173.

[77] DEMIRBAS A. Agricultural based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions: a review, J. Hazard. Mater. 2009,167, 1.

[78] LOPEZ-GALINDO A., VISERAS C. Pharmaceutical and cosmetic application of clays, In. Clay Surfaces, Fundamentals and Applications, Elsevier ; Amsterdam, 2004, 267

[79] LOPEZ-GALINDO A, VISERAS C, CEREZO P. Compositional, technical and safety specifications of clays to be used as pharmaceutical and cosmetic products. Applied Clay Science. 2007, 36, 51.

[80] : <https://www.erudit.org/fr/revues/rseau/2015-v28-n3-rseau02176/1034009ar/>

[81] : SUN L M, MEUNIER, 2007. Adsorption : aspects théoriques, techniques de l'ingénieur, J2 730.

[82] : CARDO C ,1999. Les traitements de l'eau : procédés physico-chimiques, cours et problèmes résolus. Elipses. Paris.

[83] E. Errais, Réactivité de surface d'argiles naturelles étude de l'adsorption de

colorants anioniques, Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg -Tunis ,2011.

[84] S.Benbou, Utilisation des argiles traitées pour la décoloration des bains de teinture,

Diplôme de Magister, Université M'Hamed Bougara- Boumerdes-Algérie, 2009.

[85] R. Calvet, M. Terce, J.C. Arvieu, Ann. Agron 31 , 385-427. 1980

[86] E.G. Dégréement, Polyamines adsorbées sur silice caractérisation physico-chimique

[87] Sadki, H.; Ziat, K.; Saidi, M. Adsorption d'un colorant cationique d'un milieu aqueux sur une argile locale activée. Journal of Materials and Environmental Science 5 (2014) 2060-2065

[88] Sahraoui, N.; Tassalit, D.; Chekir, N.; Brahimi, A.; Nouissi, S. Etude de l'adsorption de l'acétamipride par charbon actif synthétisé à partir d'un déchet de l'agro-alimentaire. Algerian Journal of Environmental Science and Technology 3 (2017) 62- 66.