

**Faculté des Sciences Exactes et d'Informatique**

**Département de chimie**

**Filière : chimie**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master en chimie

**Option : chimie appliquée**

THEME :

**Etude de l'effet de la bentonite activée dans  
le traitement de l'eau de mer avant et après le dessalement.**

Présenté par :

**Mr. Ayité Ambroise Mensah Fabrice Sitti**

Devant le jury composé de :

Président : Mr. Harrane

Examineur : Mr. Tabti charef

Encadreur : Mr. kadi AEK

Pr Université de Mostaganem

MCA Université de Mostaganem

MAA Université de Mostaganem

**Année Universitaire 2021-2022**

## REMERCIEMENT

Tout d'abord je tiens à remercier « DIEU » le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la force et la patience pour terminer ce modeste travail.

Je remercie aussi mon encadreur Mr. Kadi AEK, qui m'a dirigé dans ce travail et qui a cru en moi dès le départ pour la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également du jury qui ont acceptés de juger mon travail.

- ❖ Mr Harrane
- ❖ Mr. Tabti charef

Je remercie tous les gens qui ont contribué de près ou de loin dans ce modeste travail.

## 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 (Alexandre, Sandrine ; Didier) pour leurs appuis et leurs encouragements.

A toute la famille Sitti et Akué.

A mes amies de la cité universitaire (Hamza ; Zaoui ; Kader ; Aboubacar ; Gloire ; Mohamed ; zaid, Capece ; Lopez ; zébra ).

A la communauté des frères Maristes (Fr. xema ; Fr Bernard) de Mostaganem pour leurs services envers les étudiants étrangers.

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

## RÉSUMÉ

« Notre premier aliment et médicament est l'eau. » c'est ce qu'affirme le Docteur Thierry Hertoghe président de l'association mondiale de médecine anti-âge, en effet notre terre est constituée en grande par d'eau soit 98% de l'eau sur terre est de l'eau de mer. D ou la nécessité de l'étude des propriétés physico-chimique de l'eau de mer et de l'eau potable. Le problème que nous rencontrons est le taux élevé en sel dans l'eau de mer ce qui constitue un pathogène pour l'être humain et présente aussi un danger pour les matériels des stations de dessalement et aussi pour l'environnement En somme, l'option dessalement d'eau de mer nous semble la solution incontournable face à l'état de sécheresse que vit le pays. La préservation de l'environnement est au cœur des préoccupations des états et la réglementation se fait de plus en plus stricte en matière de gestion des rejets et exige des études d'impacts avant d'entamer n'importe quelle activité. Aujourd'hui le développement durable est une option incontournable pour la survie de la planète. Cette étude a pour objet de préserver l'écosystème littorale contre la salinité croissante à cause des rejets de dessalement (saumure) en réduisant la concentration de cette dernière et afin de lutter contre certains phénomènes biologiques tel que l'eutrophisation en procédant la technique d'adsorption par la bentonite.

## ABSTRACT

Our first food and our first medicine is water," says Dr Thierry Hertoghe, president of the World Association of Anti-Aging Medicine. 98% of the water on earth is seawater. Hence the need to study the physical and chemical properties of seawater and drinking water. The problem we face is the high level of salt in seawater, which is a pathogen for human beings and also presents a danger for the materials of desalination plants and also for the environment. In sum, the option of seawater desalination seems to us to be the inescapable solution to the state of drought that the country is experiencing. The preservation of the environment is at the heart of the States' concerns and regulations are increasingly strict in terms of waste management and require impact studies before starting any activity. Today, sustainable development is an unavoidable option for the survival of the planet. This study aims to preserve the coastal ecosystem against the increase in

salinity due to desalination (brine) discharges by reducing the concentration of the latter and to combat certain biological phenomena such as eutrophication by using the bentonite adsorption technique.

## ملخص

، غذائنا ودوائنا الأول هو الماء». هذا ما يقوله الدكتور تييرى هيرتوغ، رئيس الجمعية العالمية لطب مكافحة الشيخوخة» لأن أرضنا تتكون إلى حد كبير من المياه، أي 98% من مياه البحر على الأرض. دال - الحاجة إلى دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية لمياه البحر ومياه الشرب. المشكلة التي نواجهها هي ارتفاع مستوى الملح في مياه البحر، وهو عامل ممرض للبشر وأيضاً خطر على معدات محطة تحلية المياه وكذلك على البيئة. يبدو لنا خيار تحلية مياه البحر هو الحل الأساسي في مواجهة حالة الجفاف التي يعاني منها البلد. يعد الحفاظ على البيئة في صميم اهتمامات الولايات وتصبح اللوائح أكثر صرامة من حيث إدارة التصريفات وتتطلب دراسات التأثير قبل بدء أي نشاط. إن التنمية المستدامة اليوم خيار أساسي لبقاء كوكب الأرض. الغرض من هذه الدراسة هو الحفاظ على النظام الإيكولوجي الساحلي من زيادة الملوحة بسبب تصريفات تحلية المياه (المحلول الملحي) الذي يقلل من تركيز هذا الأخير ومن أجل مكافحة بعض الظواهر البيولوجية مثل الإغناء بالمغذيات من خلال تنفيذ تقنية الامتزاز بواسطة البنتونيت.

# LISTES DES TABLEAUX

Tableau	page
---------	------

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

<i>Tableau I-1 : Concentration des éléments principaux pour une eau de mer de salinité de 35% [6] .....</i>	<i>6</i>
<i>Tableau I-2 : concentration salinité moyenne des eaux des mers et océans [10].....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau I-3 : tableau des substances minérale et organique qu'on trouve généralement dans les eaux [19].....</i>	<i>13</i>

## ***Chapitre 2 : Généralité sur l'adsorption et la conductivité***

<i>Tableau II-1 : Critères de distinction entre l'adsorption physique et chimique [39]...</i>	<i>35</i>
<i>Tableau II-2: quelques adsorbants leurs sources et leurs applications .....</i>	<i>37</i>

## ***Chapitre 3 : Généralité sur la bentonite***

<i>Tableau III-1 : tableau simplifié montrant la classification des principaux groupes de minéraux [55] .....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau III-2 : Analyse chimique de la bentonite naturelle [61] .....</i>	<i>65</i>

## ***Chapitre 4 : partie expérimentale***

<i>Tableau IV-1:tableau des matériels et appareillage .....</i>	<i>69</i>
<i>Tableau IV-2: tableau réactifs utilisées.....</i>	<i>69</i>
<i>Tableau IV-3:composition chimique de la bentonite de Maghenia.....</i>	<i>70</i>
<i>Tableau IV-4 : résultats des analyses du paramètres de taux d'activation.....</i>	<i>72</i>
<i>Tableau IV-5: variation de <math>pH_f</math>-<math>pH_i</math> en fonction de <math>pH_i</math> .....</i>	<i>76</i>
<i>Tableau IV-6 : les conditions opératoires du processus d'adsorption de la saumure.....</i>	<i>78</i>

<i>Tableau IV-7: résultats d'analyse du paramètre du temps de contact sur l'adsorption de la saumure.....</i>	<i>80</i>
<i>Tableau IV-8 : effet du temps de contact sur l'adsorption de la saumure .....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau IV-9 : effet du temps de contact sur le taux d'élimination dans l'adsorption de la saumure .....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau IV-10 : les résultats de modèle cinétique du premier ordre .....</i>	<i>83</i>
<i>Tableau IV-11 : les résultats de modèle cinétique du second ordre.....</i>	<i>84</i>
<i>Tableau IV-12 : paramètres cinétiques de l'adsorption de la saumure sur la bentonite de Maghenia. ....</i>	<i>85</i>
<i>Tableau IV-13: résultats d'analyse du paramètre de masse de bentonite.....</i>	<i>86</i>
<i>Tableau IV-14 : effet de la masse dans l'adsorption de la saumure .....</i>	<i>87</i>
<i>Tableau IV-15 : isotherme d'adsorption .....</i>	<i>89</i>
<i>Tableau IV-16 : Les paramètres équationnels du modèle Langmuir .....</i>	<i>90</i>
<i>Tableau IV-17 Les paramètres équationnels du modèle Freundlich.....</i>	<i>92</i>
<i>Tableau IV-18 : tableau présentatif des paramètres des modèles (Langmuir et Freundlich).....</i>	<i>93</i>
<i>Tableau IV-19 : résultats d'analyse du paramètre de la température dans l'adsorption de la saumure.....</i>	<i>94</i>
<i>Tableau IV-20 : Effet de la température sur l'adsorption de la saumure .....</i>	<i>95</i>
<i>Tableau IV-21 : influence de la température sur l'adsorption de la saumure .....</i>	<i>97</i>
<i>Tableau IV-22 : valeurs des paramètres thermodynamiques de l'adsorption de la saumure sur la bentonite .....</i>	<i>98</i>
<i>Tableau IV-23 : Les valeurs des paramètres chimique et physico-chimique de l'eau de mer avant et après l'adsorption.....</i>	<i>99</i>
<i>Tableau IV-24 : Les valeurs des paramètres chimique et physico-chimique de l'eau de saumure (ER) avant et après l'adsorption.....</i>	<i>100</i>
<i>Tableau IV-25 : la comparution de conductivité dans chaque année .....</i>	<i>100</i>

# LISTES DE FIGURES

Figures	page
---------	------

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

<i>Figure I-1: Mer Méditerranée .....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I-2 : salinité de l'eau de mer [9].....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I-3: : Schéma générale d'une installation de dessalement .....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I-4 : Le procédé de Coagulation – Flocculation [25].....</i>	<i>20</i>
<i>Figure I-5 : principaux procédés industriels de dessalement .....</i>	<i>21</i>
<i>Figure I-6: Principe de l'osmose inverse [22].....</i>	<i>22</i>
<i>Figure I-7: Osmose et osmose inverse [33].....</i>	<i>23</i>
<i>Figure I-8 : Description d'un module spiralé d'osmose inverse.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure I-9:Principe de fonctionnement de l'électrodialyse .....</i>	<i>25</i>
<i>Figure I-10 : principe de la distillation simple.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure I-11:Principe de fonctionnement d'un système par détente successives (MSF) à 3 étages [33] .....</i>	<i>27</i>
<i>Figure I-12 : Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED)</i>	<i>28</i>

## **Chapitre 2 : Généralité sur l'adsorption et la conductivité**

<i>Figure II-1 : différence adsorption physique et adsorption chimique .....</i>	<i>35</i>
<i>Figure II-2 : domaines d'existence d'un soluté lors de l'adsorption sur un matériau microporeux .....</i>	<i>36</i>
<i>Figure II-3:classification des allures des isothermes d'équilibre d'adsorption selon leur allure (Giles et Smith, 1974).....</i>	<i>41</i>
<i>Figure II-4:Représentation schématique du recouvrement mono-moléculaire d'une surface.....</i>	<i>43</i>



<i>Figure II-5: Représentation de l'isotherme de LANGMUIR.</i>	44
<i>Figure II-6: Représentation linéaire de l'isotherme de LANGMUIR.</i>	45
<i>Figure II-7 : Allure de la courbe d'isotherme de Freundlich</i>	46
<i>Figure II-8: Evaluation graphique des constantes d'adsorption de modèle de Freundlich.</i>	47
<i>Figure II-9: Migration des ions en solution</i>	53

### **Chapitre 3 : Généralité sur la bentonite**

<i>Figure III-1: Structure de tétraèdre siliceux [56]</i>	59
<i>Figure III-2 : Structure d'octaèdre alumineux [56]</i>	60
<i>Figure III-3: Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicates 2/1</i>	60
<i>Figure III-4: Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux [58]</i>	62
<i>Figure III-5: La structure d'une montmorillonite (d'après Grim, 1968).</i>	64

### **Chapitre 4 : Partie expérimentale**

<i>Figure IV-1: la bentonite de Maghenia</i>	70
<i>Figure IV-2: la décantation à l'air libre.</i>	71
<i>Figure IV-3 : filtration de la bentonite</i>	71
<i>Figure IV-4 : activation de la bentonite</i>	72
<i>Figure IV-5 : effet du taux d'activation dans l'adsorption de la saumure</i>	73
<i>Figure IV-6 courbe de variation de <math>pH_f - pH_i</math> en fonction de <math>pH_i</math></i>	77
<i>Figure IV-7 : représentation graphique de l'effet de la masse dans l'adsorption de la saumure</i>	80
<i>Figure IV-8 : graphique de la quantité de sel adsorbé en fonction du temps de contact dans l'adsorption de la saumure</i>	82
<i>Figure IV-9 : graphique du taux d'élimination en fonction du temps de contact dans l'adsorption de la saumure</i>	82
<i>Figure IV-10 : représentation graphique du modèle cinétique du premier ordre</i>	83

<i>Figure IV-11 : représentation graphique du modèle cinétique du second ordre .....</i>	<i>84</i>
<i>Figure IV-12 représentation graphique de l'effet de la masse dans l'adsorption de la saumure .....</i>	<i>86</i>
<i>Figure IV-13 : effet de la masse de bentonite active en fonction de la quantité de sel adsorbé (<math>Q_e</math>) et du taux d'élimination (<math>R\%</math>) sur l'adsorption de la saumure.....</i>	<i>88</i>
<i>Figure IV-14 : isotherme de Langmuir .....</i>	<i>91</i>
<i>Figure IV-15 : isotherme de freundlich .....</i>	<i>92</i>
<i>Figure IV-16 : représentation graphique de l'effet de la température dans l'adsorption de la saumure.....</i>	<i>94</i>
<i>Figure IV-17 : Effet de la température sur l'adsorption de la saumure .....</i>	<i>97</i>
<i>Figure IV-19 : influence de la température sur l'adsorption de la saumure .....</i>	<i>97</i>

## LISTES DES ABRÉVIATIONS

Symboles	Significations	Unités
$\Delta S$	Entropie standard	J/mol
$\Delta H$	Enthalpie standard	KJ/mol
<b>P</b>	Densité apparente	g/ml
<b>T</b>	Température	°c
<b>K</b>	Conductivité	ms/cm
<b>G</b>	Conductance	Siemens
$\epsilon$	Porosité	
<b>R</b>	Constante des gaz parfaits	J/mol. K
<b>Q</b>	Capacité d'adsorption	mg/g
$K_d$	Constante de distribution	
<b>Qe</b>	Capacité d'adsorption à l'équilibre	mg/g
<b>Ce</b>	Concentration à l'équilibre du soluté en solution	mg/l
<b>Qt</b>	Quantité d'adsorbat par gramme d'adsorbant a un temps t	mg/g
$K_f$ et <b>n</b>	Constantes de Freundlich caractéristiques de l'efficacité d'un Adsorbant donné vis-à-vis d'un soluté donné.	
$K_L$	La constante de Langmuir	
<b>R%</b>	Taux d'élimination	
<b>K1</b>	Constante de vitesse d'adsorption de premier ordre	1/min
<b>K2</b>	Constante de vitesse pour une cinétique du deuxième ordre	1/min

# SOMMAIRE

Titres	page
--------	------

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> -----	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : Généralité sur l'eau de mer et le dessalement</b> -----	<b>3</b>
<b>Partie 1 : L'eau de mer</b> -----	<b>4</b>
<b>I. Introduction</b> -----	<b>4</b>
I.1 Définition de l'eau de mer-----	5
I.2 Les compositions chimiques de l'eau de mer-----	5
I.3 Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer-----	6
I.3.1 Les caractéristiques chimiques-----	6
I.3.1.a Salinité-----	6
I.3.1.b Alcalinité-----	9
I.3.2 Les caractéristiques physiques-----	9
I.3.2.a Les températures-----	9
I.3.2.b Le PH-----	10
I.3.2.c La Masse volumique-----	10
I.3.2.d La viscosité-----	10
I.3.2.e La turbidité-----	11
<b>Partie 2 : L'eau potable</b> -----	<b>11</b>
I.4 Introduction sur l'eau potable-----	11
I.4.1 Définition de l'eau potable-----	11
I.4.2 Définition de l'eau non potable-----	12
I.4.3 Eau du robinet : D'où vient-elle ?-----	12
I.4.4 Composition chimique-----	12
I.4.5 Les critères de potabilité de l'eau [16]-----	14
I.4.6 Les paramètres physico-chimiques :-----	14
I.4.6.a Les paramètres organoleptiques :-----	14
I.4.6.b Les paramètres microbiologiques :-----	14
I.4.6.c Les paramètres liés aux substances indésirables :-----	15
I.4.6.d Les micropolluants Les paramètres liés aux substances toxiques :-----	15
I.4.7 Comment l'eau est-elle traitée avant d'arriver jusqu'à nos robinets ? [16]---	15
<b>Partie 3 : Le dessalement</b> -----	<b>17</b>
I.5 Introduction sur le dessalement-----	17
I.5.1 Définition du dessalement-----	17

<i>I.5.2 Les principes de dessalement [10]</i>	17
<i>I.5.2.a Captation de l'eau de mer</i>	18
<i>I.5.2.b Le prétraitement</i>	19
<i>I.5.2.c Les procédés de dessalement</i>	21
<i>I.5.2.d Les procédés membranaires</i>	21
<i>I.5.2.d.i L'osmose inverse</i>	22
<i>I.5.2.d.ii L'électrodialyse</i>	24
<i>I.5.2.e Les procédés par distillation [30]</i>	26
<i>I.5.2.e.i Distillation à simple effet</i>	26
<i>I.5.2.e.ii Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF).</i>	26
<i>I.5.2.e.iii Distillation à multiples effets (MED)</i>	27
<i>I.5.2.f Inconvénients et avantages liés au dessalement</i>	28
<i>I.5.2.f.i Les inconvénients</i>	28
<i>I.5.2.f.ii L'impact du dessalement sur l'environnement</i>	30
<i>I.5.2.f.iii Les avantages [37]</i>	31

## **CHAPITRE 2 : généralité sur l'adsorption et la conductivité ----- 32**

### **Partie 1 : l'adsorption ----- 33**

<b>II. Introduction</b>	<b>33</b>
<i>II.1 Définition</i>	33
<i>II.2 Types d'adsorption</i>	33
<i>II.2.1 Adsorption physique</i>	33
<i>II.2.2 Adsorption chimique</i>	34
<i>II.3 Description de mécanisme de l'adsorption</i>	35
<i>II.4 Adsorbants</i>	36
<i>II.4.1 Définition</i>	36
<i>II.4.2 Quelques types d'adsorbants et leurs applications</i>	37
<i>II.4.3 Critère de la bonne qualité de l'adsorbant [39]</i>	38
<i>II.5 Facteur influençant le phénomène d'adsorption</i>	39
<i>II.5.1 Nature et structure de l'adsorbant</i>	39
<i>II.5.2 L'influence de l'adsorbat</i>	39
<i>II.5.3 Effet de la température</i>	39
<i>II.5.4 Effet du Ph</i>	39
<i>II.5.5 Effet de la surface superficiel</i>	40
<i>II.5.6 Effet de la porosité de l'adsorbant</i>	40
<i>II.5.7 Effet de la polarité</i>	40
<i>II.5.8 Effet de la solubilité de l'adsorbat</i>	40
<i>II.6 Isotherme d'adsorption</i>	41
<i>II.6.1 Définition d'isotherme d'adsorption [39]</i>	41
<i>II.6.2 Classification des isothermes d'adsorption</i>	41
<i>II.6.3 Modèles d'isothermes d'adsorption</i>	43

II.6.3.a	Modèles de Langmuir [39]	43
II.6.3.b	Modèles de Freundlich [39]	46
II.6.3.c	Modèle Isotherme B. E. T. (BRUNAUER, EMMET et TELLER)	47
II.6.4	Cinétique d'adsorption	48
II.6.4.a	Modèle de pseudo premier ordre	48
II.6.4.b	Modèle de la cinétique du pseudo- second ordre	49
II.6.5	Thermodynamique d'adsorption	49
II.6.6	Capacité d'adsorption	50
II.6.7	Application d'adsorption	51
II.6.8	Utilisation d'adsorption	51
<b>Partie 2</b>	<b>la conductivité</b>	<b>52</b>
II.7	Introduction	52
II.7.1	Définition de conductivité	52
II.7.2	Mesurer la conductivité	53
II.7.3	La solution conductrice	53
II.7.4	Dissociation Electrolytes forts & Electrolytes faibles	54
II.7.5	Définition des termes utilisés	54
II.7.5.a	Conductance	54
II.7.5.b	Résistivité	54
II.7.5.c	La constante de cellule	55
II.7.5.d	Conductivité	55
II.7.5.e	Etalon de conductivité	55
II.7.5.f	TDS (Total Dissolved Solids)	55
II.7.5.g	Facteur TDS	55
II.7.5.h	Salinité	56
II.7.5.i	Le conductimètre	56
<b>CHAPITRE 3</b>	<b>generalité sur la bentonite</b>	<b>57</b>
<b>III.</b>	<b>Introduction</b>	<b>58</b>
III.1	Les argiles	58
III.1.1	Définition	58
III.1.2	Structures des argiles	59
III.1.3	Classification des argiles	61
III.2	Les propriétés physico-chimiques des argiles	62
III.3	Les argiles montmorillonitiques (les Bentonites)	63
III.3.1	Origine de la bentonite	63
III.3.2	Type de bentonite	63
III.3.2.a	Bentonites sodiques	63
III.3.2.b	Bentonites calciques	63
III.3.2.c	Bentonite de potassium	63
III.3.3	Bentonite activée	64
III.3.4	Structures de la bentonite	64

III.3.5	<i>Composition chimique de la bentonite</i>	65
III.3.6	<i>Propriétés physico-chimiques de la bentonite</i>	65
III.3.6.a	<i>Capacité d'échange cationique (CEC)</i>	65
III.3.6.b	<i>Gonflement</i>	66
III.3.6.c	<i>Dispersion</i>	66
III.3.6.d	<i>Floculation</i>	66
III.3.6.e	<i>Colloïdalité</i>	66
III.3.6.f	<i>Surface spécifique</i>	66
III.3.7	<i>Utilisations de la bentonite</i>	67
<b>CHAPITRE 4 : partie expérimentale</b>		<b>68</b>
IV.	<b>Objectif</b>	<b>69</b>
IV.1	<i>Matériels et méthodes</i>	69
IV.1.1	<i>Matériels et appareillage</i>	69
	<i>Matériels</i>	69
	<i>Appareillage</i>	69
IV.1.2	<i>Réactifs utilisés</i>	69
IV.2	<i>Méthodologie de travail</i>	69
IV.2.1	<i>Choix de la bentonite</i>	69
IV.2.2	<i>Purification de la bentonite</i>	70
IV.2.3	<i>Activation de la bentonite</i>	72
IV.2.4	<i>Caractérisation de la bentonite active</i>	73
IV.2.4.a	<i>Mesure de la densité apparente</i>	73
IV.2.4.b	<i>Mesure de la porosité</i>	73
IV.2.4.c	<i>Mesure du taux d'humidité</i>	74
IV.2.4.d	<i>Mesure du ph de suspension</i>	75
IV.2.4.e	<i>Mesure de la conductivité</i>	75
IV.2.4.f	<i>Indice de l'iode</i>	75
IV.2.4.g	<i>Point de charge zéro (PZC) de la bentonite</i>	76
IV.2.5	<i>Optimisation des conditions d'adsorption</i>	77
IV.3	<i>Résultats et discussions</i>	79
IV.4	<i>Etude fondamentale d'adsorption sur la bentonite active selon les différents paramètres</i>	79
IV.4.2	<i>Paramètre de temps de contact</i>	79
IV.4.2.a	<i>Effet du temps de contacts</i>	79
IV.4.2.b	<i>Modèle cinétique du pseudo premier ordre</i>	83
IV.4.2.c	<i>Modèle cinétique du pseudo second ordre</i>	84
IV.4.3	<i>Paramètre de masse de bentonite active</i>	85
IV.4.3.a	<i>Effet de la masse</i>	85
IV.4.4	<i>Etablissement des isothermes d'adsorption</i>	88
IV.4.5	<i>Modélisation des résultats expérimentaux</i>	90
IV.4.5.a	<i>Le modèle de Langmuir</i>	90
IV.4.5.b	<i>Le modelé de Freundlich</i>	92

<i>IV.4.6</i>	<i>Paramètre de température</i>	93
<i>IV.4.6.a</i>	<i>Effet de la température</i>	93
<i>IV.4.7</i>	<i>Modèle thermodynamique</i>	97
<i>IV.4.8</i>	<i>Résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau de mer et de la saumure</i>	98
<b>CONCLUSION GENERALE</b>		<b>101</b>



# **Introduction générale**

# INTRODUCTION GENERALE

L'eau est abondante sur terre, elle représente 1380 millions de km<sup>3</sup>. L'essentiel toutefois est constitué d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,15 %) qui sont inutilisables directement. L'eau douce, facilement disponible sont les cours d'eau des (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), mais ne représente que 0,07 % de la ressource totale soit environ un million de km<sup>3</sup>. Mais la répartition de cette eau est très inégale. En effet, dix pays se partagent 60 % des réserves d'eau douce et vingt-neuf autres principalement en Afrique et au Moyen-Orient, sont au contraire confrontés à une pénurie chronique d'eau douce. C'est dans cette logique que les stations de dessalement des eaux s'inscrivent puisqu'elles permettent de produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer ou d'eaux saumâtres grâce à des techniques particulières

Le dessalement de l'eau de mer permet notamment : d'augmenter la ressource en eau douce disponible, de fournir une solution en cas de sécheresse et de faire face aux situations de pénuries et de crises

Le principe du traitement par adsorption est de fixation des polluants par un matériau solide appelé adsorbant. Il existe plusieurs matériaux solides pouvant être utilisés dans des procédés de purification des eaux (argiles, zéolites, biomasses, charbon actif...) L'utilisation de la bentonite dans le processus d'adsorption comme adsorbant est largement utilisée, due à sa haute capacité d'adsorption, sa grande surface spécifique et sa structure microporeuse.

Notre objectif principal dans ce projet d'étude est tout simplement de diminuer la concentration en sel de l'eau de mer et de la saumure par le procédé d'adsorption sur la bentonite active. Dans le but de préserver les matériaux de la station de dessalement et de protéger l'écosystème marin

Dans ce cadre, nous appuyons principalement sur la bentonite active les étapes de base de notre travail sont : Etudier l'influence de quelques paramètres tels que : (le taux d'activation, le temps de contact, la masse d'adsorbant, la température) sur le pouvoir d'adsorption de la bentonite active vis-à-vis de la saumure, aussi établir et modéliser les isothermes et la cinétique d'adsorption

. La structure de notre mémoire est organisée comme suit :

**Chapitre I** : généralité sur l'eau de mer et le dessalement

# Introduction générale

---

**Chapitre II** : généralité sur l'adsorption et la conductivité

**Chapitre III** : généralité sur la bentonite

**Chapitre IV** : Partie expérimentale

# **Chapitre 1**

**Généralité sur l'eau de mer et le dessalement**

## Partie 1 : L'eau de mer

### I. Introduction

Notre terre est constituée en grande par d'eau soit 98% de l'eau sur terre est de l'eau de mer. Les océans et mers occupent un volume estimé à 1338 millions de  $km^3$ , ce qui représente 96.5% des réserves d'eau présentes à la surface de la terre. Ce volume n'inclut pas l'eau souterraine dont 85% sont salées à différents degrés [1]. L'eau de mer n'est pas potable, et en générale ne doit pas être bue par les êtres humains. Le sel en est responsable : si l'on boit de l'eau de mer à long terme la quantité d'eau nécessaire pour éliminer ces sels (grâce aux reins) devient supérieure à la quantité d'eau gagnée pour absorption d'eau de mer [2]. Le taux de chlorure de sodium dans le sang humain et dans l'urine se situe généralement autour de neuf grammes par litre (0.9% en masse) un taux qui varie peu. Boire de l'eau de mer (dont le taux de sel est de 3.5%) accroît temporairement la concentration de sel dans le sang ce sel doit être éliminé ce qui se fait en utilisant de l'eau provenant des cellules pour uriner. Les cellules finissent par mourir de déshydratation suivies par les organes et finalement le corps entier [3]. De manière générale la santé de l'Homme est altérée si l'eau dont ils disposent est de mauvaise qualité ou bien si elle est polluée par des agents pathogènes [4]. « Notre premier aliment et médicament est l'eau. » c'est ce qu'affirme le Docteur Thierry Hertoghe président de l'association mondiale de médecine anti-âge, d'où la nécessité de l'étude des propriétés physico-chimiques de l'eau de mer et de l'eau potable.



Figure I-1: Mer Méditerranée

## I.1 Définition de l'eau de mer

L'eau de mer est l'eau salée des milieux marins et océaniques. L'eau de mer présente une grande concentration de sels dissous. Sa salinité varie à la surface du globe terrestre, en fonction de la latitude, de l'ouverture des mers vers les océans, de leurs dimensions, des apports terrestres, des courants. La concentration en sels minéraux dissous dans l'eau de mer avoisine 30 à 40 g de sels dissous pour 1 Kg d'eau de mer. Sa principale substance chimique est le chlorure de sodium (sel de cuisine). [5]

## I.2 Les compositions chimiques de l'eau de mer

Lorsque les sels sont dissous dans l'eau ils se décomposent en cations et en anions voici deux exemples :

- Le chlorure de sodium,  $NaCl$ , se décompose en  $Na^+$  et  $Cl^-$
- Le sulfate de magnésium,  $MgSO_4$ , se décompose en  $Mg^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$

Les cations sont chargés positivement et les anions sont chargés négativement. Les sels sont électriquement neutres parce que la charge des cations et des anions est opposée et égale. Il y a six ions majeurs qui composent plus de 99% des sels dissous dans l'eau de mer qui sont : le sodium ( $Na^+$ ), le chlorure ( $Cl^-$ ), le sulfate ( $SO_4^{2-}$ ), le magnésium ( $Mg^{2+}$ ), le calcium ( $Ca^{2+}$ ), et le potassium ( $K^+$ ) [6], on distingue aussi quatre ions mineurs qui représentent 1% des sels dissous dans l'eau de mer qui sont : le bromure ( $Br^-$ ), le fluor ( $F^-$ ), le bicarbonate ( $HCO_3^-$ ) et le strontium ( $Sr^{2+}$ ). Les sels de mer ont une composition constante. Ils sont presque toujours 55% d'ions de sodium, 31% d'ions de chlorure, 8% d'ions de sulfates, 4% d'ions de magnésium, 1% d'ions de calcium et 1% d'ions de potassium. L'exception majeure se présente lorsque l'eau douce et l'eau de mer se mélangent. L'eau des rivières a une composition différente de l'eau de mer. Par exemple, elle contient plus d'ion de calcium. L'eau de mer est constituée de 96,5% d'eau et de 3,5% de sel [7].

**Tableau I-1 : Concentration des éléments principaux pour une eau de mer de salinité de 35‰ [6]**

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

La teneur en sels de l'eau de mer peut varier entre 30 à 40 g/l. Quoiqu'il en soit, tous les éléments présents dans la composition de l'eau de mer conservent des proportions relativement stables, qu'importe la salinité. Il s'agit là d'une autre grande particularité de l'eau de mer (Prouvé par le chimiste Allemand William Dietmar). L'eau de mer renferme aussi des gaz dissous comme l'azote (N), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ou encore l'oxygène (O). La décomposition de certaines algues est à l'origine du sulfure de diméthyle (DMS) qui donne à l'eau de mer son odeur iodée.

### **I.3 Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer**

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer sont présentées comme suit :

#### **I.3.1 Les caractéristiques chimiques**

##### **I.3.1.a Salinité**

La salinité est l'une des caractéristiques physico-chimiques de l'eau. La salinité mesure la concentration d'une eau en sels dissous (chlorure de sodium, chlorure de magnésium, sulfate de magnésium, etc.) au travers de la conductivité électrique de cette eau.

Elle est sans unité, mais elle est encore souvent exprimée en gramme de sel par kilogramme d'eau (g/kg), ou en gramme de sel par litre d'eau (g/l). A titre de comparaison, l'eau douce a une salinité de 0 à 0,5 et l'eau de mer a une salinité moyenne de 35 [8]. L'océan contient en moyenne 35 grammes de sel par kilo d'eau de mer. Si on prend en compte le volume total de l'océan (1338 millions de km<sup>3</sup>) cela représente 47 millions de milliards de tonnes de sel, soit 94 tonnes par

m<sup>2</sup> sur le globe entier, ou 320 tonnes par m<sup>2</sup> sur les parties émergées. [9] On donne dans le tableau suivant les principaux composants d'une eau de mer de salinité 35 :

**Figure I-2 : salinité de l'eau de mer [9]**

Anions (en g/kg)		Cations (en g/kg)	
Chlore $Cl^-$	18,9799	Sodium $Na^+$	10,5561
Sulfate $SO_4^{2-}$	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

La présence de sel dans l'eau modifie certaines propriétés (densité, compressibilité, point de congélation, température du maximum de densité). D'autres (viscosité, absorption de la lumière) ne sont pas influencées de manière significative. Enfin certaines sont essentiellement déterminées par la quantité de sel dans l'eau (conductivité, pression osmotique) [9].

❖ Différence de salinité entre une eaux marines et une eau saumâtre [10]

- **Eaux marines**

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates). La salinité moyenne des eaux des mers et océans est de 35 g.L-1.



**Tableau I-2 : concentration salinité moyenne des eaux des mers et océans [10]**

Elément	Concentration (g/l)
NaCl	27,2
MgCl <sub>2</sub>	3,8
MgSO <sub>4</sub>	1,7
CaSO <sub>4</sub>	1,25
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,85
total	35

Cette salinité peut être différente dans le cas de mers fermées :

- Mer Méditerranée : 36 à 39 g.L-1,
- Mer Rouge : environ 40 g.L-1,
- Mer Caspienne : 13 g.L-1,
- Mer Morte : 270 g.L-1,
- Golfe Arabo-Persique : 36 à 39 g.L-1.

Le pH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4 : l'eau de mer est un milieu légèrement basique.

- **Eaux saumâtres**

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO<sub>3</sub>, le CaSO<sub>4</sub>, le MgCO<sub>3</sub> et le NaCl.

## I.3.1.b Alcalinité

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bases et de sels d'acides faibles. Dans les eaux, l'alcalinité résulte le plus généralement à la présence d'hydrogencarbonates, carbonates et hydroxydes [11]. L'alcalinité est déterminée par titration par un acide fort. Elle est due à un grand nombre d'ions différents parmi lesquels les plus courants sont :

- les bases libres (ions  $OH^-$ )
- -les bicarbonates (ions  $HCO_3^-$ )
- -les carbonates (ions  $CO_3^{2-}$ )

D'autres ions phosphates et silicates peuvent contribuer à l'alcalinité.

- Le titre alcalimétrique simple (TA) ou P Alkalinity est déterminé par le virage de la phénolphthaléine à pH=8,3.
- Le titre alcalimétrique complet (TAC) ou M Alkalinity est déterminé par le virage du méthylorange à pH=4,3.

## I.3.2 Les caractéristiques physiques

Les propriétés physiques de l'eau de mer dépendent de plusieurs facteurs qui sont :

### I.3.2.a Les températures

L'eau de mer est, en général froide suivant la latitude. Chaude à l'équateur (26°C en surface dans l'océan, plus de 30°C dans les mers intérieures l'été), froide aux pôles (1 à 3°C) en surface. L'océan indien à latitude égale est plus chaud que l'Atlantique. [11]. La température des océans varie de -1,9°C à 30°C.

- -1,9°C est la température de congélation de l'eau de mer à S=35.
- 30°C est obtenue en certain point de la surface des océans par rayonnement solaire et sous l'action de l'atmosphère.
- A 4000 m de profondeur elle varie entre 0 et 2,5°C.
- En Méditerranée (à 2000 m) elle varie de 13 à 13,5°C.

## I.3.2.b Le PH

La qualité d'une eau et son pH sont souvent mentionnés ensemble. Le pH est un facteur important dans le traitement de l'eau car certains procédés nécessitent d'être réalisés avec un pH spécifique pour être efficaces. Prenons l'exemple, des réactions mettant en jeu le chlore, n'ont lieu que pour des pH d'ordre de 6.5 à 8.

Le pH donne une indication de l'acidité d'une substance. Il est déterminé à partir de la quantité d'ions d'hydrogène libre ( $H^+$ ) ou d'ions hydronium ( $H_3O^+$ ) contenus dans la substance. L'acidité est un des paramètres les plus importants des propriétés de l'eau. L'eau est un solvant pour presque tous les ions et le pH permet de comparer les ions les plus solubles dans l'eau. Le résultat d'une mesure de pH est défini par les quantités d'ions  $H^+$  et d'ions  $OH^-$  présentes dans la substance. Quand les quantités de ces deux ions sont égales, l'eau (ou la substance) est considérée comme neutre, et le pH a une valeur aux alentours de 7. [12] Le pH d'une substance varie entre 1 et 14. Au-dessus de 7, la substance est considérée comme basique et la quantité d'ions  $OH^-$  est supérieure à celle d'ions  $H^+$ . Au-dessous de 7, la substance est acide ; les ions  $H^+$  sont en quantités supérieures. Le pH est calculé selon la formule suivante :

$$PH = -\log[H^+]$$

Le pH est un facteur logarithmique ; quand une solution devient dix fois plus acide, le pH diminue d'une unité. Si la solution devient 100 fois plus acide, le pH diminuera de deux unités. Le pH est aussi appelé alcalinité [13].

## I.3.2.c La Masse volumique

La masse volumique de l'eau de mer dépend de trois paramètres : la température, la salinité et la pression (due à la compressibilité de l'eau de mer). Généralement, cette masse volumique sera plus élevée lorsque la température est faible, la salinité forte et la pression forte [14].

## I.3.2.d La viscosité

La viscosité de l'eau décroît lorsque la température augmente. Contrairement, elle augmente avec la teneur en sels dissous ; l'eau de mer est donc plus visqueuse que l'eau de rivière à cause de sa teneur en sels. La pression agit d'une façon tout à fait particulière sur la viscosité absolue de l'eau [15].

**I.3.2.e La turbidité**

La turbidité est la mesure de l'aspect trouble de l'eau. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle est causée, dans les eaux, par la présence de matières en suspension (MES), comme les argiles, sables, bactéries et champignons. C'est l'inverse de la transparence (limpidité). On mesure la turbidité en unités de turbidité néphalométriques ( uTN).

## **Partie 2 : L'eau potable**

### **I.4 Introduction sur l'eau potable**

L'eau pure n'existe pas à l'état naturel. Dans son cheminement jusqu'à nos robinets, elle se charge d'éléments qui peuvent être indispensables à notre santé mais peut également rencontrer des substances potentiellement toxiques pour l'organisme des êtres vivants. C'est pourquoi l'eau doit subir plusieurs traitements avant d'être considérée comme potable. Elle doit ainsi répondre à plusieurs critères pour permettre à chacun de boire une eau sans aucun risque pour la santé. L'eau potable est une eau que l'on peut boire ou utiliser à des fins domestiques et industrielles sans risque pour la santé. Elle peut être distribuée sous forme d'eau en bouteille (eau minérale ou eau de source, eau gazeuse), d'eau courante (eau du robinet) ou encore dans des citernes pour un usage industriel. [16]. Les eaux dites « de source » sont des eaux naturellement propres à la consommation humaine ; on parle alors d'eau potable. Les eaux naturellement gazeuses, qui contiennent du dioxyde de carbone dissous, peuvent également être regazéifiées avant d'être embouteillées. Les eaux minérales naturelles, elles disposent des propriétés particulières ; elles ont des teneurs en minéraux et en oligo-éléments qui peuvent leur donner des vertus thérapeutiques. [17]. Mais d'où vient l'eau potable et comment arrive-t-elle jusqu'à nos robinets ? et comment rendre une eau non-potable potable ? et quelles sont les normes de potabilité d'une eau ?

#### **I.4.1 Définition de l'eau potable**

Une eau potable est une eau que l'on peut boire sans risque de contracter des maladies. Afin de définir précisément une eau potable, des normes ont été établies qui fixent notamment les teneurs limites à ne pas dépasser pour un certain nombre de substances toxiques susceptibles d'être présentes dans l'eau. Le fait qu'une eau soit conforme aux normes, c'est-à-dire potable,

ne signifie donc pas qu'elle soit exempte de matières polluantes, mais que leur concentration a été jugée suffisamment faible pour ne pas mettre en danger la santé du consommateur [\[17\]](#).

### I.4.2 Définition de l'eau non potable

Du fait que nous avons donné la définition de l'eau potable il est impératif aussi que nous parlions aussi de l'eau non potable. L'eau non potable est l'eau dont la qualité ne satisfait pas les normes de potabilité établies par le code de la santé publique, ne pouvant être destinée à la consommation humaine et étant utilisée essentiellement pour des besoins industriels ou collectifs publics ou privés [\[18\]](#).

### I.4.3 Eau du robinet : D'où vient-elle ?

62 % de l'eau du robinet provient des eaux souterraines (nappes superficielles et profondes), les 38 % restants proviennent des eaux superficielles (mer, rivières, lacs, etc.) L'eau est prélevée par captage dans un forage ou un puit. Le sol servant de filtre naturel permet d'assurer la bonne qualité de l'eau. Mais un traitement s'impose pour offrir une eau potable, totalement purifiée. Elle transite dans une usine de traitement pour la décontaminer puis elle rejoint des réservoirs de stockage ou des châteaux d'eau, à l'aide de canalisations souterraines. Des pompes permettent de stocker l'eau en hauteur afin de la distribuer dans les habitations. L'eau est alors utilisée pour la consommation humaine. Puis, après utilisation, les eaux usées sont acheminées vers une station d'épuration en charge de son nettoyage. L'eau nettoyée est ensuite rejetée à la nature, avant de recommencer son cycle naturel : puisage, traitement, distribution et dépollution, puis retour de l'eau dans la nature [\[16\]](#).

### I.4.4 Composition chimique

A la différence de l'eau de source qui est le plus souvent potable au moment de son puisage, la plupart des eaux que nous consommons contiennent naturellement, des substances minérales et organiques dont certaines peuvent être nocives des agents pathogènes. Ces substances proviennent d'une part, des roches et des couches sédimentaires, et d'autre part, des rejets provoqués par les activités humaines ou encore la décomposition de la biomasse.

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

- Les germes pathogènes, comme 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

A l'inverse, certaines substances jugées nécessaires pour l'organisme et naturellement contenues dans l'eau doivent être conservées dans l'eau que nous buvons :

- Des sels minéraux, comme le calcium, le magnésium, le potassium, le chlore...
- Des oligo-éléments, comme le fluor, le cuivre, le fer, le silicium, le manganèse, le zinc. [16]

**Tableau I-3 : tableau des substances minérale et organique qu'on trouve généralement dans les eaux [19]**

<i>Substances minérales</i>	<i>Substances organiques</i>
Calcium ( $Ca^{2+}$ )	Sac plastique
Magnésium ( $Mg^{+}$ )	Déchets végétaux
Sodium ( $Na^{+}$ )	Plancton
Potassium ( $K^{+}$ )	Hydrate de carbone
Carbonates ( $CO_3^{2-}$ )	Acides humiques
Bicarbonate ( $HCO_3^{-}$ )	Pigments
Sulfate ( $SO_4^{2-}$ )	Les hydrocarbures
Chlorure ( $Cl^{-}$ )	Les solvants chlorés
Nitrate ( $NO_3^{-}$ )	Les pesticides
	Mégots de cigarette
	Bouteilles ou canettes

### I.4.5 Les critères de potabilité de l'eau [16]

Pour pouvoir être buvable en toute sécurité, l'eau doit répondre à des facteurs de potabilité très strictes dictés par le Ministère de la Santé et le Conseil Supérieur du secteur d'Hygiène Publique. Ces normes varient en fonction de la législation en vigueur et selon qu'il s'agit d'une eau destinée à la consommation humaine ou d'une eau industrielle.

A ce jour, il existe 63 critères de potabilité de l'eau, que l'on peut regrouper en 5 grands paramètres :

### I.4.6 Les paramètres physico-chimiques :

Ils correspondent aux caractéristiques de l'eau tels que le pH, la température, la conductivité ou la dureté de l'eau et délimitent les quantités maximales à ne pas dépasser pour certains composants comme les ions, les chlorures, le potassium et les sulfates.

Exemples :

- La teneur en sulfate doit être inférieure à 250 mg/l
- La teneur en chlorures doit être inférieure à 200 mg/l
- La teneur en potassium doit être inférieure à 12 mg/l
- Le pH de l'eau doit être compris entre 6,5 et 9

Le TH soit la dureté de l'eau, qui correspond à la mesure de la teneur d'une eau en ions calcium et magnésium, doit être supérieur à 15 degrés français (°f ou °fH) autrement dit, une eau ne doit pas contenir moins de 60 mg/l de calcium ou 36 mg/l de magnésium, sinon elle sera jugée trop douce : pour ne pas corroder les canalisations, elle devra faire l'objet de minéralisation et/ou de neutralisation pour retrouver un équilibre calco-carbonique.

#### I.4.6.a Les paramètres organoleptiques :

Ils concernent la couleur, le goût et l'odeur de l'eau. L'eau doit être agréable à boire, claire et sans odeur. Ces paramètres étant liés au confort de consommation, ils n'ont pas de valeur sanitaire directe.

#### I.4.6.b Les paramètres microbiologiques :

Ils permettent de contrôler que l'eau ne contient aucune substance pathogène, comme les virus, les bactéries ou les parasites, pouvant provoquer des maladies grave, voir une épidémie.

### I.4.6.c Les paramètres liés aux substances indésirables :

Ils concernent les substances telles que les nitrates, les nitrites et les pesticides.

- La composition en nitrates ne doit pas dépasser 50 mg/l
- La composition en fluor doit être inférieure à 1.5 mg/l

### I.4.6.d Les micropolluants Les paramètres liés aux substances toxiques :

Tels que l'arsenic, le cyanure, le chrome, le nickel, le sélénium ainsi que certains hydrocarbures sont soumis à des normes très sévères à cause de leur toxicité. Leur teneur tolérée est de l'ordre du millionième du gramme. [\[16\]](#).

### I.4.7 Comment l'eau est-elle traitée avant d'arriver jusqu'à nos robinets ? [\[16\]](#)

L'eau puisée à l'état naturel doit subir plusieurs traitements avant d'être acheminée dans les circuits de distribution pour arriver enfin jusqu'à nos robinets. Les traitements dépendent de la qualité de l'eau puisée. C'est pourquoi, elle est systématiquement contrôlée au moment de son captage de manière à lui appliquer le traitement de potabilisation adapté.

Voici les différentes étapes de potabilisation de l'eau :

**Le captage** : l'eau est prélevée par captage dans un forage ou un puit. Le sol étant un filtre naturel de filtre naturel permet d'assurer une bonne qualité de l'eau. Mais un traitement s'impose pour offrir une eau potable, totalement débarrassée de ses impuretés. Pour ce faire, l'eau est conduite dans une usine de production.

**Le dégrillage** : à son entrée dans l'usine, l'eau traverse des grillages (dont les interstices mesurent environ 5 cm) qui la débarrassent des plus gros déchets (cailloux, plastiques, branches, feuilles etc..).

**Le tamisage** : l'eau passe ensuite par un tamis avec des grilles nettement serrées, permettant de retenir les petits déchets (petits cailloux, mégots de cigarettes, brindilles etc..).

La floculation-coagulation (ou décantation) : cette étape consiste à verser un produit coagulant dans l'eau afin que les impuretés se regroupent en grappes puis coulent au fond du bassin de décantation. L'eau est alors plus claire.

**La filtration sur sable** : l'eau passe à travers un filtre composé d'une épaisse couche de sable qui intercepte les dernières petites particules visibles.



**L'ozonation** : les impuretés invisibles sont quant à elles éliminées par un gaz, l'ozone ( $O_3$ ). En oxydant toutes les substances organiques, l'ozone inactive les pesticides et les micro-organismes pathogènes.

**La filtration** : l'eau ainsi clarifiée passe à travers un filtre composé de grains de charbon actif. Ces grains contiennent des bactéries qui éliminent les composants toxiques par absorption.

**La chloration** : l'eau de distribution est désinfectée par du chlore afin de garantir sa qualité durant son parcours dans les canalisations de l'usine jusqu'aux consommateurs. En France, la quantité de chlore utilisée pour la désinfection n'est pas fixée par une norme européenne, le critère à respecter est défini par « l'absence d'odeur ou de saveur anormale et pas de changement anormal ».

**Le contrôle qualité et le contrôle sanitaire** : au terme de toutes ces étapes, l'eau traitée est contrôlée par le Service des eaux suivant des normes de qualité et de sécurité sanitaire pour la consommation humaine.

## Partie 3 : Le dessalement

### I.5 Introduction sur le dessalement

Quand vous vous êtes réveillés ce matin la première chose que vous avez faite était sans doute d'utiliser de l'eau pour vous laver pour aller aux toilettes ou pour préparer votre petit déjeuner il nous en faut beaucoup avec une grande disparité. Un américain consomme 570 litres par jour, un saoudien 192 litres par jour et un malien seulement 20 litres par jour, le monde a soif mais l'eau est rare avec les sécheresses les pluies imprévisibles le changement climatique. Une personne sur 9 n'a pas accès à l'eau potable. La crise de l'eau est annoncée il faut donc réduire notre consommation mais on le sait déjà ça ne suffira pas il nous faut une solution à grande échelle ; pourquoi pas le dessalement ! la terre est constituée de 98% d'eau de mer, l'idée ici est enlever le sel contenu dans l'eau de mer pour la rendre potable. De plus en plus de pays s'engagent dans cette voie 1900 usines sont implantées dans le monde. Néanmoins le dessalement avec toute la technologie qu'il implique coûte très cher compter environ 2.50 € par  $m^3$ , c'est 2 fois plus cher que de traiter les eaux de pluie ou les eaux usées. Alors dans cette partie nous allons voir ce que c'est le dessalement et quels sont les techniques du dessalement [\[20\]](#).

#### I.5.1 Définition du dessalement

Le dessalement de l'eau (également appelé dessalage ou désalinisation) est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce, à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer). En dépit du nom, il s'agit rarement de retirer le sel de l'eau, mais plutôt, à l'inverse, d'extraire de l'eau douce. [\[21\]](#). Le dessalement s'appelle aussi désalinisation ou souvent dessalage. Il consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale [\[22\]](#).

#### I.5.2 Les principes de dessalement [\[10\]](#)

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué :

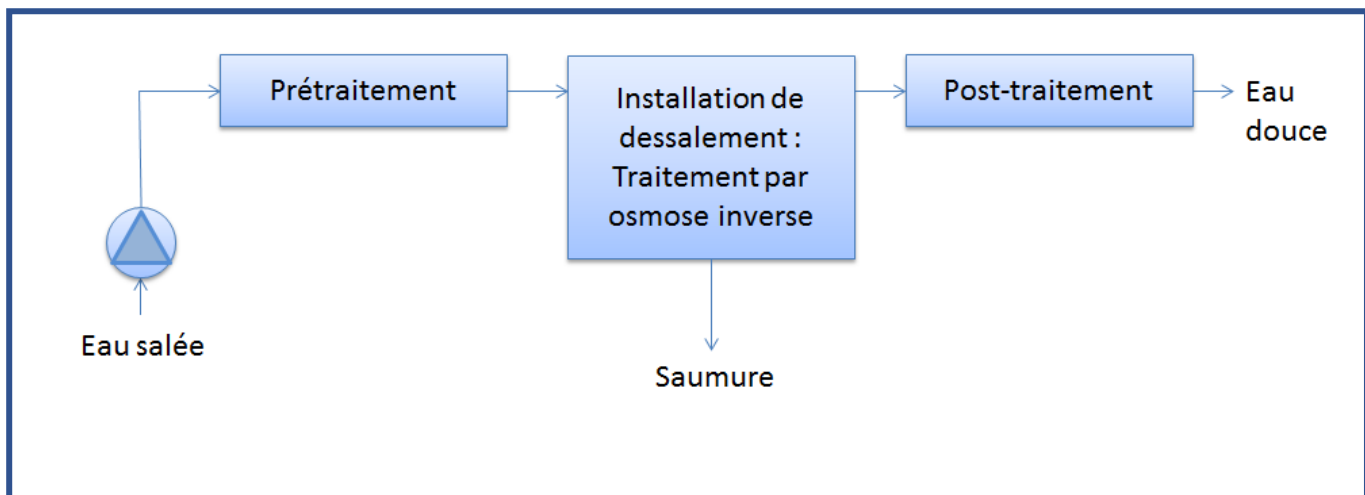
- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases :
- La congélation et la distillation.
- Les procédés utilisant des membranes : l'osmose inverse et l'électrodialyse.

Parmi les procédés cités ci-dessus, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent.

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes :

- La captation de l'eau de mer
- Le prétraitement
- Le procédé de dessalement lui-même,
- Le post traitement ou minéralisation

A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre.



**Figure I-3: : Schéma générale d'une installation de dessalement**

## I.5.2.a Captation de l'eau de mer

Par captage on entend un ouvrage de prélèvement exploitant une ressource en eau, que ce soit en surface (prise d'eau en rivière) ou dans le sous-sol (forage ou puits). La captation Consiste à pomper l'eau de mer vers la station de dessalement, cette eau doit être bonne du point de vue matières en suspension. Sont utilisés dans cette étape deux types de technologies :

## ❖ Les forages côtiers

Soit verticaux soit sous forme de galeries horizontales permettant d'obtenir une eau de très bonne qualité et relativement stables.

## ❖ La prise d'eau de mer

Peut être faite en pleine mer. Dans le cas idéal, le captage doit être effectué en zone profonde, éloigné de la cote, protégé des pollutions et des forts courants. [\[23\]](#).

### I.5.2.b Le prétraitement

Le prétraitement de l'eau de mer avant le procéder de dessalement est absolument nécessaire. Le prétraitement proprement dit comprend une filtration, une chloration pour empêcher la prolifération de microorganismes, et un traitement antitartre pour limiter les dépôts de carbonate de calcium [\[22\]](#). Les procédés de prétraitement peuvent être divisés en deux catégories : les prétraitements physiques et les prétraitements chimiques.

❖ Les prétraitements physiques incluent les pré-filtres mécaniques, les filtres à cartouche, la filtration à sable et la filtration membranaire.

❖ Le prétraitement chimique consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartage. De coagulants, de désinfectants et de poly-électrolytes. [\[24\]](#).

#### ➤ Coagulation – floculation

- Principe du procédé

Rassembler les très fines particules contenues dans l'eau afin de créer des "flocs", plus grosses particules qui décanteront ou flotteront plus facilement.

- Action du réactif Coagulant

En mélangeant un réactif Coagulant permet de rassembler entre elles les fines matières contenues dans l'eau à traiter pour former des Flocons appelés : « Flocs ». Mais ces Flocs sont fragiles, petits et se séparent encore lentement de l'eau

- Action du réactif Flocculant

L'ajout à l'eau d'un réactif Flocculant permet de coller ensemble les particules déjà rassemblées par la Coagulation

L'action de ce Flocculant permet de former des gros Floccs qui vont se séparer beaucoup plus rapidement de l'eau à traiter par Décantation ou bien Flottation. [25]. Les substances les plus couramment utilisées sont :

- ✓ Pour la coagulation : la chaux, l'alun, le sulfate ferrique et le chlorure ferrique.
- ✓ Pour la floculation : les polymères organiques à longues chaînes de masse molaire élevée. [26].



**Figure I-4 : Le procédé de Coagulation – Floculation [25]**

### ➤ Filtration

La filtration est un procédé physique destiné à clarifier un liquide qui contient des matières solides en suspension en les passant à travers un milieu poreux. L'eau passe à travers un filtre qui intercepte les petites particules. Les mailles du filtre sont petites donc plus petite doit être une particule pour passer. La filtration peut être accomplie comme un traitement tertiaire d'une eau brute, comme traitement secondaire d'une eau usée ou comme unique traitement si on parle d'une filtration transmembranaire.

Les filtres les plus communs dans les stations de traitement d'eau sont les filtres au sable et à l'antracite. Les filtres s'assurent que l'eau qui en sort respecte les normes en vigueur en ce qui concerne la turbidité (la couleur ayant été enlevée par l'étape précédente). Les virus et bactéries peuvent toutefois passer au travers des filtres c'est pourquoi l'étape finale de désinfection est obligatoire [27].

- Le traitement chimique

Après filtration à sable, des matériels de dosage font partie du prétraitement chimique appliqué à l'eau de mer avant le passage dans les membranes (acidification, addition de bisulfite de sodium et dosage d'anti-incrustant). [28].

- La filtration de sécurité ou microfiltration

Pour ce procédé on utilise un filtre à cartouche type bobiné, entre le collecteur d'entrée et de sortie, il y'a un manomètre différentiel muni de contact électrique pour alarme, qui indiquera quand il sera nécessaire de remplacer les cartouches filtrantes. [29]

### I.5.2.c Les procédés de dessalement

La désalinisation peut être effectuée selon plusieurs principes physiques comme : la distillation qui repose sur un changement de phase eau-vapeur, une séparation sel-eau faisant appel à des membranes semi-perméables où le moteur est soit la pression (osmose inverse), soit un champ électrique (électrodialyse) [30]. Cependant, les deux technologies utilisées actuellement, à l'échelle industrielle, sont celles basées sur la distillation et l'osmose inverse. [31]

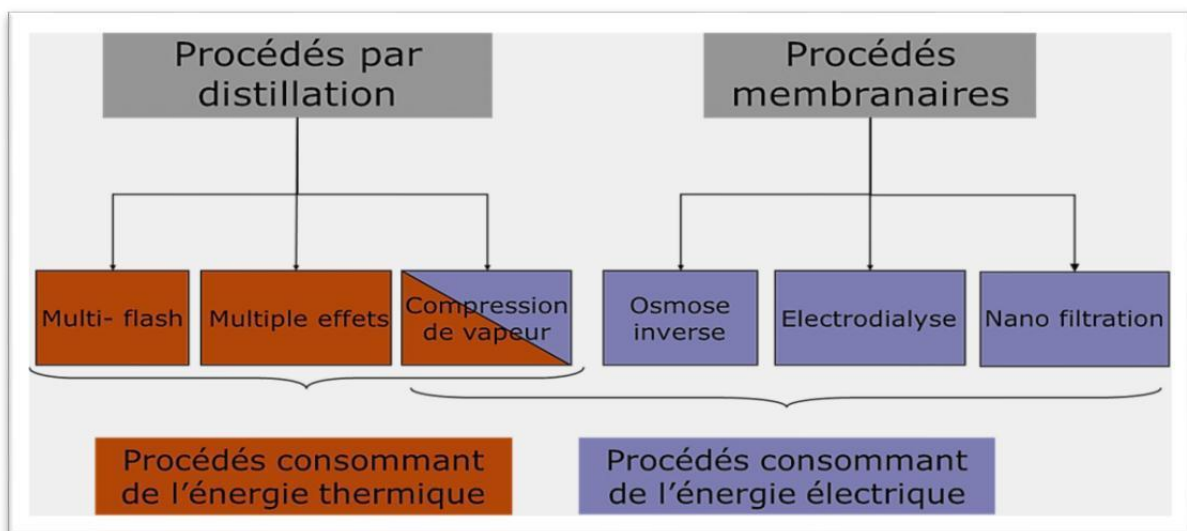


Figure I-5 : principaux procédés industriels de dessalement

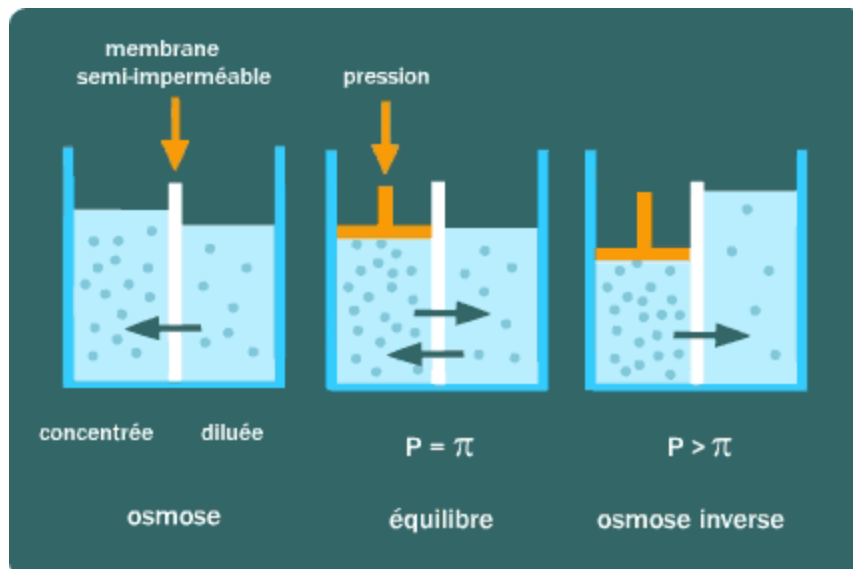
### I.5.2.d Les procédés membranaires

Au lieu d'extraire par évaporation l'eau douce de l'eau de mer, on peut envisager une méthode de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes sélectives. Deux procédés utilisant de telles membranes sont actuellement commercialisés. Ce sont

l'électrodialyse et l'osmose inverse. Une membrane est une interface physique, de faible épaisseur, qui contrôle le transfert d'espèces chimique entre les deux milieux qu'elle sépare. Cette interface peut être homogène au niveau moléculaire, uniforme en composition et structure, ou elle peut être chimiquement et physiquement hétérogène, contenant des pores de dimension finie ou contenant des couches superposées. Les membranes se présentent sous forme de film plans (feuilles), spirale, tubes ou fibre creuses, elles sont mises en œuvre dans des modules regroupant un ou plusieurs éléments de basse. [32]

### I.5.2.d.i L'osmose inverse

L'osmose inverse (RO) constitue l'évolution ultime de la filtration de l'eau. La figure I.4 ci-dessous schématise l'opération.



**Figure I-6: Principe de l'osmose inverse** [22]

Rappelons ici que l'osmose est, sous l'action d'un gradient de concentration, le transfert d'un solvant, ici l'eau douce à travers une paroi semi-perméable vers une solution concentrée (en chlorure de sodium par exemple). [33]

Si l'on considère un système constitué d'un récipient séparé par une membrane contenant d'un côté, la solution concentrée et de l'autre, de l'eau douce, il y a un flux d'eau douce qui se traduit par l'abaissement du niveau du compartiment d'eau douce et l'élévation du niveau dans la partie concentrée c'est-à-dire que l'eau aura tendance à aller de la solution diluée vers la solution

Concentrée. L'équilibre est atteint quand la différence de niveau correspond à la "pression osmotique" souvent symbolisée par «  $\pi$  ».

Si au lieu de laisser le processus se réaliser, on applique sur le liquide concentré une pression supérieure à la pression osmotique, on a cette fois-ci un flux d'eau douce dessalée dans l'autre sens. C'est ce phénomène qui est la base d'unités de dessalement par osmose inverse.

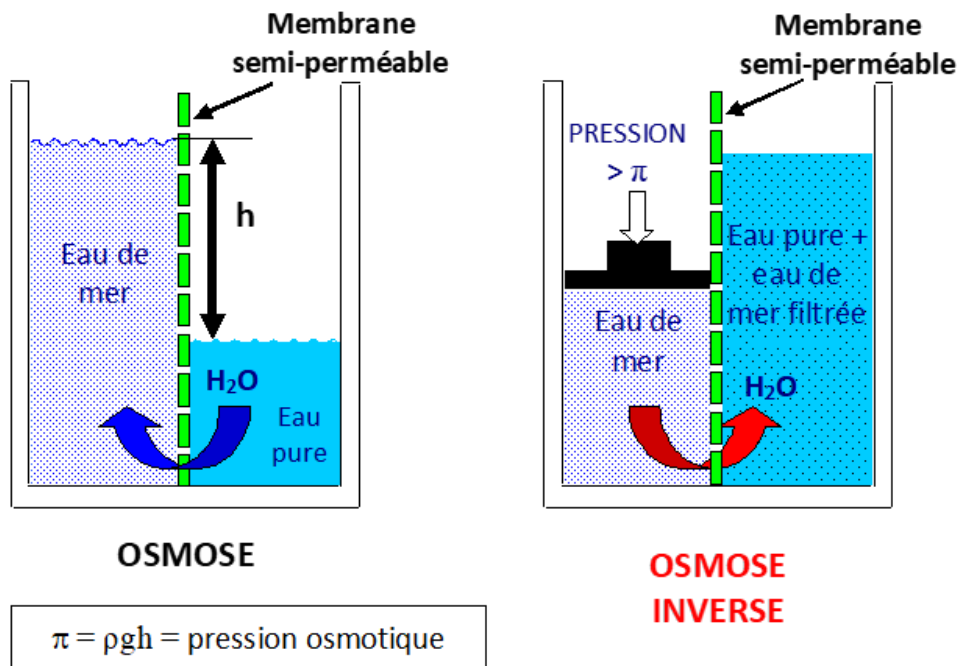
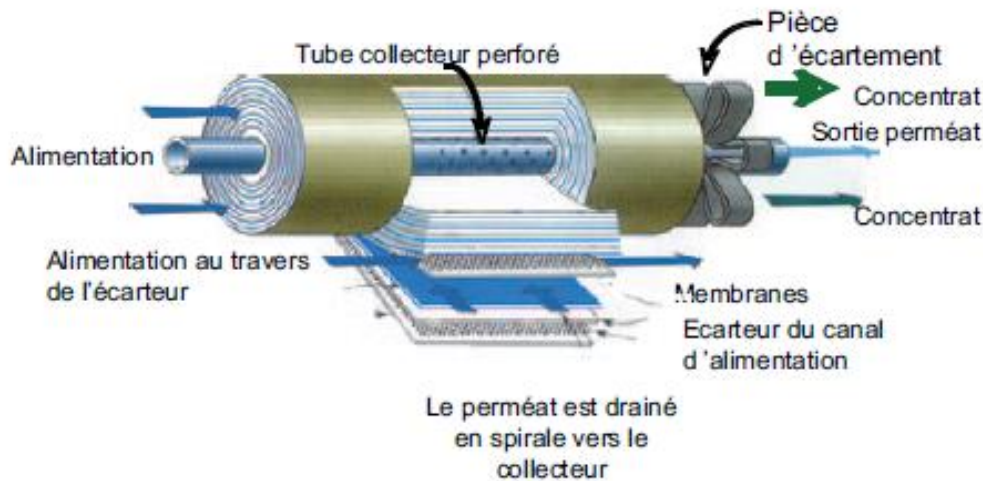


Figure I-7: Osmose et osmose inverse [33]





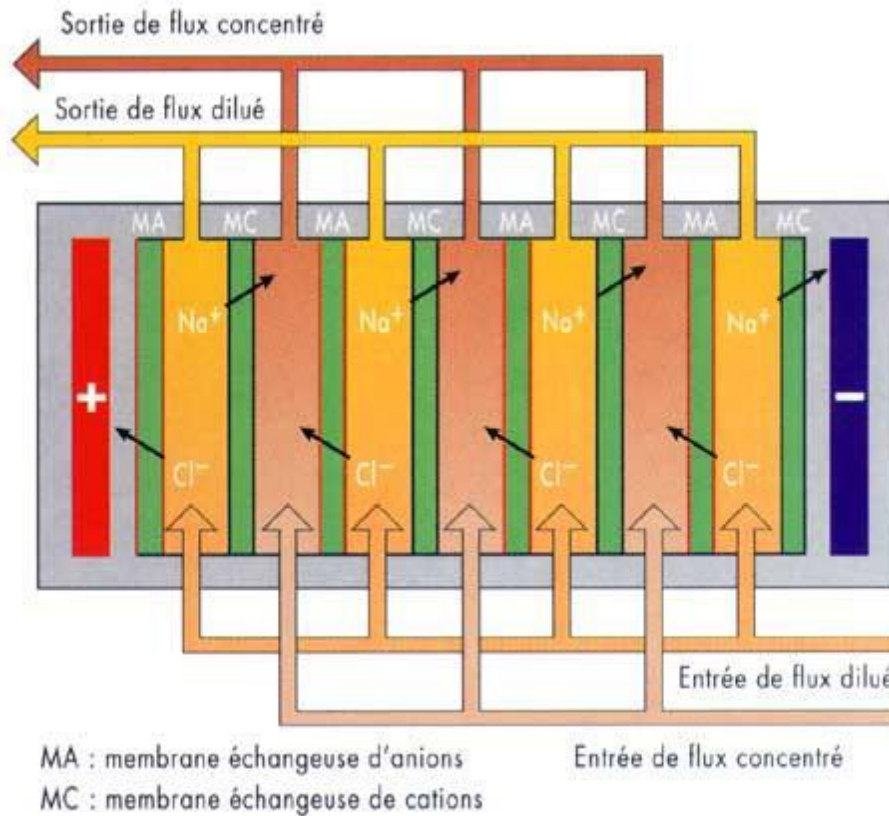
**Figure I-8 : Description d'un module spiralé d'osmose inverse**

Les installations de dessalement par osmose inverse travaillent généralement sous des pressions de 40 à 80 bars selon la salinité. Cette technique a été améliorée par des procédés permettant de récupérer l'énergie du fluide sous pression à l'aide d'une turbine. L'osmose inverse a été utilisée dès les années 60 par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) pour les vols habités. Simple dans son principe la désalinisation par osmose inverse nécessite un prétraitement efficace pour éliminer les particules en suspension (filtration par sable, filtration par cartouche), éviter le développement de microorganismes et empêcher la formation de précipités des carbonates. Conçues pour résister à des fortes pressions, les membranes doivent être entretenues par des lavages réguliers pour empêcher des phénomènes de colmatages des pores [33].

#### I.5.2.d.ii L'électrodialyse

Le principe de l'électrolyse est bien connu. Les ions d'un sel dissous dans l'eau, comme le chlorure de sodium par exemple, déplacent sous l'action d'un champ électrique créé par deux électrodes trempant dans le liquide. Les ions positifs ou cations (par  $\text{Na}^+$ ) sont attirés par l'électrode négative (ou cathode) tandis que les ions négatifs ( $\text{Cl}^-$ ) sont attirés par l'électrode positive.

Dans l'électrodialyse, on intercale alternativement des membranes filtrantes soit imperméables aux anions et perméables aux cations, soit inversement imperméables aux cations et perméables aux anions. On obtient ainsi une série de compartiments à forte concentration de sels et d'autres à faible concentration.



**Figure I-9: Principe de fonctionnement de l'électrodialyse**

L'électrodialyse est bien adaptée aux eaux saumâtres dont la salinité est assez faible, inférieure à celle de l'eau de mer.

Les membranes utilisées en électrodialyse laissent passer les ions mais sont imperméables à l'eau. C'est exactement l'inverse pour les membranes utilisées en osmose inverse. Entre outre le dessalement d'eau de mer, l'électrodialyse a d'autres applications dans l'agroalimentaire (traitement du lactosérum) ou la galvanoplastie [35]. On distingue trois types d'électrodialyse :

- L'électrodialyse dite conventionnelle (ED).
- L'électrodialyse à membrane bipolaire (EDMB).
- L'électrodialyse à membranes (EM).

Le point commun entre ces techniques est la mise en œuvre de membranes échangeuses des ions permettant le transfère des ions de façon sélective sous l'effet d'un champ électrique.

## I.5.2.e Les procédés par distillation [30]

### I.5.2.e.i Distillation à simple effet

C'est le premier procédé qui a été employé. On chauffe de l'eau, et la condensation par refroidissement de la phase vapeur qui ne contient plus de sel produit de l'eau douce. Sous sa forme la plus simple. C'est ce type de dispositif qui a tout d'abord été installé sur les bateaux : l'énergie pour le chauffage vient du diesel de propulsion ; le refroidissement est assuré par de l'eau de mer froide qui circule dans un échangeur ; des pompes récupèrent l'eau douce condensée et évacuent la saumure. Pour de grandes installations, cette technique, coûteuse en énergie, a connu de nombreuses améliorations permettant de réutiliser une partie de la chaleur libérée par la condensation de la vapeur.

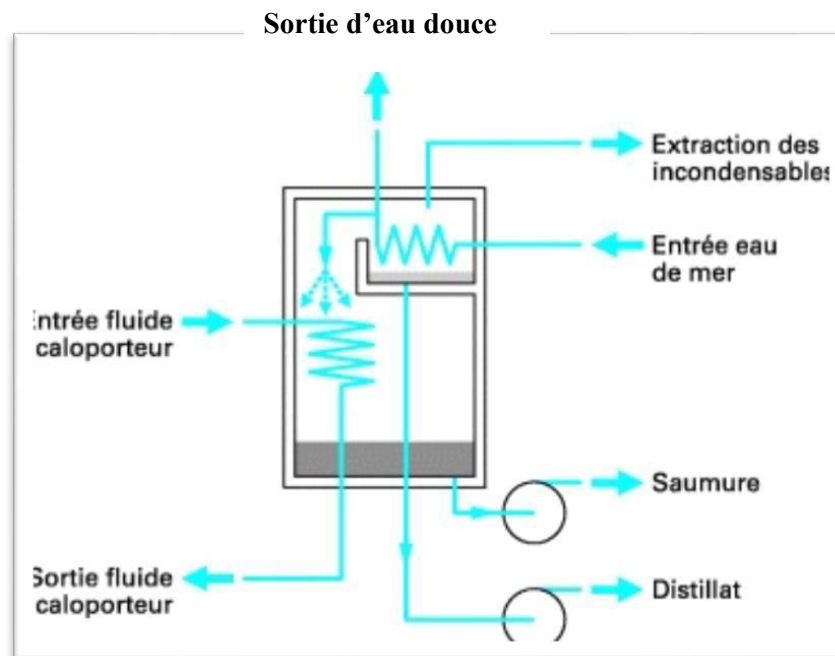


Figure I-10 : principe de la distillation simple

### I.5.2.e.ii Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF).

Dans le système multi-flash l'eau est portée sous pression à une température de 120°C. Elle est introduite dans une enceinte à pression réduite où se produit une vaporisation immédiate. Une partie est condensée sur un condenseur. L'eau qui a fourni de l'énergie pour la vaporisation cesse de bouillir pour se mettre en équilibre avec la pression de vapeur régnant dans l'enceinte. Elle passe ensuite dans une deuxième enceinte soumise à une pression encore plus faible. Nouveau flash, nouvelle condensation, nouvelle enceinte où la pression est encore plus faible, etc. Une installation peut compter plusieurs dizaines d'étages flash.

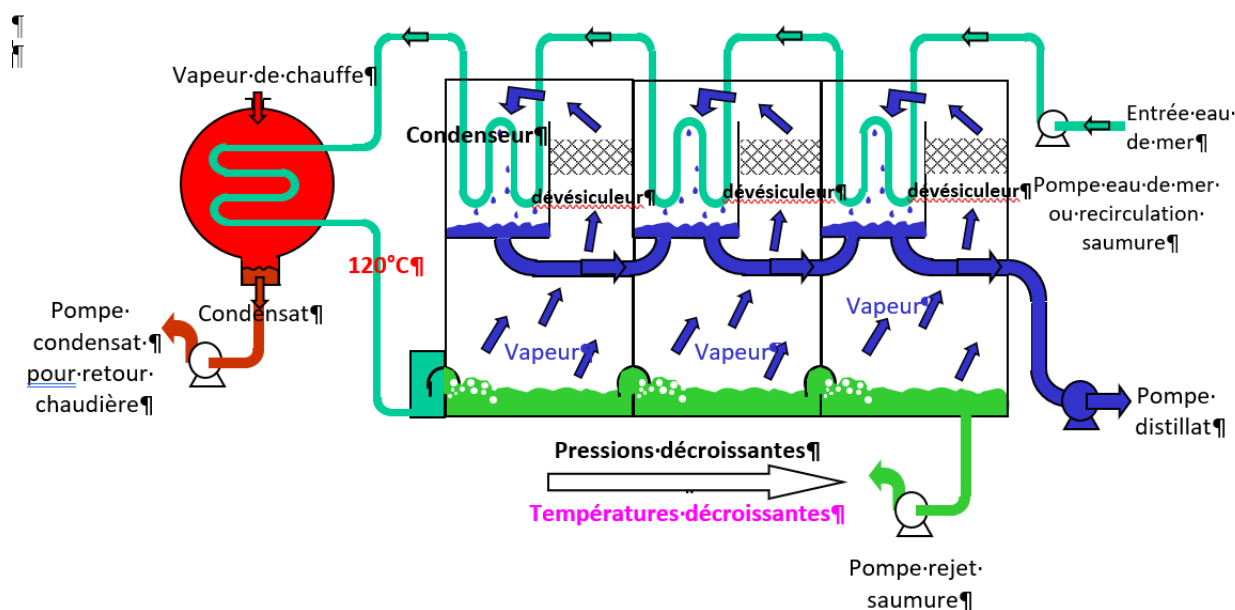


Figure I-11: Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF) à 3 étages [33]

### I.5.2.e.iii Distillation à multiples effets (MED)

Pour cette dernière technique, on comprime la vapeur pour s'en servir comme fluide chauffant [30]. L'évaporateur MED est constitué de plusieurs cellules simple consécutives, des lesquelles on diminue la pression (et la température) du premier (chaud) au dernier (le froid), Chaque cellule (aussi appelé effet) contient un faisceau de tubes, Le sommet du faisceau est arrosé avec l'eau de mer qui coule autour des tubes par gravité. La chaleur cède lors de la condensation réchauffe l'eau de mer à l'extérieur des tubes qui s'évapore en partie, Après l'évaporation, l'eau de mer se concentre en donnant de la saumure au fond de la cellule. La vapeur crée par l'évaporation de l'eau de mer est utilisée comme moyen de chauffage pour l'effet suivant où le processus se répète. Dans la dernière cellule, la vapeur produite se condense dans un échangeur thermique, Cet échangeur, est rafraîchi par l'eau de mer. À la sortir du condenseur final, la partie de l'eau de mer réchauffée est utilisée pour alimenter l'unité, l'autre partie est rejetée à la mer [34]. C'est l'énergie électrique qui est utilisée pour la compression. Les améliorations citées ont permis une diminution considérable de l'énergie nécessaire pour produire 1 m<sup>3</sup> d'eau : 700 kWh thermiques pour le simple effet, 100 kWh thermiques pour les systèmes multi-flash ou multiples effets 10 kWh électriques pour les systèmes à compression de vapeur. [30]

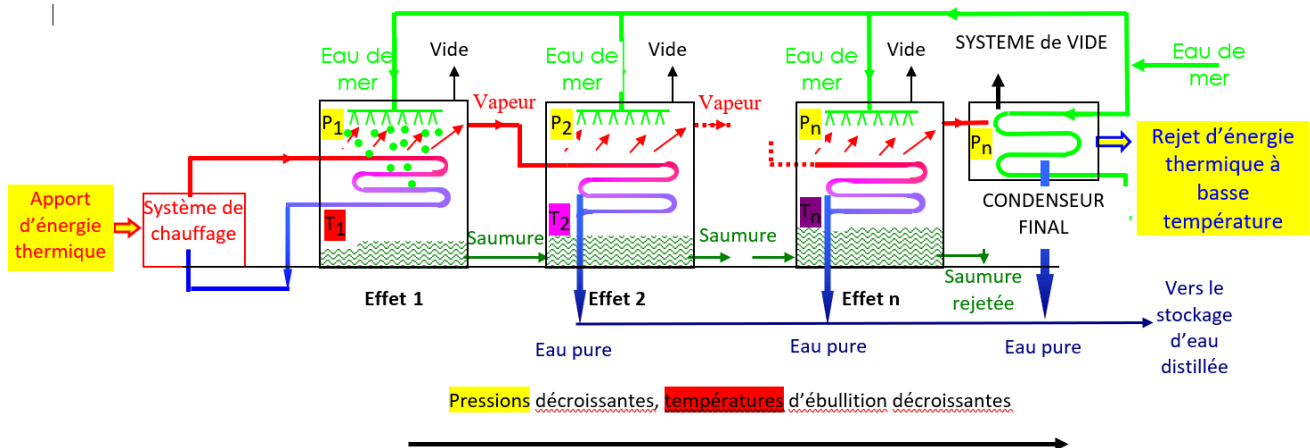


Figure I-12 : Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED)

### I.5.2.f Inconvénients et avantages liés au dessalement

#### I.5.2.f.i Les inconvénients

Le dessalement de l'eau de mer apporte une réponse aux besoins d'eau douce. Toutefois, quel que soit le procédé utilisé, il n'est pas sans inconvénients [30] :

- Besoins énergétiques importants ;
- Rejet des saumures concentrées (et chaudes dans le cas de la distillation) en mer ou injectées dans le sol ;
- Emploi de produits chimiques pour nettoyer les membranes ;
- Traces de métaux lourds échappés des installations ;
- Aucune législation spécifique concernant la potabilité de l'eau issue de ces traitements.

Les problèmes rencontrés dans les différents procédés de dessalement sont principalement liés à l'utilisation de solution salines concentrées ou à la production d'eaux agressives (excès de gaz carbonique par rapport à l'équilibre), ce sont la corrosion, l'entartrage et le colmatage.

#### ❖ Entartrage

C'est un dépôt de sels minéraux qui a tendance à se former sur les surfaces d'échanges. Compte tenu des ions présents dans les eaux salines (calcium, magnésium, bicarbonate, sulfate),

ces dépôts sont constitués principalement par du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), de l'hydroxyde de magnésium [ $\text{Mg}(\text{OH}_2)$ ] et du sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ). Il existe différentes moyennes de lutte contre l'entartrage :

- La décarbonatation à la chaux.
- La décarbonatation à l'acide.
- La germination.
- L'adoucissement sur résines.
- Les inhibiteurs d'entartrage

Dans la plupart des cas, ce dernier procédé est le plus souvent utilisé, On y utilise des poly phosphates, des organons-phosphates, des polymères carboxyliques.

### ❖ Colmatage

Les eaux naturelles (eaux de mer ou eaux saumâtres) contiennent le plus souvent des matières organiques en suspension qui vont avoir tendance à se déposer sur les surfaces d'échange et à les colmater. Il va en résulter une augmentation de la résistance de transfert et une diminution de la capacité de production de l'installation. [32] Le développement de microorganisme, dans les parties des installations ou les conditions physico-chimiques le permettent, peut accentuer le phénomène par suite de la formation de films biologique sur les surfaces de transfert. [36] Le colmatage a comme conséquences :

- Une augmentation de la perte de charge.
- Une augmentation du passage de sels, le colmatage empêche la retro diffusion des sels rejetés par la membrane.
- Une perte de flux.

## ❖ Corrosion

Il existe différentes corrosions liées au milieu marin :

- La corrosion galvanique : due aux effets galvaniques des métaux dans un électrolyte.
- La corrosion généralisée : diminution uniforme d'épaisseur.
- La corrosion par piqûres : elle se déclenche immédiatement après immersion du métal dans l'eau de mer.
- La corrosion inter granulaire : due à précipitation des carbures dans les joints de grains. A cet effet, il est impératif d'envisager des matériaux spécifiques pour le dessalement d'eau de mer.

### I.5.2.f.ii L'impact du dessalement sur l'environnement

Ils sont dus aux rejets de saumures concentrées et aux effets de différents additifs nécessaires au traitement. On en a vu quelques aspects plus hauts.

- **Evacuation de la saumure.**

Il faut d'abord rappeler que les rejets sont soumis à la réglementation du protocole dit "Tellurique" qui donne des limites des valeurs de nombreux types de rejet.

Bien entendu, l'effet du rejet dépend très largement des conditions physiques, chimiques et biologiques de la zone où les saumures sont évacuées. Par exemple, plusieurs études ont montré que *Posidonia* (il s'agit d'une herbe marine) était très sensible à la salinité.

- **L'eutrophisation**

L'eutrophisation résulte de l'enrichissement d'une eau en sels minéraux entraînant des déséquilibres écologiques tels que la prolifération de la végétation aquatique ou l'appauvrissement du milieu en oxygène

- **Rejet des produits de traitement**

Il s'agit des résidus de corrosion, des produits d'ajustement du pH de l'eau, des produits antitartres et des agents antisalissures, des agents antimousses et des dérivés du chlore. Leurs taux doivent être inférieurs à la norme. Un aspect à ne pas négliger est l'impact que pourrait avoir des installations pompant des grands débits dans des mers fermées (Mer Rouge, Golfe

Persique). Les capacités des grosses usines devront probablement être ajustées en fonction du taux de renouvellement des eaux dans ces espaces marins restreints.

L'eutrophisation

### I.5.2.f.iii Les avantages [\[37\]](#)

Tout comme les le procédé de dessalement a des inconvénients c'est dans cette même optique quel possède quelques avantages dont :

- **Expansion des sources d'eau potable**

La force motrice du dessalement. Il est important d'être plus soucieux de l'état de nos sources d'eau actuelles, mais des alternatives sont également essentielles lorsqu'elles sont disponibles. L'océan se trouve être une très grande alternative. Avec les océans du monde comme source viable d'eau potable, cela augmenterait la ressource la plus précieuse de l'humanité par une marge exponentielle. Gardez à l'esprit que les océans représentent environ 95 +% de toute l'eau sur Terre.

- **Rendement supérieur**

Le seul autre traitement de dessalement actuellement utilisé est de type thermique. Il fonctionne de la même manière que le cycle de l'eau, en évaporant l'eau en vapeur et en la condensant, elle fournit de l'eau propre. Cette approche est très efficace pour éliminer les particules indésirables, mais la collecte et la condensation de la vapeur sont inefficaces et produisent des rendements en eau pure bien inférieurs à ceux du RO. Pour un même volume d'eau, les processus thermiques nécessiteraient près de trois fois plus d'eau de mer.

- **Eau très pure**

Après l'osmose inverse, l'eau est si pure que nous devons y réintroduire des minéraux. Ce processus élimine les minéraux de l'eau dont les humains ont besoin, ainsi que les goûts que nous connaissons. Par conséquent, le processus post-reminéralisations prend soin de cela et régule le pH.



# **Chapitre 2**

## **Généralité sur l'adsorption et la conductivité**

## **Partie 1 : l'adsorption**

### **II. Introduction**

L'eau est un élément indispensable à la survie des êtres vivants comme énoncé dans le chapitre précédent notre terre est constituée de 98 % d'eau de mer. De ce fait un des moyens que l'homme utilise est l'adsorption. L'adsorption définit la propriété de certains matériaux de fixer à leur surface des ions ou des molécules (gaz, métaux, molécules organiques...) d'une manière plus ou moins réversible [38]. Il y a transfert de matière de la phase aqueuse ou gazeuse vers la surface solide. Donc nous allons voir dans cette partie la généralité sur l'adsorption.

#### **II.1 Définition**

L'adsorption est un procédé de traitement de l'eau et de l'air, adapté pour éliminer une très grande diversité de composés toxiques dans notre environnement visant des gammes de concentrations relativement élevées. Au cours de ce processus les molécules d'un fluide (gaz ou liquide), appelé adsorbat, viennent se fixer sur la surface d'un solide, appelé adsorbant. Ce procédé définit la propriété de certains matériaux de fixer à leur surface des molécules (gaz, ions métalliques, molécules organiques, etc.) d'une manière plus ou moins réversible. Au cours de ce processus, il y aura donc un transfert de matière de la phase aqueuse ou gazeuse vers la surface du solide [39].

#### **II.2 Types d'adsorption**

La nature des liaisons formées ainsi que la quantité d'énergie dégagée lors de la rétention d'une molécule à la surface d'un solide permettent de distinguer deux types d'adsorption :

- Adsorption physique.
- Adsorption chimique.

##### **II.2.1 Adsorption physique**

Ce type d'adsorption résulte de l'établissement d'un échange de forces de faible énergie entre la surface d'un solide et des molécules à proximité de cette surface. Dans ce cas, la rétention est le résultat des liaisons de nature électrostatique de type Van Der Waals.

D'un point de vue énergétique, la physisorption se produit aux basses températures moyennant des énergies de l'ordre de 10 Kcal/mol. Elle correspond à un processus réversible (équilibre dynamique d'adsorption et de désorption) et ne conduit pas à une modification de l'identité chimique de la molécule adsorbée.

Dans le cas d'une telle adsorption, le temps de rétention de la substance adsorbée est court et la surface adsorbante peut-être recouverte de multiples couches moléculaires de produit adsorbé.

### II.2.2 Adsorption chimique

Dans ce cas, l'adsorption est due à la formation de liaisons chimiques, covalentes plus permanentes, entre l'adsorbat et la surface de l'adsorbant. Par rapport au premier, l'adsorption chimique se distingue par des énergies d'adsorption plus élevées (2 à 100 Kcal. mol<sup>-1</sup>) et par une fixation irréversible de l'adsorbat sur des sites d'adsorption très spécifiques. Elle est aussi favorisée à température élevée. [39]

L'adsorption chimique se limite à la formation d'une seule couche moléculaire contrairement à l'adsorption physique. De plus, les molécules ne seront pas adsorbées qualitativement et quantitativement de la même façon en cas d'un mélange.

Il existe deux types d'adsorption chimique :

#### A. Adsorption dissociative

Les molécules dont les atomes sont parfaitement saturés, s'adsorbent de façon dissociative c'est-à-dire avec rupture de molécule pour former des liaisons avec la surface métallique, cas de l'hydrogène (H<sub>2</sub>) adsorbé sur le platine réduit [40].

#### B. Adsorption associative

Les molécules insaturées ont la possibilité de s'adsorber sur le métal par ouverture de la liaison et formation de deux nouvelles liaisons covalentes avec la surface métallique cas de l'éthylène adsorbé sur le nickel.[40]

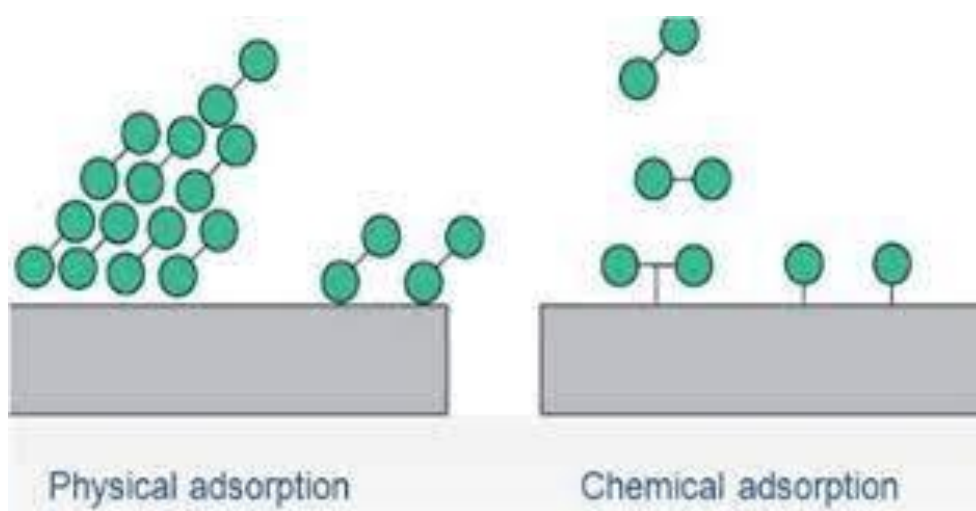


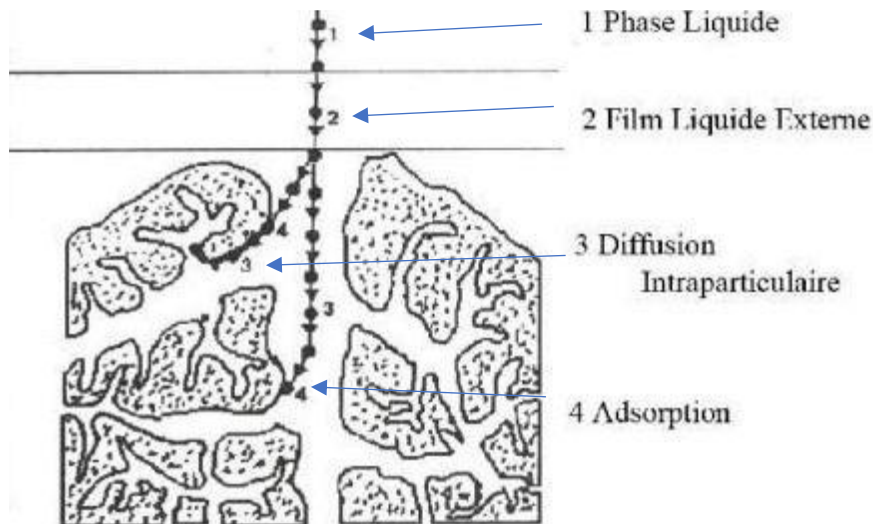
Figure II-1 : différence adsorption physique et adsorption chimique

Tableau II-1 : critères de distinction entre l'adsorption physique et chimique [39]

Paramètres	Adsorption physique	Adsorption chimique
Nature de liaison	Van der Waals	Covalente
Spécificité	Processus non spécifique	Processus spécifique
Température	Relativement basse comparée à la température d'ébullition de l'adsorbat	Plus élevée que la température d'ébullition de l'adsorbat
Réversibilité	Réversible pour les solides non poreux	Irréversible
Cinétique	Très rapide	Très lente
Nature des couches	Formation de monocouche ou multicouches	Formation de monocouche

### II.3 Description de mécanisme de l'adsorption

L'adsorption se produit principalement en quatre étapes. La figure II.2 ci-dessous représente un matériau (adsorbat) avec les différents domaines dans lesquels peuvent se trouver les molécules organiques ou inorganique qui sont susceptibles de réagir avec le solide



**Figure II-2 : domaines d'existence d'un soluté lors de l'adsorption sur un matériau microporeux**

Avant l'adsorption, le soluté va passer par 4 étapes [41] :

- Diffusion l'adsorbat de la phase liquide externe vers celle située au voisinage de la surface de l'adsorbant.
- Diffusion extra granulaire de la matière (transfert du soluté à travers le film liquide vers la surface des grains).
- Transfert intra granulaire de la matière (transfert de la matière dans la structure poreuse de la surface des grains).
- Réaction d'adsorption au contact des sites actifs, une fois adsorbée, la molécule est considérée comme immobile.

## II.4 Adsorbants

### II.4.1 Définition

Un adsorbant est un corps solide ayant la capacité de capter les molécules d'un fluide (gaz ou liquide). Les adsorbants se présentent généralement sous forme de granulés dont la taille varie de 0.5 mm à 12 mm. Ils ne doivent ni offrir de fortes pertes de charge ni se laisser emporter par le fluide. Ils ne doivent ni perdre leur forme ni leur taille lors du processus d'adsorption. Les adsorbants ayant une surface spécifique très grande par unité de masse et beaucoup de pores peuvent avoir des intérêts pratiques.

### II.4.2 Quelques types d'adsorbants et leurs applications

Dans le tableau ci-dessous nous avons énoncé quelques variétés d'adsorbant leurs sources et leurs modes d'applications :

**Tableau II-2: quelques adsorbants leurs sources et leurs applications**

Adsorbant	Source	Application
Terre de foulon	L'argile naturelle est chauffée et séchée pour obtenir une structure poreuse	Décoloration, séchage de Huiles de bricolage, kérosène et huiles de moteur
Argile activée	Bentonite ou autre argile activée. Activées par traitement à l'acide sulfurique Puis lavage, séchage et broyage.	Utilisé pour __décolorer Les produits pétroliers,
Bauxite	Une alumine hydratée d'origine naturelle Alumine, activée par chauffage à 230-815°C.	Utilisé pour -_décolorer les produits pétroliers et pour Sécher les gaz. Utilisé comme déshydratant.
Alumine	Un oxyde d'aluminium hydraté dur D'aluminium hydraté, qui est activé par chauffage pour chasser l'humidité et ensuite broyé à la taille souhaitée.	Utilisé comme déshydratant.
Os-char	Obtenu par distillation destructive Distillation d'os broyés à 600-900°C	Utilisé pour le raffinage du sucre et peut Être réutilisé après avoir été lavé et Brûlé
Gel de silice	Un produit dur, granuleux et poreux Produit obtenu à partir d'une solution de Solution de silicate de sodium après traitement Avec de l'acide. Le produit contient normalement 4 à 7 % d'eau dans le produit.	Utilisé pour la déshydratation de l'air et Autres gaz, le fractionnement des Hydrocarbures.
Tamis moléculaires	Il s'agit de cristaux poreux synthétiques Des cristaux de zéolite, des alumino- silicates.	Déshydratation des gaz et des Liquides, et séparation des mélanges gaz- Liquide d'hydrocarbures.

Adsorbant	Source	Application
Charbon actif	<p>1...Les matières végétales sont mélangée à du chlorure de calcium chlorure, carbonisée et enfin les composants inorganiques sont lessivés.</p> <p>2.. La matière organique est mélangée Avec des pierres ponces poreuses Ponce poreuse, puis chauffée et carbonisée pour déposer la matière carbonée à travers la particule poreuse Particules poreuses.</p> <p>3... Substances carbonisantes comme le bois, la sciure de bois, les coquilles de noix de coco, les noyaux de fruits, Le charbon, le lignite et l'activation D'activation avec de la vapeur d'air chaud. Il est disponible sous sous forme de granulés ou de paillettes.</p>	<p>Décoloration de solutions de sucre, Produits chimiques, médicaments, eau Purification de l'eau, raffinage des Huiles végétales et animales, Récupération de l'or et de l'argent à partir Solution de lixiviation du minerai au cyanure, Récupération des vapeurs de solvant à partir Mélanges de gaz, récupération des Hydrocarbures de l'essence à partir de gaz naturel, fractionnement des gaz D'hydrocarbures.</p>

### II.4.3 Critère de la bonne qualité de l'adsorbant [39]

Les adsorbants industriels doivent avoir les qualités suivantes :

- ❖ Une haute capacité d'adsorption.
- ❖ Une grande efficacité pour adsorber des substances de faibles concentrations.
- ❖ Une aptitude à être facilement régénérés et utilisés de nouveau.
- ❖ Un prix peu élevé

## **II.5 Facteur influençant le phénomène d'adsorption**

### **II.5.1 Nature et structure de l'adsorbant**

On peut classer les adsorbants en : adsorbants apolaires, ayant plus d'affinité pour substances non polaires. L'adsorbant polaire, adsorbe les électrolytes, dans ce cas l'adsorption est sélective. Ainsi selon la charge de la surface de l'adsorbant, les cations ou les anions seront fixés [42]. La structure de l'adsorbant joue un rôle important dans la fixation de l'adsorbat, par la taille de ses particules. En effet plus la taille est petite, plus la surface de contact sera grande. Ce qui va alors accroître son pouvoir de rétention. En outre, cette surface augmente lorsque le support est poreux. Les adsorbants industriels (essentiellement les charbons actifs) développent des surfaces spécifiques énormes (600 à environ 1200 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>).

### **II.5.2 L'influence de l'adsorbat**

L'adsorption est aussi influencée par la structure chimique des corps dissous, ainsi les composés aromatiques s'adsorbent mieux par rapport aux composés aliphatique possédant le même nombre de carbone [43].

### **II.5.3 Effet de la température**

L'adsorption physique s'effectue à des basses températures (phénomène exothermique) alors que l'absorption chimique demande des températures plus élevées (phénomène endothermique). Ce qui nécessite de fixer la température du Processus dès le départ. En pratique, il n'y a pas de modification significative dans l'intervalle 5- 20°C. [44]

### **II.5.4 Effet du Ph**

Le pH a parfois un effet non négligeable sur les caractéristiques de l'absorption dans la plupart des cas, les meilleurs résultats sont acquis aux pH les plus faibles. Cette propriété s'applique particulièrement à l'absorption de substances acides.[44]



### II.5.5 Effet de la surface superficiel

La quantité adsorbée est proportionnelle à la surface de l'adsorbant accessible à l'adsorbat qui est souvent différent de la surface spécifique total du matériau. L'absorption n'est donc pas souvent proportionnelle à la surface spécifique du solide. Elle dépend donc de la surface accessible du matériau qui est parfois difficile à estimer. [44]

### II.5.6 Effet de la porosité de l'adsorbant

La porosité est liée à la répartition de la taille des pores. Elle reflète la structure interne des adsorbants microporeux .la porosité d'un matériau adsorbant joue un rôle très significatif dans l'adsorption des composés organiques aromatiques. Le charbon macroporeux a une meilleure capacité d'adsorption que le charbon mésoporeux dans le cas de macromolécules. [44]

### II.5.7 Effet de la polarité

Un soluté polaire aura plus d'affinité pour un solvant ou pour l'adsorbant polaire.il faut que l'adsorbant et l'adsorbat soient de polarité voisine. [44]

### II.5.8 Effet de la solubilité de l'adsorbat

Plusieurs chercheurs ont montré que les constantes d'adsorption ont tendance à être plus importants quand la solubilité du composé diminue. D'autres chercheurs, présentent un certain nombre de relations entre la constante d'adsorption et diverses propriétés de la molécule organique. La solubilité d'un adsorbat joue un rôle important lors de son adsorption. Plus la solubilité est grande, plus faible sera l'adsorption. [44]

## II.6 Isotherme d'adsorption

### II.6.1 Définition d'isotherme d'adsorption [39]

Les isothermes d'adsorption sont des courbes expérimentales qui représentent les variations (masse ou volume) du substrat adsorbé (gaz ou liquide) par poids d'adsorbant en fonction de la concentration (en phase liquide) ou de la pression (en phase gazeuse).

Elles sont exprimées généralement sous formes d'équations mathématiques, non cinétiques, ils sont obtenus à partir d'expériences réalisées en réacteur statique. Elles permettent essentiellement :

- ❖ De déterminer le taux de recouvrement de la surface d'un support par un substrat.
- ❖ D'identifier le type d'adsorption pouvant se produire.
- ❖ De choisir l'adsorbant qui conviendrait le mieux à la rétention de l'adsorbat.

### II.6.2 Classification des isothermes d'adsorption

Tous les systèmes adsorbant-adsorbât ne se comportent pas de la même manière. Expérimentalement, on distingue principalement quatre classes qui sont : S (sigmoïde), L (Langmuir), H (haute affinité) et C (partition constante) [45].

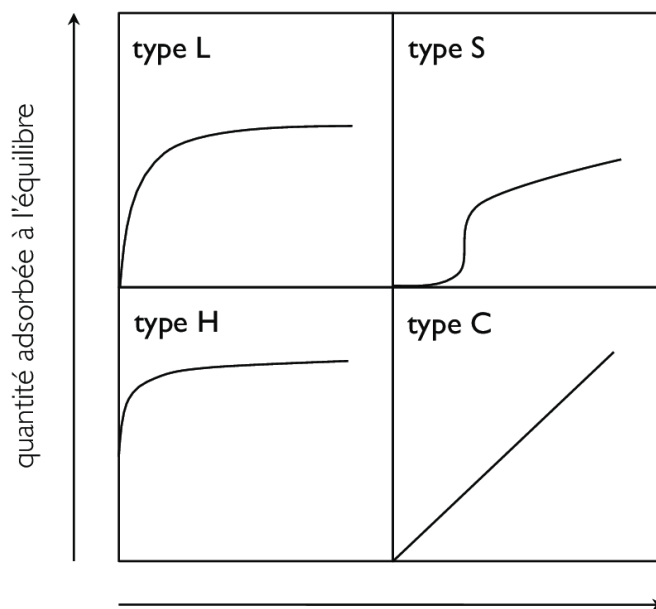


Figure II-3:classification des allures des isothermes d'équilibre d'adsorption selon leur allure (Giles et Smith, 1974)

**A - Classe L**

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

**B- Classe S**

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

Ce comportement est favorisé, d'une part, quand les molécules de soluté sont adsorbées verticalement comme c'est le cas des molécules possédant un seul groupe fonctionnel et d'autre part, quand les molécules se trouvent en compétition d'adsorption forte avec le solvant [45].

**C- Classe H**

La partie initiale de l'isotherme est presque verticale, la quantité adsorbée apparaît importante à concentration quasiment nulle du soluté dans la solution. Ce phénomène se produit lorsque les interactions entre les molécules adsorbées et la surface du solide sont très fortes. L'isotherme de classe H est aussi observée lors de l'adsorption de micelles ou de polymères formées à partir des molécules de soluté [45].

**D- Classe C**

Les isothermes de cette classe se caractérisent par une partition constante entre la solution et le substrat jusqu'à un palier. La linéarité montre que le nombre de sites libres reste constant au cours de l'adsorption. Ceci signifie que les sites sont créés au cours de l'adsorption. Ce qui implique que les isothermes de cette classe sont obtenues quand les molécules de soluté sont capables de modifier la texture du substrat en ouvrant des pores qui n'avaient pas été ouverts préalablement par le solvant [45].

### II.6.3 Modèles d'isothermes d'adsorption

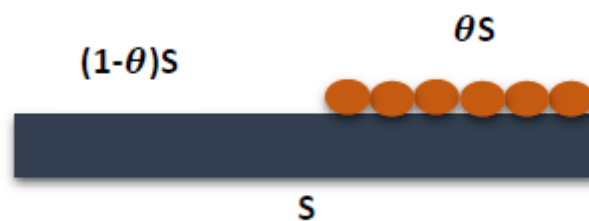
Plusieurs lois ont été proposées pour l'étude de l'adsorption. Elles expriment la relation existante entre le développement de l'adsorption et la pression du gaz à adsorber à une température donnée. Nous rappellerons ci-dessous les principales lois utilisées.

#### II.6.3.a Modèles de Langmuir [39]

La théorie de Langmuir (1918) a permis l'étude de l'adsorption de molécules de gaz sur des surfaces métalliques. Elle repose sur les hypothèses suivantes :

- ✚ La surface du solide est uniforme, tous les sites sont identiques.
- ✚ Chaque site ne peut fixer qu'une seule molécule, donc l'adsorption est localisée et l'enthalpie d'adsorption demeure constante quel que soit le taux de recouvrement.
- ✚ Il n'y a pas d'interaction entre les molécules adsorbées à la surface.
- ✚ La réaction est réversible (c'est-à-dire qu'il y a équilibre entre l'adsorption et la désorption).
- ✚ L'adsorption se produit en monocouche.

A partir de ces hypothèses, l'équation de Langmuir est établie en admettant qu'à l'équilibre d'adsorption, il y a autant de molécules qui s'adsorbent que de molécules qui se désorbent.



**Figure II-4: Représentation schématique du recouvrement mono-moléculaire d'une surface.**

Soient  $S$  la surface réelle du solide et  $\theta$  la fraction de ce solide recouvert par des molécules. La vitesse d'adsorption est proportionnelle à la surface du solide inoccupé c'est-à-dire à  $(1 - \theta) \cdot S$  et à la pression du gaz. La vitesse de désorption est proportionnelle à la surface occupée. Puisqu'il y a équilibre entre les molécules en phase gazeuse et celles qui sont adsorbées, on peut écrire :

A l'équilibre :  $V_{\text{adsorption}} = V_{\text{désorption}}$  (II.1)

Avec :  $V_{\text{adsorption}} = k_{\text{ads}} P (1 - \theta) S$  (II.2)

$V_{\text{désorption}} = k_{\text{dés}} \theta S$  (II.3)

Remplaçons l'équation (II.2) et (II.3) dans l'équation (II.1), on obtient :

$$k_{\text{ads}} P (1 - \theta) S = k_{\text{dés}} \theta S \quad (\text{II.4})$$

$k_{\text{ads}}$  et  $k_{\text{dés}}$  représentent les constantes de vitesse d'adsorption et de désorption. Comme dans le cas des constantes de vitesse de réaction, ils comprennent le facteur température. L'équation précédente se réarrange :

$$\frac{k_{\text{ads}} P}{k_{\text{dés}} + k_{\text{ads}} P} = \theta = \frac{bP}{1 + bP} = \frac{V}{V_m} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$b = \frac{k_{\text{ads}}}{k_{\text{des}}}$  le coefficient d'adsorption c'est une constante d'équilibre qui indique l'affinité de

l'adsorbat envers la surface (capacité d'adsorption à la saturation).

$V$  : volume adsorbé par quantité d'adsorbat.

$V_m$  : volume maximale adsorbable qui correspondant au recouvrement par une couche mono-moléculaire de soluté sur toute la surface accessible du solide.

En traçant  $\theta = f(P)$ , on obtient le graphe :

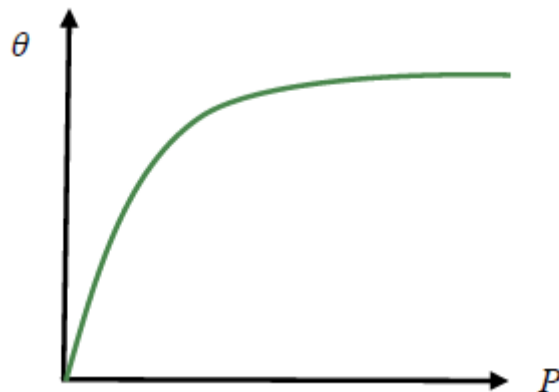
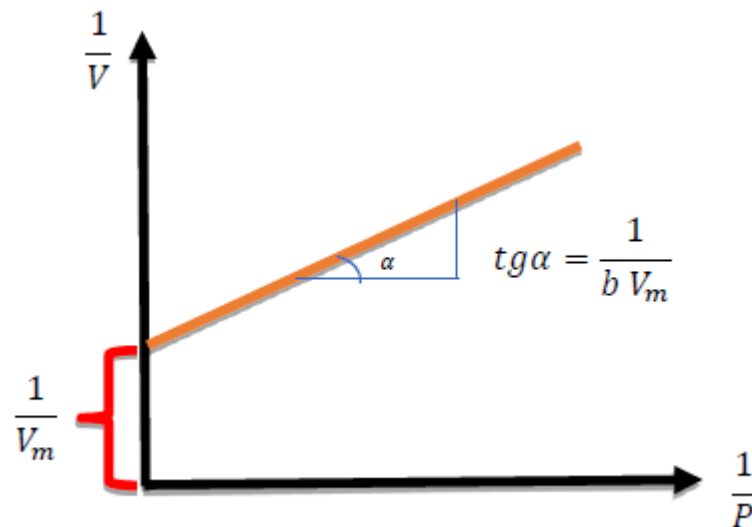


Figure II-5: Représentation de l'isotherme de LANGMUIR.

À une pression quelconque, il est préférable de transformer la fonction hyperbolique  $\theta = f(P)$  en une fonction linéaire ; sous la forme :

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{V_m} + \frac{1}{bV_m} \times \frac{1}{P} \quad (\text{II.6})$$

$\frac{1}{V} = f\left(\frac{1}{P}\right)$  est une droite d'ordonnée à l'origine  $\frac{1}{V_m}$  et de pente  $\frac{1}{bV_m}$ , ce qui permet déterminer les constantes  $b$  et  $V$



**Figure II-6: Représentation linéaire de l'isotherme de LANGMUIR.**

Dans le cas d'une adsorption en phase liquide, Les caractéristiques de l'isotherme de Langmuir sont également définies par le facteur de séparation,  $R_L$ , qui est calculé par la relation suivante :

$$R_L = \frac{1}{(1+k_L \cdot C_0)} \quad (\text{II.7})$$

$C_0$  étant la concentration initiale de l'adsorbat dans la solution.

Les valeurs de  $R_L$  renseignent sur le type d'adsorption qui peut être soit :

- ❖ Défavorable pour  $R_L > 1$ .
- ❖ Irréversible pour  $R_L = 0$ .
- ❖ Favorable pour  $0 < R_L < 1$ .

II.6.3.b Modèles de Freundlich [39]

En 1962, Freundlich a proposé un modèle pour décrire l'adsorption en milieu gazeux ou liquide. Ce modèle est représenté par une équation à deux paramètres ( $K_F$  et  $n$ ) et consiste en une distribution exponentielle des énergies des sites d'adsorption à la surface du support et se caractérise par une adsorption en site localisé. Il peut être décrit par l'équation :

$$V = K_f P^{\frac{1}{n}} \tag{II.8}$$

Avec :

$K_f$  et  $n$  : constantes de Freundlich, sont indicatifs de l'intensité et de la capacité d'adsorption.

Des valeurs de  $n > 1 \Rightarrow n \in [2,10] \Rightarrow$  On a une adsorption favorable.

Des valeurs de  $n < 1 \Rightarrow$  on a une faible adsorption.

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

$$\ln V = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln P \tag{II.9}$$

Ainsi, si l'on porte  $\ln V$  en fonction de  $\ln P$ , on doit obtenir une droite en pente  $1/n$  et d'ordonnée à l'origine  $\ln K_f$

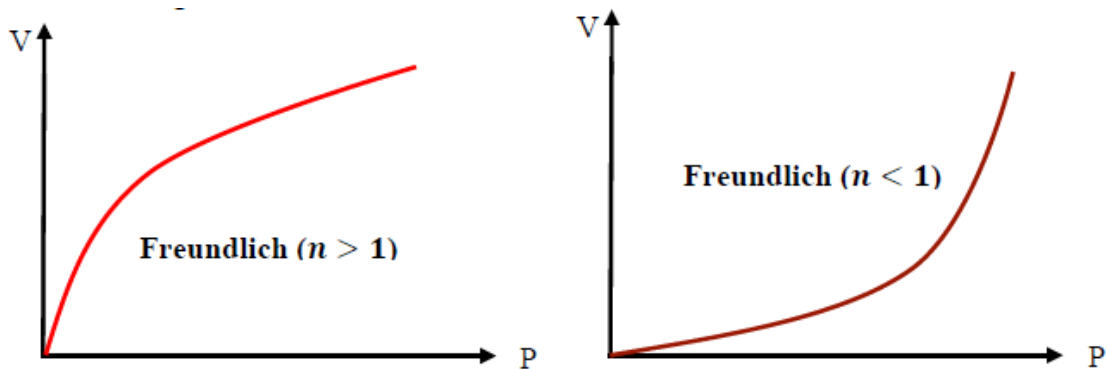


Figure II-7 : Allure de la courbe d'isotherme de Freundlich

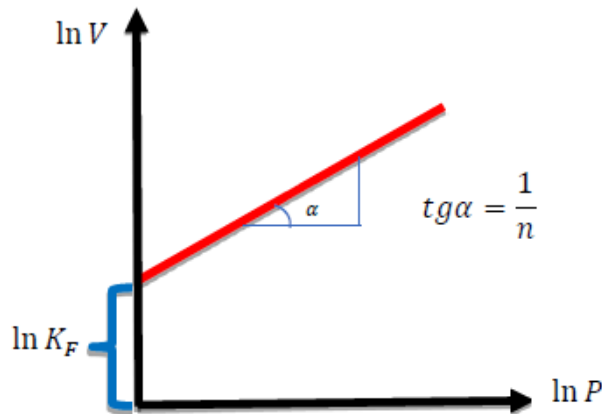


Figure II-8: Evaluation graphique des constantes d'adsorption de modèle de Freundlich.

**II.6.3.c Modèle Isotherme B. E. T. (BRUNAUER, EMMET et TELLER)**

Ceci postule que le phénomène d'adsorption implique la formation de plusieurs multicouches à la surface plutôt qu'une seule. Sur cette base, Brunauer, Emmett et Teller ont dérivé l'isotherme d'adsorption suivante, connue sous le nom d'isotherme d'adsorption BET.

$$\frac{P}{[V(P^o - P)]} = \frac{1}{[V_m C]} + \left[ \frac{(C - 1)}{V_m C} \right] \left[ \frac{P}{P^o} \right] \tag{II.10}$$

Avec :

V est le volume, ramené aux conditions standard du gaz adsorbé à la pression

P et à la température T,

P<sup>o</sup> est la pression de vapeur saturée de l'adsorbat à la température T,

V<sub>m</sub> Est le volume de gaz adsorbé, ramené aux conditions normales, lorsque la surface est recouverte d'une couche unimoléculaire.

C'est une constante à toute température donnée, donnée par  $e^{E1-E2/RT}$

E1, est la chaleur d'adsorption pour la première couche et E2, est celle pour la deuxième couche supérieure



### II.6.4 Cinétique d'adsorption

La connaissance de la cinétique des opérations fondées sur le phénomène d'adsorption est très importante dans le cadre de la pratique considérable pour la mise œuvre optimale d'un adsorbant et aussi pour connaître les facteurs qu'il faut optimiser pour fabriquer ou améliorer un adsorbant conduisant à la cinétique la plus rapide possible.

Le processus d'adsorption se produit selon une succession des étapes qui détermine la vitesse globale de processus :

- Le transfert de masse externe ; implique le transfert et la diffusion de l'adsorbat à travers un film liquide vers la surface de l'adsorbant.
- Le transfert de masse interne ; qui implique la pénétration de l'adsorbat dans le système poreux de l'adsorbat.

Au cas où l'adsorbant n'est pas poreux, c'est l'étape de transfert de masse externe qui contrôle la vitesse de l'adsorption, néanmoins, si l'adsorbant est poreux, ce qui est le cas le plus souvent. C'est l'étape de transfert de masse interne qui limite la vitesse d'adsorption [46] plusieurs modèles ont été développés afin d'examiner le mécanisme de processus d'adsorption d'un liquide sur la surface d'un solide.

#### II.6.4.a Modèle de pseudo premier ordre

Il a été supposé dans ce modèle que la vitesse d'adsorption à l'instant  $t$  est proportionnelle à la différence entre la quantité adsorbée à l'équilibre  $Q_e$  et la quantité  $Q_t$  adsorbée à cet instant et que l'adsorption est réversible [47]. La constante de vitesse d'adsorption du premier ordre est déduit à partir du modèle établi par LANGRANGE [48]. La loi de vitesse s'écrit :

$$\frac{dQ_t}{dt} = k_1(Q_e - Q_t) \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$Q_e$  : Quantité d'adsorbât à l'équilibre, par gramme d'adsorbant (mg/g)

$t$  : Temps de contact (min)

$K_1$ : Constantes de vitesse d'adsorption pour le premier ordre ( $\text{min}^{-1}$ ) L'intégration de l'équation (II.11) donne :

$$\log(Q_e - Q_t) = \log Q_e - \frac{k_1}{2,303} t \quad (\text{II.12})$$

#### II.6.4.b Modèle de la cinétique du pseudo- second ordre

L'équation du pseudo-second ordre est souvent utilisée avec succès pour décrire la cinétique de la réaction de fixation des polluants sur l'adsorbant [49]. Le modèle du pseudo-second ordre (II.13) permet de caractériser la cinétique d'adsorption en prenant en compte à la fois le cas d'une fixation rapide des solutés sur les sites les plus réactifs et celui d'une fixation lente sur les sites d'énergie faible :

$$\frac{dQ_t}{dt} = k_2(Q_e - Q_t)^2 \quad (\text{II.13})$$

L'intégration de l'équation (II.13) donne :

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$K_2$ : Constante de vitesse d'adsorption pour le pseudo-second ordre ( $\text{g.mol}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ).

$Q_e$  : Quantité d'adsorbât à l'équilibre par gramme d'adsorbant (mg/g).

#### II.6.5 Thermodynamique d'adsorption

Le phénomène d'adsorption est toujours accompagné par un processus thermique, soit exothermique ou endothermique. La mesure de la chaleur d'adsorption est le principal critère qui permet de différencier la Chimisorption de la physisorption. Les paramètres thermodynamiques tels que l'enthalpie libre standard  $\Delta G^\circ$ , l'enthalpie standard  $\Delta H^\circ$  et l'entropie standard  $\Delta S^\circ$  ont été déterminés en utilisant les équations suivantes

$$k_d = \frac{Q_e}{C_e} \quad (\text{II.15})$$

$$\Delta G^\circ = -RT \cdot \ln k_d \quad (\text{II.16})$$

$$\ln k_d = \left( \frac{\Delta S^\circ}{R} \right) - \left( \frac{\Delta H^\circ}{R} \right) \frac{1}{T} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$K_d$ : Constante de distribution ;

$Q_e$  : Capacité d'adsorption à l'équilibre (mg. g<sup>-1</sup>) ;

$C_e$  : Concentration à l'équilibre du soluté en solution (mg/L) ;

$R$  : Constante des gaz parfaits (J. mol<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>)

$T$  : Température absolue (K).

### II.6.6 Capacité d'adsorption

La capacité d'adsorption d'un adsorbant est définie comme étant la quantité maximale d'adsorbat (masse ou volume) adsorbée par unité de poids d'adsorbant pour une température donnée [68]. Elle nécessite la prise en compte de nombreux paramètres aussi bien pour l'adsorbat (taille des molécules, solubilité dans l'eau...) que pour l'adsorbant (surface spécifique, structure et type des particules constitutives...).

Elle peut être généralement exprimée par la relation suivante :

$$Q = x/m \quad (\text{II.18})$$

Où :

$X$  : masse d'adsorbat à la surface de l'adsorbant (mg),

$M$  : masse de l'adsorbant (g). D'autres facteurs comme le pH, la température et la force ionique (effet des sels) peuvent influencer la capacité d'adsorption

### II.6.7 Application d'adsorption

Les applications industrielles concernant le traitement des solutions diluées (Purification et Extraction) sont nombreuses [50]. Les traitements les plus importants concernent :

- La décoloration des liquides.
- Les purifications des divers produits pétroliers et de matières grasses animales et végétales.
- Le traitement des eaux.
- Le raffinage des produits pétroliers.
- La catalyse de contact.
- La déshumidification et la désodorisation de l'air.
- La dessiccation de produits organiques industriels.

### II.6.8 Utilisation d'adsorption

Les principales utilisations de l'adsorption sont :

a) Séparations gazeuses : Cette opération est appliquée dans la déshumidification de l'air ou d'autres gaz, l'élimination d'odeurs ou d'impuretés sur des gaz, la récupération des solvants et le fractionnement des hydrocarbures volatils.

b) Séparations liquides : cette opération conduit à l'élimination des traces d'humidité dans les essences, le fractionnement des mélanges d'hydrocarbures, la décoloration des produits pétroliers et des solutions aqueuses de sucre [50].

## Partie 2 : la conductivité

### II.7 Introduction

Un courant électrique résulte du mouvement de particules électriquement chargées en réponse à des forces agissant sur celles-ci à partir d'un champ électrique appliqué. Dans la catégorie des matériaux les plus solides, un courant résulte du flux d'électrons, lequel est appelé conduction électronique. Dans tous les conducteurs, semi-conducteurs et beaucoup de matériaux isolés, seule la conduction électronique existe, et la conductivité électrique est fortement dépendante du nombre d'électrons disponibles pour participer au processus de conduction. La plupart des métaux sont des conducteurs d'électricité extrêmement bon, du fait du nombre important d'électrons libres pouvant être excités dans une couche énergétique vide et disponible. Dans l'eau et les matériaux ioniques ou liquides, un mouvement des ions chargés peut se produire. Ce phénomène produit un courant électrique que l'on appelle conduction ionique.[51].

#### II.7.1 Définition de conductivité

La conductivité d'une substance est définie comme l'habilité ou la capacité à conduire ou transmettre la chaleur, l'électricité, ou le bruit". Ses unités sont les Siemens par mètre [S/m] en SI et en microohms par centimètre [mmho/cm] en unités américaines. Son symbole est  $\kappa$  ou  $\sigma$ . La conductivité électrique est le rapport entre la densité du courant ( $J$ ) et l'intensité du champ électrique ( $e$ ). Elle est l'inverse de la résistivité ( $r$ , [ $W^*m$ ]). Un certain nombre de facteurs entre en jeu pour qu'une solution conduise l'électricité :

- La concentration
- La mobilité des ions
- La valence des ions
- La température

Les capacités de conductivité électrique sont propres à chaque matériau. Certains laissent mieux passer le courant électrique que d'autres, ils sont alors considérés comme de très bons, voire d'excellents conducteurs.[52]

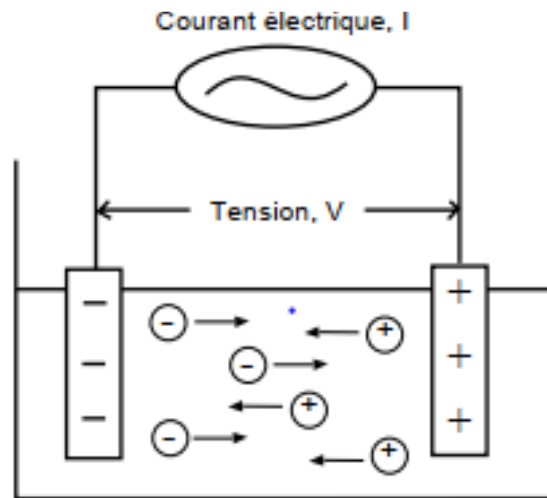


Figure II-9: Migration des ions en solution

### II.7.2 Mesurer la conductivité

La conductivité électrique a l'aide d'un appareil appelé conductimètre. La conductivité électrique est désignée par la lettre sigma :  $\sigma$ . D'un type de matériau à un autre, la conductivité électrique peut aller de  $10^8 \text{ S.m}^{-1}$  à  $10^{-22} \text{ S.m}^{-1}$ . Plus elle est élevée, plus la solution est conductrice. La conductivité se mesure en appliquant un courant électrique alternatif (I) à deux électrodes plonger dans une solution qui mesure la tension (V) qui en résulte. Lors de cette expérience, les cations se déplacent en direction de l'électrode négative, les anions se dirigent vers l'électrode positive et la solution se comporte comme un conducteur électrique.

### II.7.3 La solution conductrice

La conductivité est mesurée généralement dans des solutions aqueuses d'électrolytes. Une solution d'électrolytes contient des ions mobiles qui facilitent le déplacement du courant, et donc la conductivité électrique. Parmi ces solutions, solides ou liquides, on peut citer :

- ✓ L'acide sulfurique
- ✓ Le sulfate de cuivre, de zinc ou encore de nickel
- ✓ La cryolite, une solution solide
- ✓ L'hydroxyde de potassium
- ✓ L'eau salée

Ils sont surtout utilisés dans le domaine de la chimie. Il faut savoir que le sang est aussi un conducteur électrique. C'est pour cette raison qu'il conduit le courant dans le corps en cas d'électrisation.[51]

#### **II.7.4 Dissociation Electrolytes forts & Electrolytes faibles**

Un électrolyte faible est une substance qui se dissocie partiellement dans l'eau. La solution elle-même porte le nom « d'électrolyte faible ». Les acides faibles, comme l'acide acétique dont seulement environ 1 % des molécules se dissocient dans l'eau pour former des ions, sont des électrolytes faibles puisqu'ils ne sont pas totalement ionisés. Il y a aussi quelques sels qui forment des électrolytes faibles, comme le chlorure de mercure (II), puisqu'il ne s'ionise que partiellement en solution aqueuse.

Contrairement à un électrolyte faible, l'électrolyte fort s'ionise (se dissocie) presque totalement dans l'eau. La solution elle-même porte le nom « d'électrolyte fort ». La différence entre un électrolyte fort et un électrolyte faible se rapporte donc au degré de dissociation des substances dissoutes dans l'eau.

#### **II.7.5 Définition des termes utilisés**

##### **II.7.5.a Conductance**

La conductance électrique  $G$  est l'inverse de la résistance électrique  $R$  d'une solution entre deux électrodes et se mesure en siemens  $S$

$$G = \frac{1}{R} \quad (S) \quad (II.19)$$

Avec  $S=1/\Omega$  (ohms)

##### **II.7.5.b Résistivité**

La résistivité d'un matériau, généralement symbolisée par la lettre grecque rho ( $\rho$ ), représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. La résistivité est la grandeur inverse de la conductivité (symbole :  $\sigma$ ).

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (II.20)$$

### II.7.5.c La constante de cellule

La constante de cellule est le rapport de la distance (d) entre les électrodes sur la surface des électrodes (a)

$$K = \frac{d}{a} \quad (\text{II.21})$$

K= constante de cellule (cm-1)

a = surface réelle des électrodes (cm<sup>2</sup>)

d= distance entre les électrodes (cm)

### II.7.5.d Conductivité

La conductivité électrique noté K caractérise l'aptitude d'un matériau ou d'une solution à laisser les charges électriques se déplacer librement et donc permettre le passage d'un courant électrique.

$$K = G \times k$$

K= conductivité (S/cm)

G= conductance (S), avec  $G = 1/R$

k= constante de cellule (cm-1)

### II.7.5.e Etalon de conductivité

Une solution de conductivité connue est utilisée pour étalonner la chaîne de mesure de conductivité.

### II.7.5.f TDS (Total Dissolved Solids)

Le TDS correspond à la mesure de la concentration totale des espèces ioniques présente dans un échantillon. La grandeur est relative à la solution étalon utilisée lors de l'étalonnage de l'instrument.

### II.7.5.g Facteur TDS

Les lectures de conductivité sont converties en lectures TDS par multiplication avec un facteur mathématique connu. Ce facteur dépend du matériau de référence utilisé pour préparer l'étalon.



### II.7.5.h Salinité

La salinité est une mesure sans unité qui correspond au poids des sels dissous dans de l'eau de mer.

### II.7.5.i Le conductimètre

Un conductimètre, ou conductivimètre, est un appareil permettant de mesurer une propriété de conductivité, elle applique un courant alternatif  $I$  à une fréquence optimale à deux électrodes actives, puis il mesure le potentiel  $V$  qui en résulte. Le courant et le potentiel vont tous deux être utilisés pour déterminer la conductance. En se servant de la conductance obtenue et de la constante de cellule, le conductimètre va afficher la conductivité.

# **Chapitre 3**

## **Généralité sur la bentonite**

### **III. Introduction**

Notre travail est fondé sur une espèce d'argile connu sous le nom de « bentonite ». La bentonite est une roche argileuse d'origine volcanique, malléable et très adsorbants [53]. Elles se forment généralement dans un environnement sédimentaire marin à basse énergie, à partir de cendres volcaniques qui se sont accumulées dans l'eau et ont formé des couches argileuses. Elle désigne généralement une poudre minérale constituée essentiellement de l'argile de montmorillonite (famille des smectites). Dans leur état naturel, la plupart des gisements de bentonite sont hétérogènes ; ils sont constitués de smectites mélangées ou interstratifiées avec l'illite et/ou la kaolinite et d'autres impuretés. La bentonite est largement utilisée dans de nombreux secteurs industriels (pharmacie, cosmétique, chimie, génie civil, agroalimentaire ...). Elle est utilisée pour la réalisation de barrières étanches pour les déchets industriels et ménagers (géomembranes bentoniques) et les déchets radioactifs (barrières ouvragées ; poudre compactée), pour la stabilité des boues de forages. Dans ce chapitre, nous présentons, en premier lieu, la structure et les propriétés des matériaux argileux en général, afin de mieux distinguer les spécificités des smectites ainsi que la montmorillonite. Cette famille d'argile est la composante majeure de la bentonite commerciale utilisée dans le présent travail. Cependant, il convient de souligner qu'une bentonite peut être composée de smectites mélangées ou inters stratifiés avec l'illite et/ou la kaolinite. On note que ces dernières sont moins abondamment traitées dans la littérature que les smectites et les montmorillonites et aux modes d'associations entre les particules dans le système bentonite-eau.[54]

#### **III.1 Les argiles**

##### **III.1.1 Définition**

Les argiles sont issues de la décomposition des roches siliceuses, par désagrégation Physique et mécanique puis par altération chimique. Elle contient généralement des particules élémentaires dont le diamètre des grains est inférieur à deux micromètres ( $< 2\mu\text{m}$ ) qui représentent les entités cristallines (phase minérale pure), appelées minéraux argileux responsables de ses propriétés tel que le gonflement, la plasticité, et les propriétés d'adsorption . Dans les sols, ces particules élémentaires sont en général liées entre elles par des ciments de nature très diverse (carbonates, composés organiques, composés minéraux amorphes ou oxydes

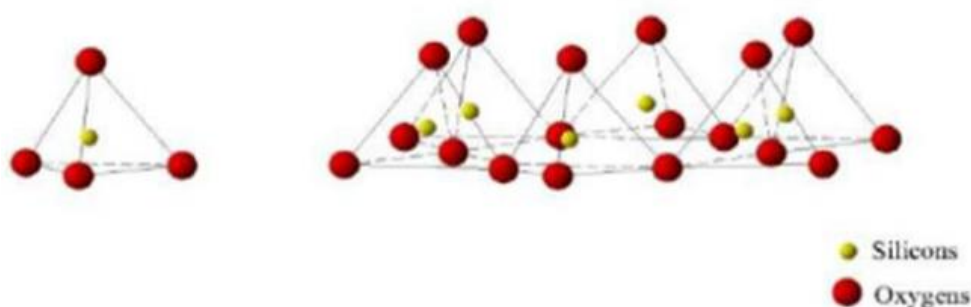
et hydroxydes de fer et d'aluminium, quartz, feldspaths), au sein d'agrégats de tailles beaucoup plus grandes [55].

### III.1.2 Structures des argiles

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) :** C'est la structure élémentaire du cristal. Le feuillet est Constitué de deux types de motifs cristallins : types tétraédriques et type octaédrique.

- ✚ Type tétraédrique : Le silicium occupe le centre d'un tétraèdre dont les 4 sommets sont occupés par 4 oxygènes. Les 4 charges positives du « Si » sont neutralisées par les 4 charges négatives de l'oxygène (Figure III.1) [55]



**Figure III-1: Structure de tétraèdre siliceux [56]**

- ✚ Type octaédrique : Un atome d'aluminium ou de magnésium au centre d'un octaèdre dont les 6 sommets sont occupés par les ions  $O^{2-}$  ou  $OH^-$

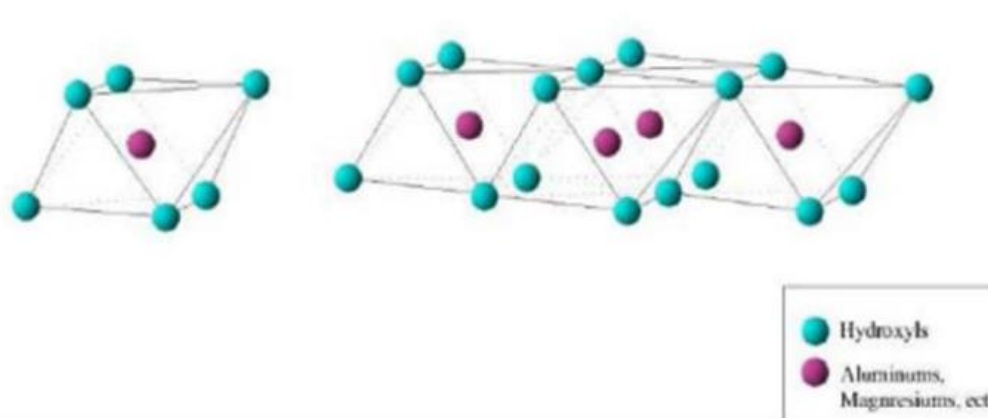


Figure III-2 : Structure d'octaèdre alumineux [56]

**B) Feuillet** : C'est une superposition de couche tétraédrique et octaédrique. Cet assemblage est très stable et très énergétique. Il y a deux types de feuillet : type 1/1 (T/O) tel que : la Kaolinite et type 2/1 (T/O/T) comme la montmorillonite

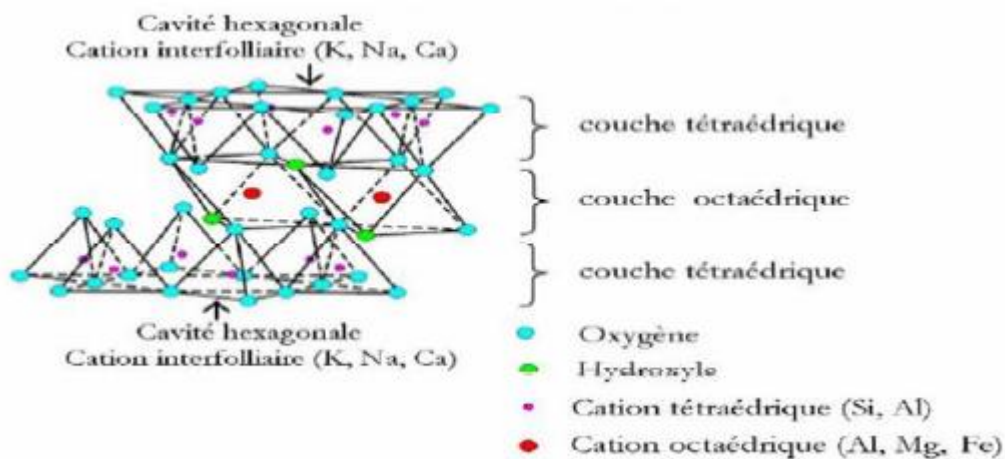


Figure III-3: Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicates 2/1

**C) Espaces inters foliaires** : Les feuillets sont séparés par des espaces interfoliaires. Ils sont d'ordre de quelques angströms. On trouve dans cet espace divers cation tel que :  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  et  $K^+$ ...etc. Il est augmenté par un procédé physique (thermique) ou chimique (acide) qu'on appelle activation [57].

## III.1.3 Classification des argiles

Les différents groupes de minéraux argileux se différencient par l'arrangement des couches tétraédriques et octaédriques. On distingue 4 groupes [57] :

**a) Minéraux à 7 Å :** (Kaolinite, Halloysite, Dombasite, ...)

Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T : O ou de type 1 : 1.

**b) Minéraux à 10 Å :** (Pyrophyllite, Illite, Montmorillonite, Saponite,). Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T : O : T ou de type 2 : 1.

**c) Minéraux à 14 Å :** (chlorites)

Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T : O : T et de couches octaédriques interfoliaires.

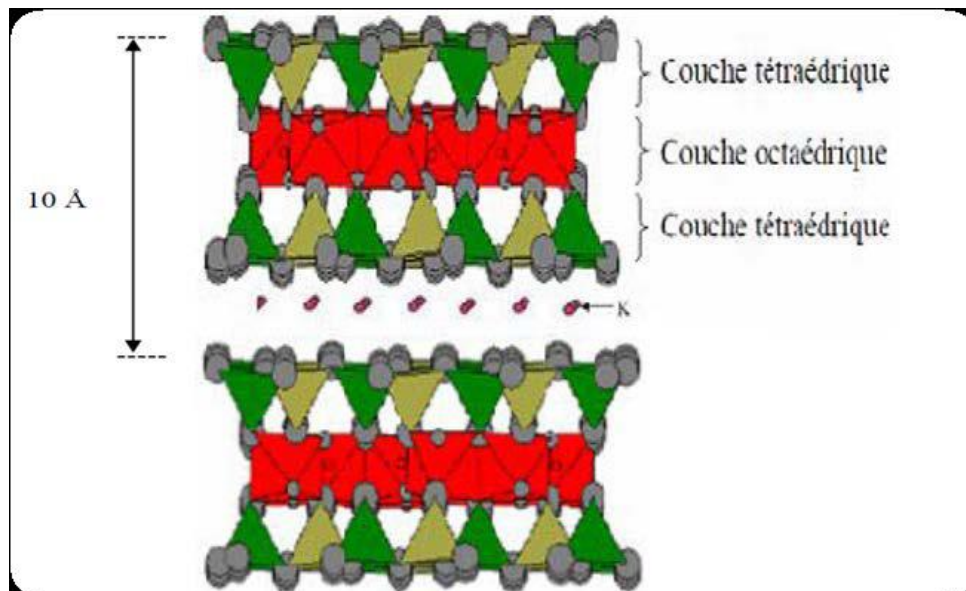
**d) Minéraux interstratifiés :** L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus.

Les principaux groupes de minéraux argileux sont classés dans le tableau III.1

**Tableau III-1 : tableau simplifié montrant la classification des principaux groupes de minéraux [55]**

Groupe de Minéraux Argileux	Espèce Minérale	Structure T= couche de tétraèdre O= couche d'octaèdre
Kaolinites	Kaolinite Halloysite Dickite	Minéraux à 2 couches T-O T-O
Smectites	Montmorillonite Saponite Beidellite Nontronite	Minéraux à 3 couches T-O-T T-O-T
Illites Vermiculites Micas	Illite Vermiculite Muscovite Biotite	H <sub>2</sub> O, cations
Chlorites	Chlorite	Minéraux à 4 couches T-O-T-O T-O-T-O
Sépiolites Palygorskites	Sépiolite (écume de mer) Attapulgite	Minéraux en lattes <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">T-O-T</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">T-O-T</div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 5px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">T-O-T</div> </div>

L'argile qui fait l'objet de notre travail est connue sous le nom de bentonite. Elle désigne généralement une poudre minérale constituée essentiellement de l'argile de montmorillonite (famille des smectites). Nous présentons par la suite, une revue bibliographique sur la microstructure de la bentonite, son hydratation et ses propriétés de gonflement et de dispersion.



**Figure III-4: Représentation des empilements de tétraèdres siliceux et d'octaèdres alumineux [58]**

### III.2 Les propriétés physico-chimiques des argiles

Les roches argileuses ont les propriétés physiques suivantes :

- ❖ Elles sont fragiles, elles cassent et se raient facilement.
- ❖ Elles sont colorées, leur couleur varie selon les minéraux dont elles sont constituées.
- ❖ Elles sont transformables, on peut les cuire pour obtenir des céramiques.
- ❖ Elles sont non miscibles à l'eau, elles ne se dissolvent pas mais gonflent pour former une pâte. [59]

**III.3 Les argiles montmorillonitiques (les Bentonites)****III.3.1 Origine de la bentonite**

L'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riches en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux, qui font partie principalement du groupe des smectite. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming, Etats-Unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de Montmorillon, dans le département de Vienne (France). En Algérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent à l'ouest de l'Algérie. On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et de celle de Mostaganem (M'zila) avec des réserves de deux millions de tonnes [60].

**III.3.2 Type de bentonite**

En fonction de la nature du cation échangeable présent, il existe à l'état naturel trois (3) types de bentonites :

**III.3.2.a Bentonites sodiques**

Ce sont des argiles rares. Leur ion interfoliaire ou échangeable est  $\text{Na}^+$ . Elles ont un fort pouvoir de gonflement et d'adsorption. [55]

**III.3.2.b Bentonites calciques**

Elles constituent la plus grande part de gisements exploités dans le monde. Elles contiennent essentiellement des ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en position interfoliaire. Ces argiles présentent un taux de gonflement de 3 à 7 fois le volume initial. [55]

**III.3.2.c Bentonite de potassium**

Aussi connu sous le nom de bentonite de potasse ou de K-bentonite, la bentonite de potassium est une argile illitique riche en potassium formée à partir d'une altération des cendres volcaniques. [55]



### III.3.3 Bentonite activée

Afin d'améliorer les propriétés d'adsorption des bentonites calciques, ces dernières sont le plus souvent activées par du carbonate de sodium puis séchées et broyées ; on obtient ainsi des bentonites calciques activées dont les propriétés sont égales ou supérieures à celles des bentonites sodiques. Les propriétés de ces bentonites ainsi activées ou permutées sont moins stables dans le temps (3 à 18 mois) et dépendent de l'activation et des taux de magnésium, calcium et sodium. Ces différents types de bentonites se présentent sous forme de poudre ou de granulés sphériques ou cylindriques. Elles ont des couleurs très variables allant du blanc pour les produits les plus purs au gris, beige ou vert pour les autres.

### III.3.4 Structures de la bentonite

La bentonite est une roche argileuse, friable, tendre et onctueuse au toucher, sa teinte dépend des composés minéraux et impuretés (matière organique et oxydes des métaux) qui lui sont étroitement associés. Elle est blanche, grise ou légèrement jaune. Elle se caractérise par une capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement. Elle est constituée, principalement, par un minéral argileux appelé montmorillonite dont la structure est schématisée par la figure III.5

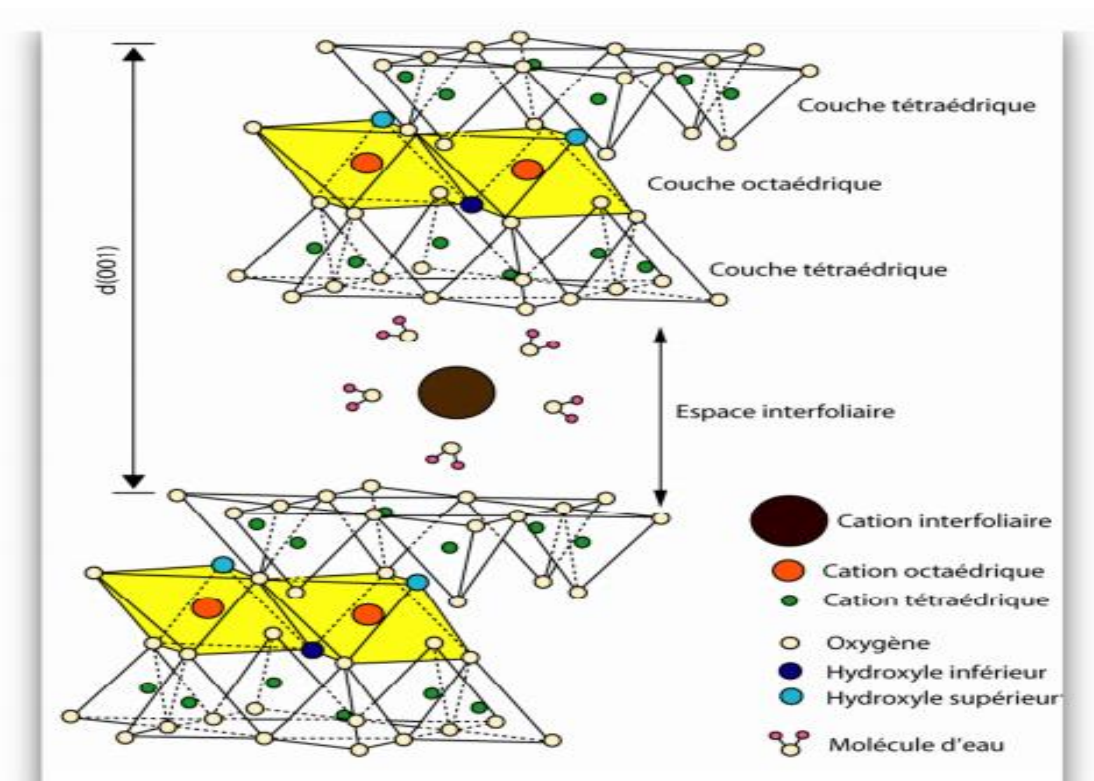


Figure III-5: La structure d'une montmorillonite (d'après Grim, 1968).

### III.3.5 Composition chimique de la bentonite

La bentonite est le terme commercial de montmorillonite. Cette dernière représente plus de 80% de la totalité du minéral, le reste ce sont des impuretés. Le tableau suivant présente l'analyse d'un échantillon de bentonite.

**Tableau III-2 : Analyse chimique de la bentonite naturelle [61]**

Oxydes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O+	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
(%)	61,0	16,10	2,80	3,53	3,15	1,50	1,60	0,04	0,22	10,16	6,44

Eléments en trace	Ba	Sr	Cu	Pb	Zn	S	SO <sub>4</sub>
Ppm	210	160	20	35	70	270	810

### III.3.6 Propriétés physico-chimiques de la bentonite

Les substitutions isomorphiques dans la partie cristalline de la montmorillonite sont à l'origine de la charge négative à la surface des feuillets. Cette charge négative, appelée charge permanente, permet à la montmorillonite d'échanger des cations (capacité d'échange cationique, CEC) et d'adsorber des molécules d'eau (capacité de gonflement). La montmorillonite a plusieurs autres caractéristiques intéressantes qui peuvent être résumées par sa grande surface spécifique, son état colloïdal.[55]

#### III.3.6.a Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique d'une argile résulte de la substitution iso-morphique des atomes d'aluminium de la couche octaédrique par des atomes de Mg<sup>2+</sup> et Fe<sup>3+</sup> et de la substitution de Si<sup>4+</sup> par Al<sup>3+</sup> dans la couche tétraédrique induisant un déficit en charge du feuillet qui est compensé par la présence des cations compensateurs. Les liaisons entre les feuillets sont faibles et encore plus avec la présence des molécules d'eau, ce qui permet aux cations compensateurs interfoliaires ou superficiels de s'échanger avec les cations des solutions mises en contact avec l'argile, ces cations sont appelés « cations échangeables » [55].

**III.3.6.b Gonflement**

Le gonflement consiste en une séparation des feuillets jusqu'à une distance interfoliaire d'équilibre sous une pression donnée. La propriété de gonflement est due au caractère hydrophile de toute sa surface, en raison de la présence de cations hydratables dans les galeries interfoliaires, des molécules d'eau peuvent pénétrer entre les feuillets et les écarter [55].

**III.3.6.c Dispersion**

La propriété commune aux argiles est de se disperser dans l'eau pour former des suspensions plus ou moins solides. Inversement, lorsqu'on évapore progressivement des suspensions argileuses, celles-ci s'agglomèrent en formant des agrégats assez durs. La dispersion est le résultat de l'interaction entre l'eau et le cation échangeable, particulièrement le Sodium [62].

**III.3.6.d Flocculation**

La flocculation est le contraire de la dispersion, c'est le phénomène ou l'ensemble des particules se rassemblent au fond du récipient, suite à l'addition d'un agent flocculateur [63]

**III.3.6.e Colloïdalité**

Cette propriété est d'une grande importance pour les procédés de purification des argiles [64]. Elle est liée à la présence de charges négatives à la surface de chaque grain d'argile. Le caractère colloïdal se traduit par le recouvrement de chaque grain d'argile par une double couche d'ions hydrosolubles de charges opposées.

**III.3.6.f Surface spécifique**

Les argiles sont largement utilisées comme des adsorbants à cause de leur grande surface spécifique [65], qui comprend la somme de deux surfaces, l'une externe comprise entre les particules et l'autre interne correspondant à l'espace interfoliaire [66]. Elle est exprimée en m<sup>2</sup> par gramme d'argile, l'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé. La surface spécifique semble être un paramètre très important dans la caractérisation précise de l'argile. En effet, plus le sol est fin plus la surface spécifique est élevée.

### III.3.7 Utilisations de la bentonite

La bentonite est l'argile industrielle la plus importante en raison de son principal composant de montmorillonite qui lui confère une capacité d'absorption et de gonflement très élevées qui sont exploités dans différents domaines dont [67] :

- ❖ Protection environnementale.
- ❖ Forage.
- ❖ Les céramiques.
- ❖ Les peintures.
- ❖ L'agroalimentaire.
- ❖ Décoloration des huiles.
- ❖ Raffinage du pétrole.
- ❖ Additif dans la fabrication du papier.
- ❖ Génie civil (additif dans le ciment).
- ❖ Traitement des eaux usées.
- ❖ La pharmacie et la cosmétique.

# **Chapitre 4**

## **Partie expérimentale**

## IV. Objectif

Notre objectif principal est tout simplement de diminuer la concentration en sel de l'eau de mer et de la saumure par le procédé d'adsorption sur la bentonite active. Dans le but de préserver les matériaux de la station de dessalement et de protéger l'écosystème marin.

### IV.1 Matériels et méthodes

#### IV.1.1 Matériels et appareillage

Tableau IV-1: tableau des matériels et appareillage

Matériels	Appareillage
Bécher –Erlenmeyer – cristallisoir	Une balance analytique type (OHAUS)
Eprouvette graduée – Fiole jaugée	Une étuve +Réfrigérateur
Entonnoir –papier filtre – papier joseph	Agitateur magnétique +barreau magnétique
Buchner – Thermomètre	Conductimètre + pH-mètre
Verre de montre – Mortier -spatule	Hotte aspirante
Pipette graduée –pissette	Pompe a pression

#### IV.1.2 Réactifs utilisés

Dans ce tableau ci-dessous vous trouverez les réactifs utilisés au cours de ce travail

Tableau IV-2: tableau réactifs utilisées

Operations analytiques	Réactifs
Purification de la bentonite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une solution de HCl (0.05M)</li> <li>• Une solution de NaCl (0.1M)</li> </ul>
Modification de la bentonite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une solution de NH<sub>4</sub>Cl (0.2M)</li> </ul>

## IV.2 Méthodologie de travail

### IV.2.1 Choix de la bentonite

L'argile utilisée est une montmorillonite naturelle extraite de gisement de Roussel provenant de Maghnia (Algérie). La composition chimique est donnée dans le tableau IV-3 :



Figure IV-1: la bentonite de Maghenia

Tableau IV-3: composition chimique de la bentonite de Maghenia.

Constituants	$SiO_2$	$Al_3O_3$	$Fe_2O_3$	MgO	$K_2O$	CaO	$TiO_2$	$Na_2O$	As
%massique	69.4	14.7	1.2	3.56	0.8	0.81	0.2	0.33	0.05

#### IV.2.2 Purification de la bentonite

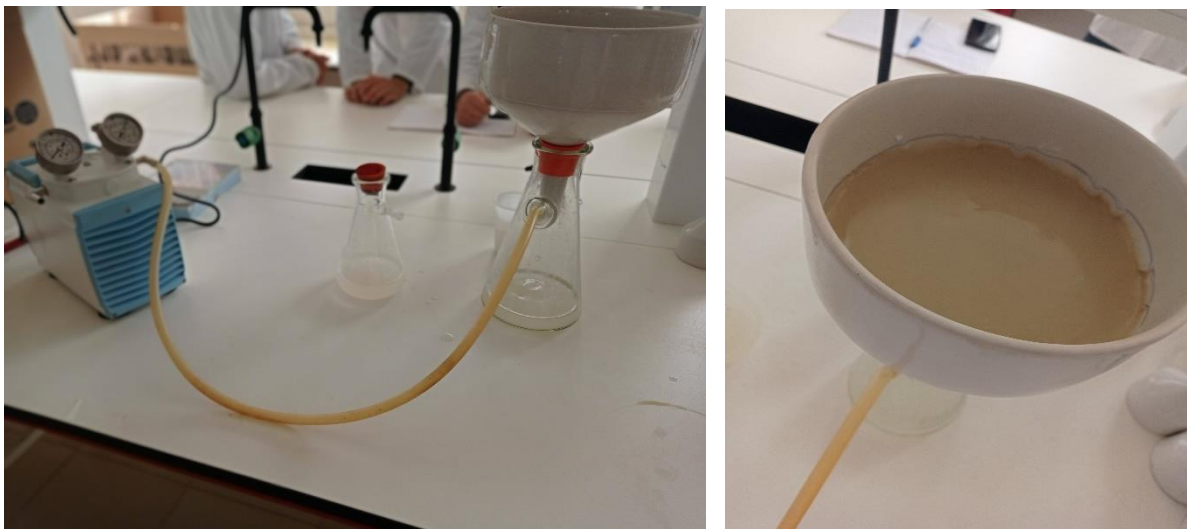
- La bentonite broyée et tamisée aux préalables est ensuite introduite dans une solution de (HCl 0.05M) (200g de bentonite pour 1 litre de solution).
- Le mélange est laissé se décanter à l'aire libre, puis lavée à l'eau distillée jusqu'à pH neutre.
- Elle est en site dispersée, dans une solution de NaCl à 0.1M, sous agitation pendant 12 heure environ.
- Après décantation la bentonite est redispersée dans l'eau distillée et la fraction argileuse est séparée.



**Figure IV-2: la décantation à l'air libre.**

Les suspensions récupérées sont filtrées puis sodifiées une deuxième fois avec le NaCl, ensuite lavées à l'eau distillée pour éliminer l'excédent de sel.

- L'argile débarrassée de chlorure est séchée à 80 °C pendant trois jours puis finement broyée.
- Elle est alors prête pour une activation par le chlorure d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ).



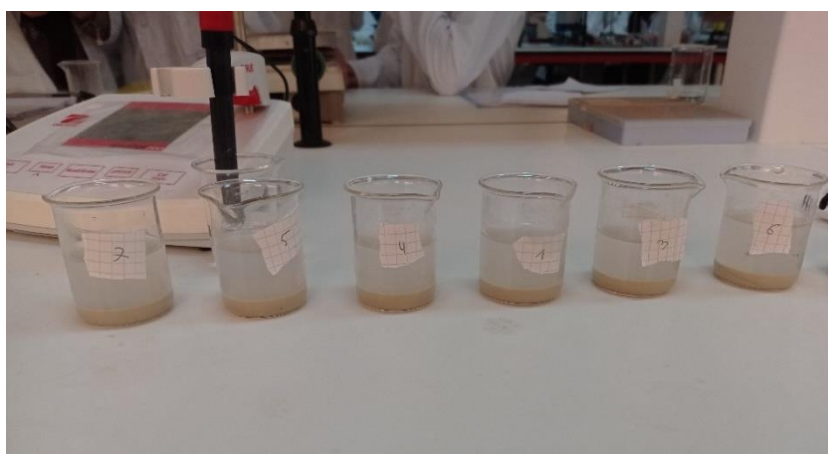
**Figure IV-3 : filtration de la bentonite**



**IV.2.3 Activation de la bentonite**

Notre bentonite de Maghnaï est activée avec des taux différents avec le chlorure d’ammonium ( $NH_4Cl$ ) soit des taux allant de 10 à 70 %.

Après 1h30min de contact entre les deux réactifs, la bentonite est lavée abondamment avec de l’eau distillé jusqu’ à l’obtention d’un pH neutre, filtrée puis séchée à l’étuve à 80c° pendant 24 heures.



**Figure IV-4 : activation de la bentonite**

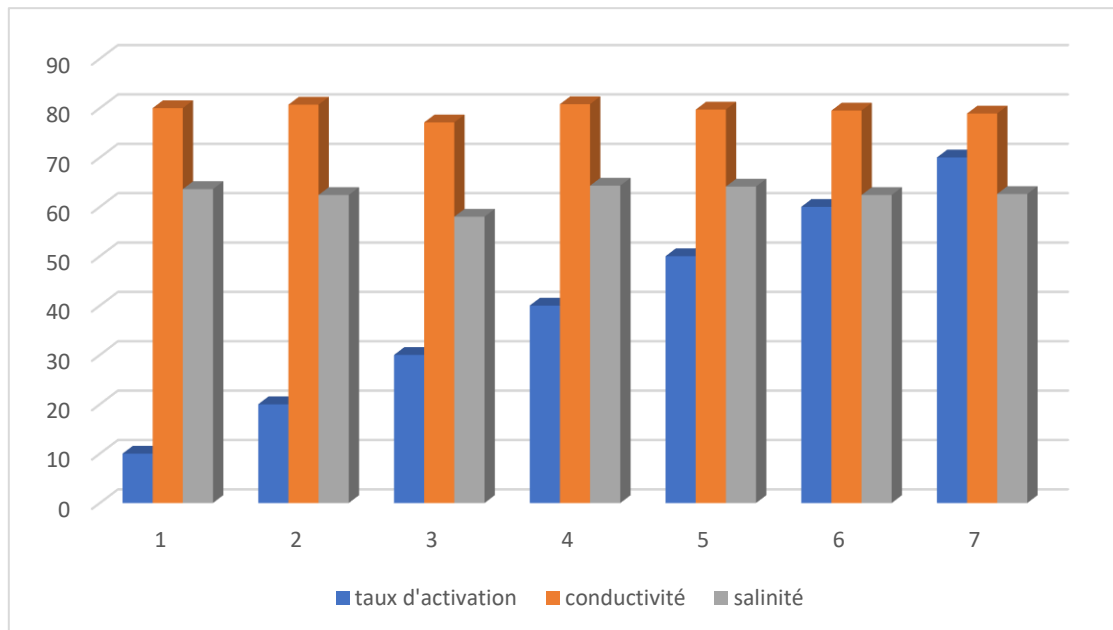
Les résultants de ce test sont énumérés dans le tableau ci-dessous :

Condition initiale de l’eau de mer :

- Conductivité =82.2 ms/cm
- Température = 18 °C

Taux d’activation (%)	10	20	30	40	50	60	70
Conductivité (ms/cm)	80	80.7	77.1	80.8	79.7	79.5	78.9
Salinité	63,6	62.4	58	64.3	64.1	62.4	62.6
Température (°C)	19.5	20.7	21.5	19.5	19	20	19.5

**Tableau IV-4 : résultats des analyses du paramètres de taux d’activation**



**Figure IV-5 : effet du taux d'activation dans l'adsorption de la saumure**

- ✚ D'après l'histogramme ci-dessous on conclut qu'on a une bonne d'adsorption a un taux d'activation à 30%

#### IV.2.4 Caractérisation de la bentonite active

La bentonite activée ayant donnée un maximum d'adsorption du la saumure est caractérisée au moyen des expériences suivante :

##### IV.2.4.a 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 :

$$P = \frac{m}{V_a} \left( \frac{g}{cm^3} \right) \quad (IV.1)$$

- ✚ Dans une éprouvette graduée on introduit 1 g de bentonite qui correspond a 1 ml donc la densité apparente de notre bentonite est  $p=1g/ml$

##### IV.2.4.b 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 :

$$\epsilon = \frac{\frac{m_2 - m_1}{\rho_{\text{méthanol}}} - V_2}{V_1} \quad \text{(IV.2)}$$

Avec :

$m_1$  : masse de la bentonite

$m_2$  : masse de la bentonite + méthanol

$\rho_{\text{méthanol}}$  : masse volumique du méthanol

Avec :

Masse éprouvette vide	Masse éprouvette +bentonite	Masse net bentonite ( $m_1$ )	Masse éprouvette +éthanol +bentonite	Masse net éthanol +bentonite ( $m_2$ )
42,51g	43,51g	1g	44,58g	2,07g

D'après l'équation (IV.2) on aura

$$\epsilon = \frac{\frac{2,07 - 1}{0,791} - 2}{1} \quad \epsilon = -0,64$$

#### IV.2.4.c 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'a un poids constant  $m_2$ . L'humidité (H) a été déterminée en appliquant la relation suivante :

$$\text{Taux d'humidité}(\%) = \left[ \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \right] \times 100 \quad \text{(IV.3)}$$

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 mase  $m_2 = 4,2 \text{ g}$  en appliquant l'équation IV.3 on obtient :

$$\text{Taux d'humidité} = \frac{5 - 4,02}{5} \times 100 \quad \text{Taux d'humidité est de } 16 \%$$

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

#### IV.2.4.d 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

#### IV.2.4.e Mesure de la conductivité

Placer dans un flacon de 500 ml, 20g d'argile de bentonite et 100 ml d'eau distillée exactement mesurée (fiolle jaugée), agiter une heure sur l'agitateur rotatif et laisser reposer une demi-heure puis filtrer dans un Erlenmeyer de 250 ml et effectuer la mesure de conductivité en notant la température.

#### IV.2.4.f Indice de l'iode

(En mg. g-1) permet de mesurer la microporosité d'un argile grâce à une Solution d'iode. Cette valeur est à corrélér avec la surface spécifique BET. Elle traduit l'affinité d'adsorption du matériau pour de petites molécules.

#### Mode opératoire

Pour déterminer l'indice d'iode de nos adsorbants nous avons suivi le protocole ci-dessous : Peser avec précision 1 gramme de poudre de bentonite et l'introduire dans un erlenmeyer de 250 ml. Puis ajouter 10 ml d'acide chlorhydrique et agiter jusqu'à ce que la bentonite soit complètement mouillé. Ensuite, placer l'erlenmeyer sur une plaque chauffante, faire bouillir pendant 30 secondes. Laisser refroidir à la température ambiante et ajouter 100 ml de la solution titrée de l'iode 0,1 N, boucher le flacon immédiatement et agiter vigoureusement pendant 30 secondes. Filtrer à travers le papier filtre. Mélanger le filtrat et en prélever 50 ml et l'introduire dans un autre erlenmeyer de 250 ml puit titré avec la solution titrée de thiosulfate. Ajouter à la fin du titrage 2 ml d'empois d'amidon. Enregistrer le volume final de thiosulfate ajouté et calculer l'indice d'iode comme suit :

$$\text{Indice d'iode} = \frac{(V_2 - V_1) \times N \times 126.93}{m} \quad \text{(IV.4)}$$

**m** : La masse de bentonite (g).

**V<sub>2</sub>**: Volume de thiosulfate pour le titrage à blanc.

$V_1$  : Volume de thiosulfate pour le titrage après adsorption.

$N$  : La normalité de la solution de thiosulfate utilisé

#### IV.2.4.g Point de charge zéro (PZC) de la bentonite

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 à 11,95 (par addition de NaOH et HCl 0.1M) ensuite nous avons ajouté dans chaque bécher 25 mg de bentonite brute. 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.

**Tableau IV-5: variation de pH<sub>f</sub>-pH<sub>i</sub> en fonction de pHi**

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
pHi	2	3	3,8	4,9	6	7,1	8	9,1	10,2	11,95
pH <sub>f</sub>	2,08	3,53	4,75	5,48	6,5	6,70	7,26	7,83	8,29	8,91
pH <sub>f</sub> -pH <sub>i</sub>	-0,08	-0,53	-0,95	-0,58	-0,5	0,4	0,74	1,27	1,91	-0,08

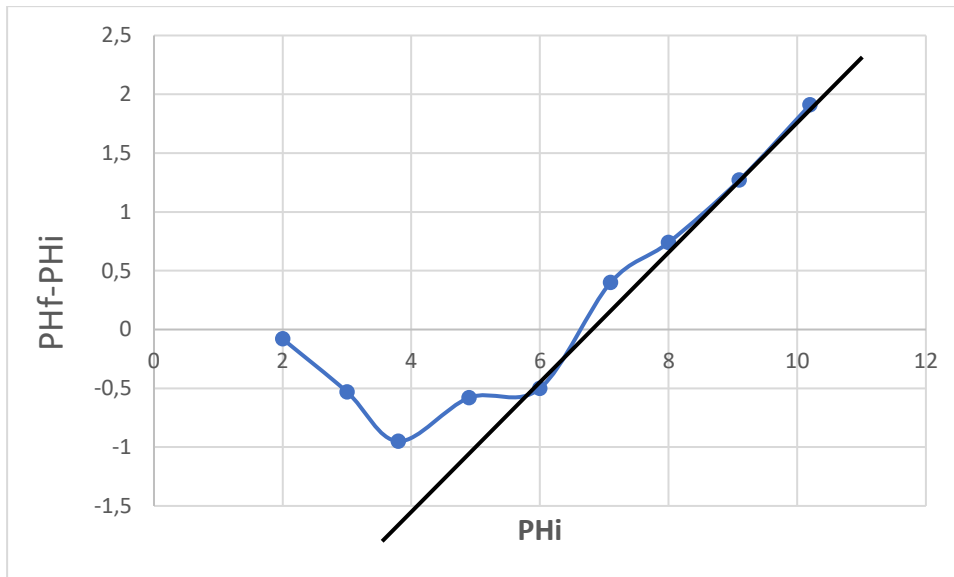


Figure IV-6 courbe de variation de  $pH_f-pH_i$  en fonction de  $pH_i$

Le PZC est de 6 ce qui signifie que la surface d'adsorbant est chargée positivement au pH inférieur à 6, et négativement à un pH supérieur à 6.

#### IV.2.5 Optimisation des conditions d'adsorption

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

- 1) Le taux d'activation
- 2) Le temps de contact
- 3) La masse de la bentonite active.
- 4) La température.

Les conditions opératoires sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau IV-6 : les conditions opératoires du processus d'adsorption de la saumure

Paramètres	Conditions opératoire
Taux d'activation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Masse (bentonites) = 0.5g</li> <li>• Taux d'activation (%) = (10-20-30-40-50-60-70)</li> <li>• <math>V((NH_4Cl))=500ml</math></li> <li>• <math>C((NH_4Cl))=0.2M</math></li> <li>• Temperature= 20°C</li> </ul>
Temps de contact	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Masse (bentonites) =0.5g</li> <li>• V (eau de mer) =50 ml</li> <li>• Temps= (60-120-180-240-300-360) min</li> <li>• T= 21c°</li> </ul>
Masse de bentonite active	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Masse (bentonites)= (0.2-0.4-0.6-1-1.2-1.4-1.6)</li> <li>• V (eau de mer) =50ml</li> <li>• -temps (min)=60</li> <li>• Temperature(°c)= 22</li> </ul>
Température	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Masse (bentonites)=1.6</li> <li>• V(eau de mer)=50ml</li> <li>• Temps (min)= 60</li> <li>• T(°c)=25-30-35-40-45-50</li> </ul>

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

$$Q_e = \frac{c_0 - c_e}{m} * V \quad (\text{IV.5})$$

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

$$R\% = \frac{c_0 - c_e}{c_0} \quad (\text{IV.6})$$

### IV.3 Résultats et discussions

#### IV.4 Etude fondamentale d'adsorption sur la bentonite active selon les différents paramètres

Pour améliorer les conditions d'adsorptions nous avons faits des tests dans le but d'optimiser notre bentonite à travers les paramètres suivants :

##### IV.4.1 Paramètre de temps de contact

###### IV.4.1.a Effet du temps de contacts

- ✓ On prend une série des béchers ; dans chaque bécher (0.5 g) de masse de bentonite activée.
- ✓ On ajoute 50 ml d'eau de mer
- ✓ On les met sous agitation pendant a des temps de (60-120-180-240-300-360) min
- ✓ Après agitation on filtre nos mélanges
- ✓ On passe ensuite à la mesure de la conductivité

Les résultants de ce test de temps de contact sont dans le tableau ci-dessous :

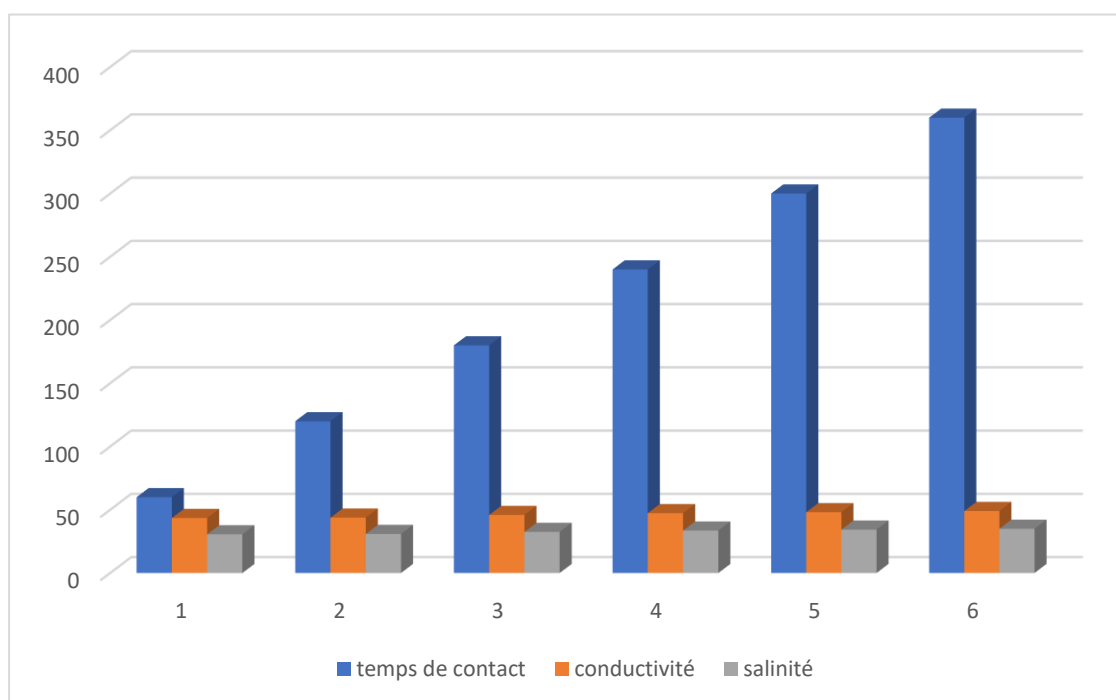
Condition initiale de l'eau de mer :

- Conductivité = 50.7 ms/cm
- Température = 18.3 °C



**Tableau IV-7: résultats d'analyse du paramètre du temps de contact sur l'adsorption de la saumure**

<b>Temps de contact (min)</b>	60	120	180	240	300	360
<b>Conductivité (ms/cm)</b>	43,5	43,8	45,9	47,3	48,1	49
<b>Salinité</b>	30,6	30,9	32,5	33,6	34,3	35
<b>Température (°c)</b>	18,5	20,6	20,5	20,4	20,5	21,1



**Figure IV-7 : représentation graphique de l'effet de la masse dans l'adsorption de la saumure**

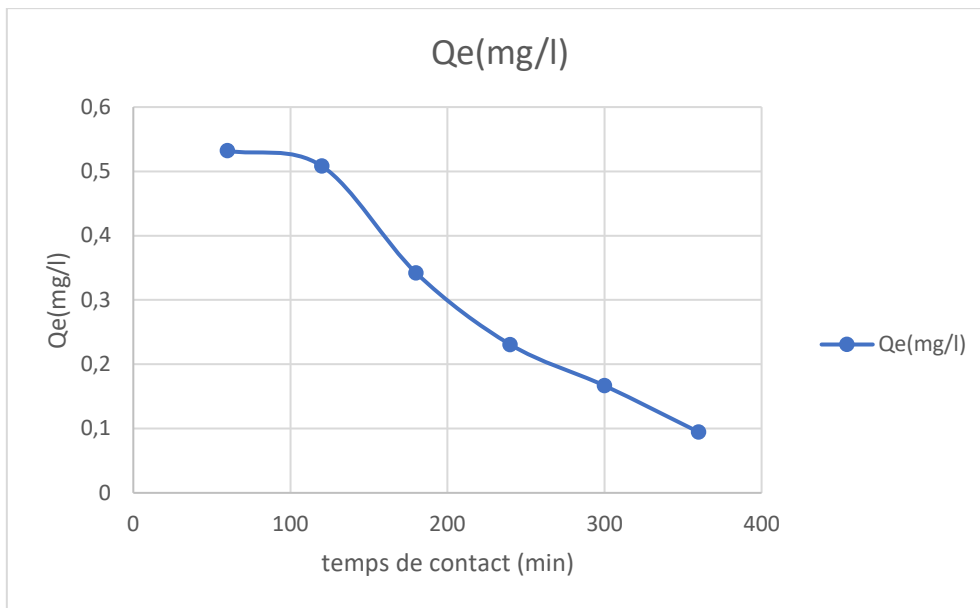
✚ En vue du graphique ci-dessus on remarque qu'on a eu une meilleure adsorption après un temps de contact d'une heure de temps.

Tableau IV-8 : effet du temps de contact sur l'adsorption de la saumure

Temps de contact	Conductivité	$C_e(g/l)$	$Q_e(mg/g)$
60	64,3	30,680	0,532
120	75,3	30,917	0,5083
180	76,3	32,578	0,3422
240	77	33,693	0,2307
300	67,5	34,333	0,1667
360	66,8	35,055	0,0945

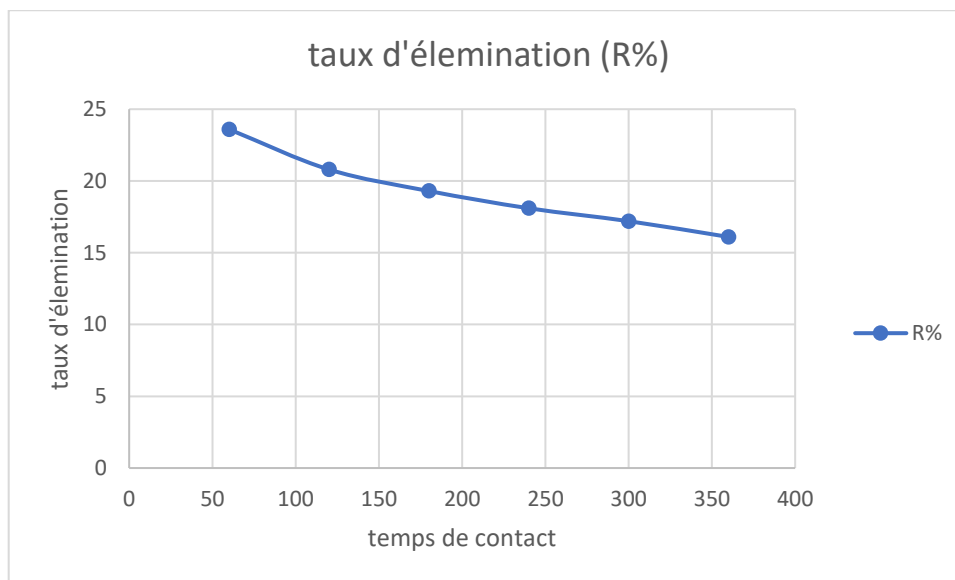
Tableau IV-9 : effet du temps de contact sur le taux d'élimination dans l'adsorption de la saumure

Temps de contact (min)	Taux élimination (%)
60	23,6
120	20,8
180	19,3
240	18,1
300	17,2
360	16,1



**Figure IV-8 : graphique de la quantité de sel adsorbé en fonction du temps de contact dans l'adsorption de la saumure**

- ✚ L'adsorption atteint un maximum de 30.68 (g/l) ou 0.532 (mg/g) au bout de 1h (60 min).
- ✚ Nous avons confirmé ce résultat par le graphe IV-9



**Figure IV-9 : graphique du taux d'élimination en fonction du temps de contact dans l'adsorption de la saumure**

- ✚ D'après le graphe ci-dessus on déduit qu'il y a un phénomène de désorption en fonction du temps de contact durant le processus donc a on un meilleur taux d'élimination au temps  $t=60$  min

**IV.4.1.b Modèle cinétique du pseudo premier ordre**

Les résultats obtenus à partir du graphe V.30 nous permet de conclure si la cinétique de l'adsorption de bentonite activée à 30% avec l'eau de mer est du premier ordre.

Le tracé de  $\log(q_e - q_t) = f(t)$  en utilisant l'équation :  $\log(q_e - q_t) = -\frac{k_1}{2.303} * t + \log q_e$  donne une droite linéaire de

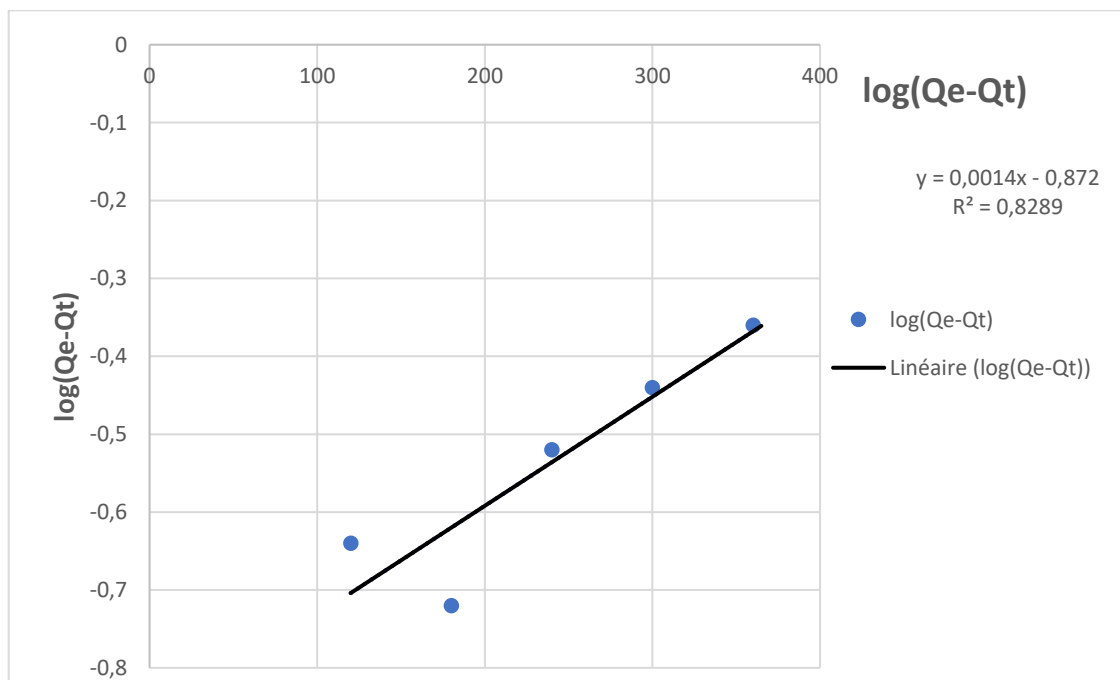
- Pente = -k1
- L'ordonné à l'origine = log qe

Ces paramètres nous permettent de calculer :

- La constante de vitesse k1
- La capacité d'adsorption à l'équilibre

**Tableau IV-10 : les résultats de modèle cinétique du premier ordre**

Temps (min)	120	180	240	300	360
Log (Qe-Qt)	-1,63	-0,72	-0,52	-0,44	-0,36



**Figure IV-10 : représentation graphique du modèle cinétique du premier ordre**

IV.4.1.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 à activité 30% est du second ordre.

Le tracé de  $\frac{t}{Qt} = f(t)$  en utilisant l'équation  $\frac{1}{Qt} = \frac{1}{Qe} * t + \frac{1}{(K2(Qe))^2}$  donne une droite linéaire de :

- Pente =  $\frac{1}{Qe}$
- L'ordonnée à l'origine =  $\frac{1}{Q(K2(Qe))^2}$

Ces paramètres nous permettent de calculer

- La constante de vitesse K2
- La capacité de sorption à l'équilibre Qe

Tableau IV-11 : les résultats de modèle cinétique du second ordre

Temps (min)	120	180	240	300	360
t/Qt	236,08	526,01	1040,31	1799,64	3809,52

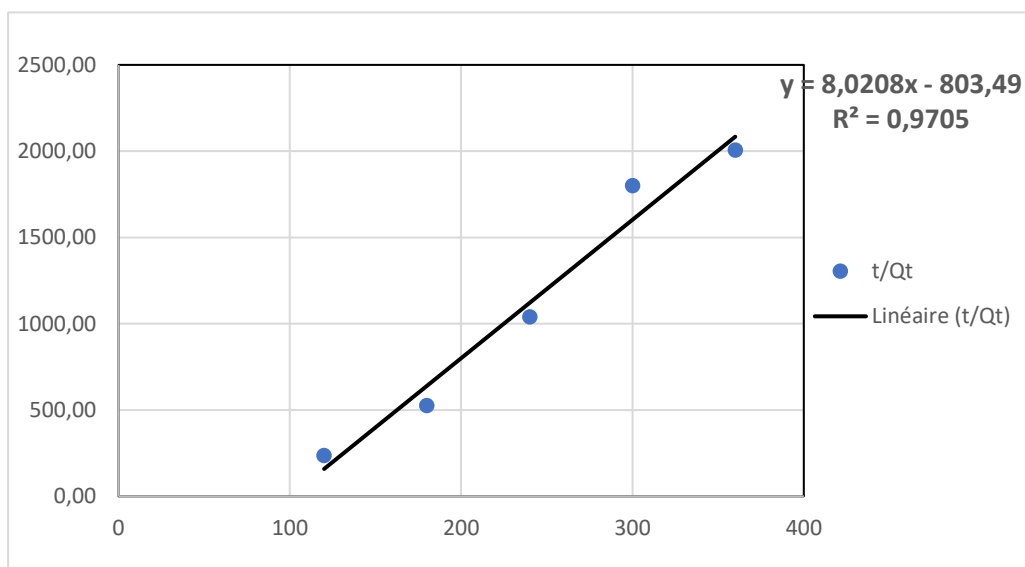


Figure IV-11 : représentation graphique du modèle cinétique du second ordre

**Tableau IV-12 : paramètres cinétiques de l'adsorption de la saumure sur la bentonite de Maghenia.**

Adsorbant	Adsorbat	Cinétique du 1 <sup>er</sup> ordre			Cinétique du 2 <sup>ème</sup> ordre		
		K1(min)	Qe(mg/g)	R <sup>2</sup>	K2	Qe(mg/g)	R <sup>2</sup>
Saumure	Bentonite	3,22*10 <sup>-3</sup>	0.13	0.82	0.068	0.12	0.97

### Interprétation des résultats

L'étude de l'effet de temps de l'adsorption des sels de l'eau de mers sur la bentonite de Maghenia., nous a permis d'étudier les modèles cinétiques. Selon les résultats de la linéarisation des 2 modèles, et qui sont représentés dans les figures IV-10 et 11, on observe que le modèle de 2<sup>ème</sup> ordre décrit mieux la cinétique d'adsorption que le modèle de 1<sup>er</sup> ordre, à cause :

- ✓ Sa fine et forte linéarisation.
- ✓ Et en comparant les constantes on remarque que celui de 2<sup>ème</sup> ordre est plus proche par rapport au 1<sup>er</sup> ordre.
- ✓ Il y a une faible différence entre les quantités de l'adsorbat à l'équilibre

## IV.4.2 Paramètre de masse de bentonite active

### IV.4.2.a Effet de la masse

#### Mode opératoire

- ❖ On prend une 7 béchers ; dans chaque bécher il y' a une masse de (0.2 ; 0.4 ; 0.6 ; 1 ; 1.2 ; 1.4 ; 1.6) (g) de bentonite activée à 30%.
- ❖ On ajoute (50 ml) d'eau de mer
- ❖ On agitation de 60 min environ.
- ❖ Après agitation on filtre nos mélanges

Dans le tableau ci-dessous nous avons les résultats obtenus après adsorption selon le paramètre de masse :

Condition initiale de l'eau de mer :

- Conductivité = 56.4 ms/cm
- Température = 18.8 °C

Tableau IV-13: résultats d'analyse du paramètre de masse de bentonite

Masse (g)	0,2	0,4	0,6	1	1,2	1,4	1,6
Conductivité (ms/cm)	54,8	53,1	52,9	49,5	47,9	46,2	44,9
Salinité	39,76	38,37	38,21	35,45	34,17	32,81	31,78
Température (°c)	17,3	17,1	17,2	17,1	16,9	16,8	17,2

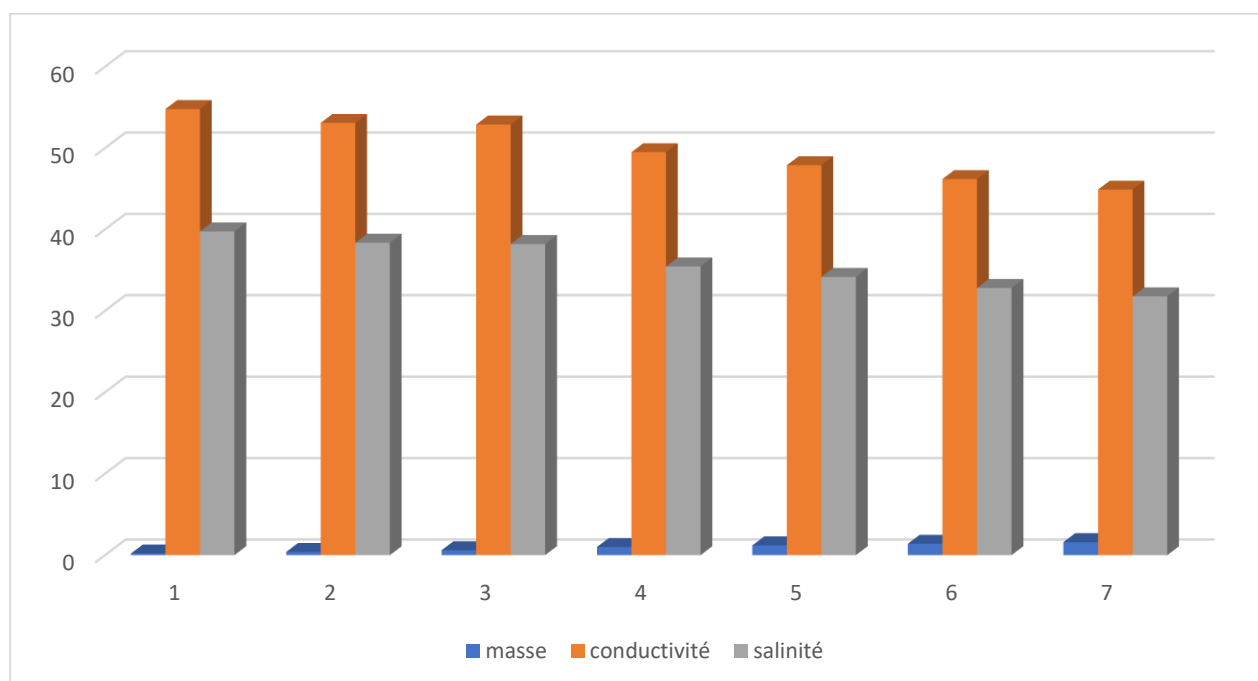


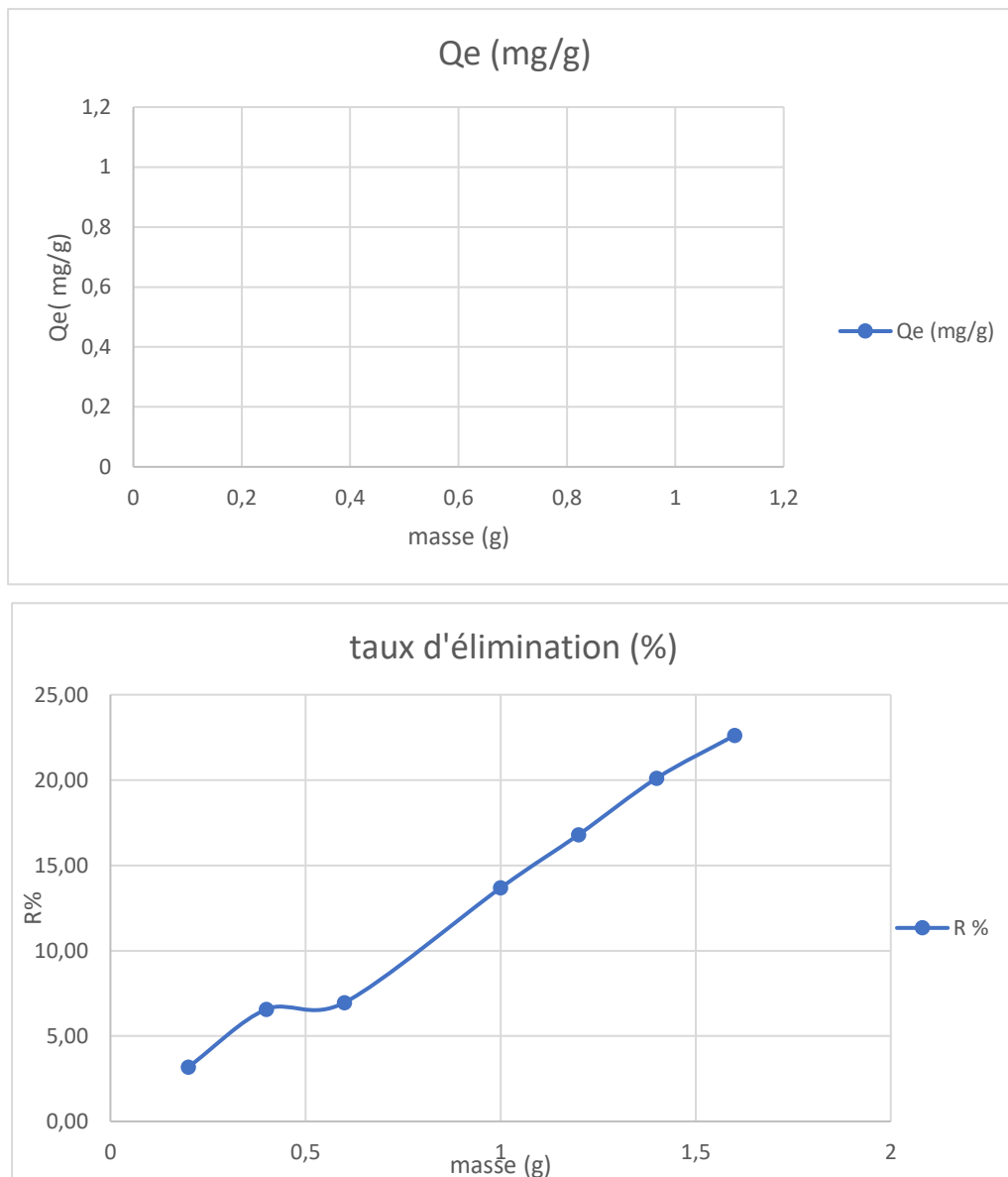
Figure IV-12 représentation graphique de l'effet de la masse dans l'adsorption de la saumure

✚ à travers les résultats obtenus et qui sont récapitulés dans le tableau on constate que plus on augmente la masse de bentonite plus on a une bonne adsorption

Tableau IV-14 : effet de la masse dans l'adsorption de la saumure

Masse (g)	Conductivité (ms/cm)	Ce (mg/l)	Qe (mg/g)	Taux d'élimination (%)
0,2	54,8	39,76	0,33	3,19
0,4	53,1	38,37	0,34	6,57
0,6	52,9	38,21	0,38	6,96
1	49,5	35,45	0,40	13,68
1,2	47,9	34,17	0,52	16,80
1,4	46,2	32,81	0,78	20,11
1,6	44,9	31,78	1,29	22,62





**Figure IV-13 : effet de la masse de bentonite active en fonction de la quantité de sel adsorbé (Qe) et du taux d'élimination (R%) sur l'adsorption de la saumure**

- ✚ Il faut noter qu'une augmentation de la masse de l'adsorbant de (0.2 à 1.6(g)), entraîne une diminution de la quantité de sel dans l'eau de mer

#### IV.4.3 Etablissement des isothermes d'adsorption

L'isotherme d'adsorption du la saumure sur la bentonite active est présentée dans le tableau ci-dessous

Tableau IV-15 : isotherme d'adsorption

Ce (mg/l)	Qe (mg/g)	R%
39,76	0,33	3,19
38,37	0,34	6,57
38,21	0,24	6,96
35,45	0,28	13,68
34,17	0,29	16,80
32,81	0,30	20,11
31,78	0,29	22,62

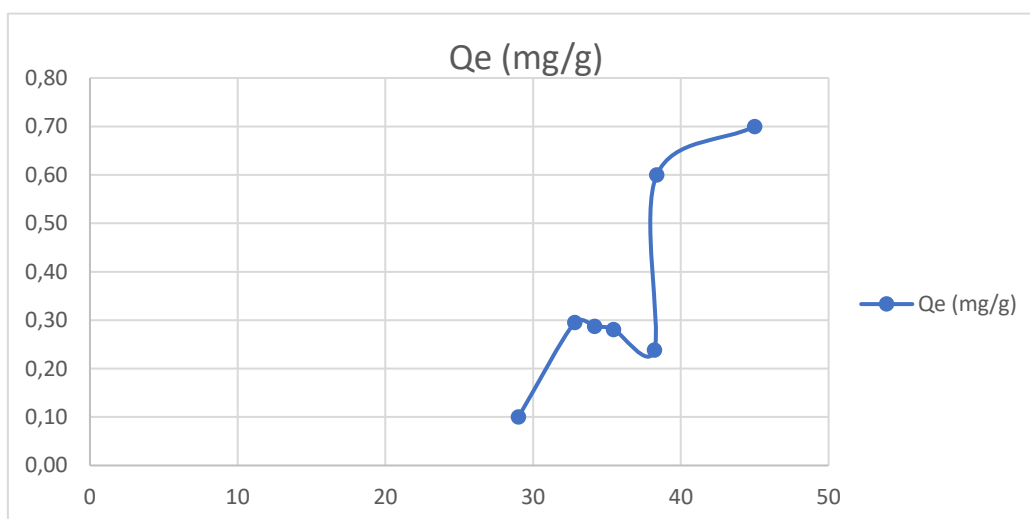
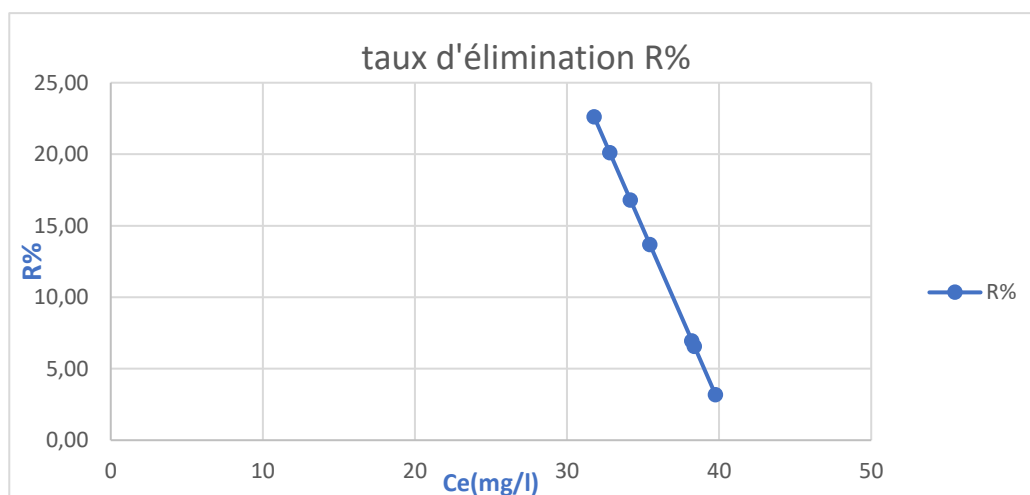


Figure IV 14 : isotherme d'adsorption de la saumure sur la bentonite active

- ✚ La figure ci-dessus montre que l'isotherme d'adsorption de la saumure sur la bentonite active qui est du type S.

#### IV.4.4 Modélisation des résultats expérimentaux

##### IV.4.4.a Le modèle de Langmuir

Tableau IV-16 : Les paramètres équationnels du modèle Langmuir

Ce (g/l)	Ce/Qe	Ce/R
39,76	4,60	12,47
38,37	10,00	5,84
38,21	11,21	5,49
35,45	12,20	2,59
34,17	13,48	2,03
32,81	14,30	1,63
31,78	15,20	1,40

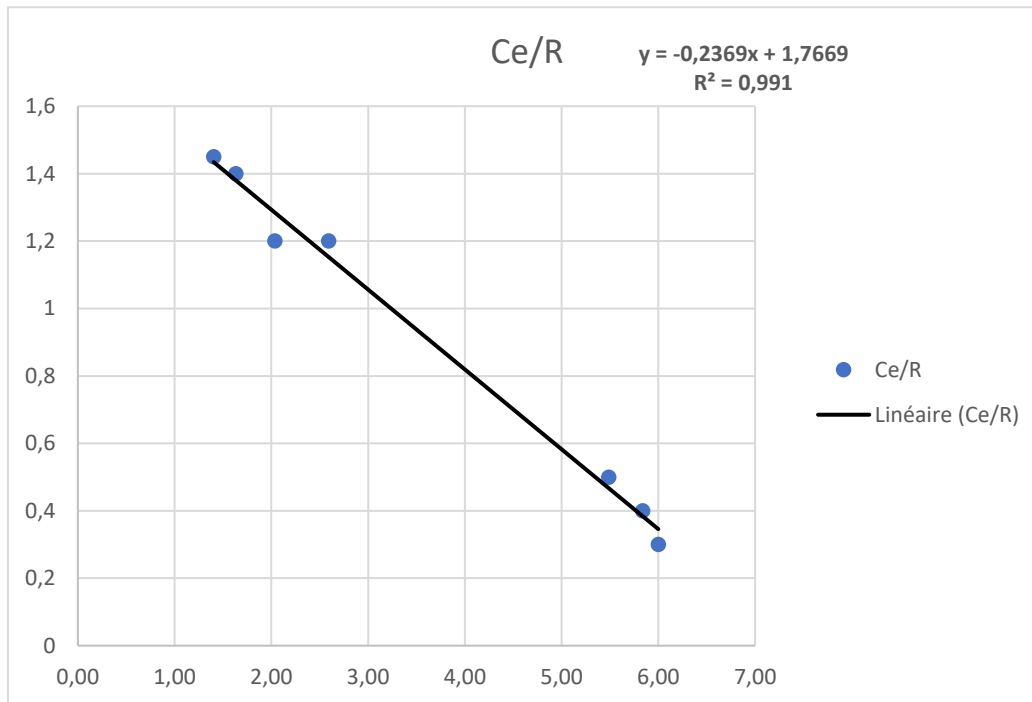
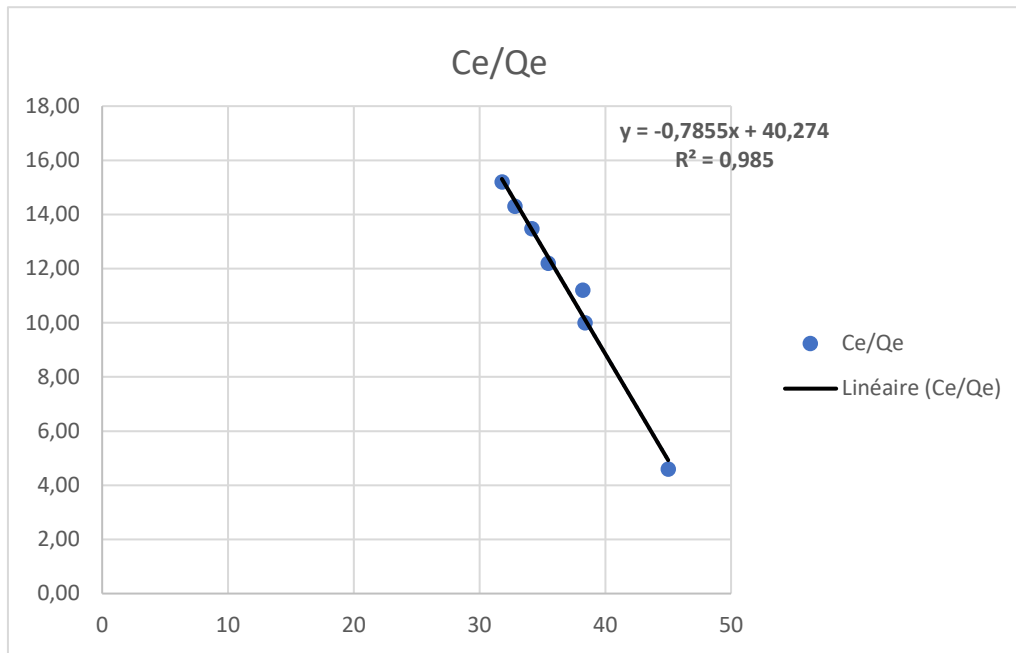


Figure IV-15 : isotherme de Langmuir

IV.4.4.b Le modelé de Freundlich

Tableau IV-17 Les paramètres équationnels du modèle Freundlich

Log Ce	Log Qe	Log R
1,60	-0,48	0,50
1,58	-0,47	0,82
1,58	-0,62	0,84
1,55	-0,55	1,14
1,53	-0,54	1,23
1,52	-0,53	1,30
1,50	-0,54	1,35

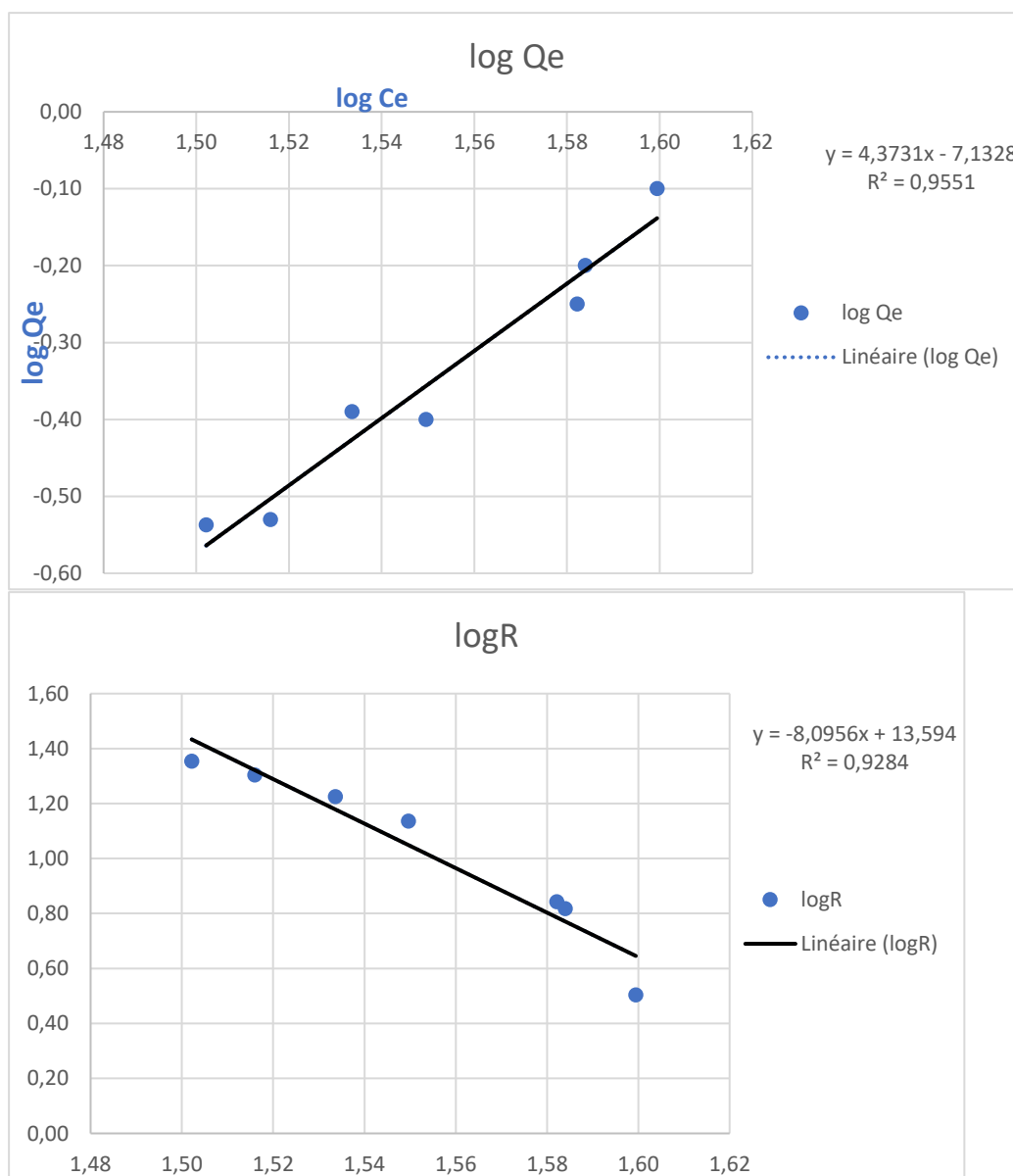


Figure IV 16 : isotherme de Freundlich

**Tableau IV-18 : tableau présentatif des paramètres des modèles (Langmuir et Freundlich)**

Isotherme de Langmuir			Isotherme de Freundlich		
K	B	$R^2$	$K_f$	N	$R^2$
-0.34	-0.0021	0.991	$5.64 \cdot 10^{-14}$	0.24	0.9284

- ✚ À travers les résultats obtenus et qui sont récapitulés dans le tableau. IV-18 on constate que celles de Freundlich (résultats positifs) sont plus compatibles et s'adaptent avec les résultats expérimentaux.
- ✚ Le coefficient de corrélation le plus proche de 1 indique que la droite passe par un plus grand nombre de points expérimentaux et par conséquent on trouve que Paramètre de température

#### IV.4.4.c Effet de la température

##### Mode opératoire

- ✓ On prend une série des béchers ; dans chaque bécher (1.6 g) de masse de bentonite activée.
- ✓ On ajoute 50 ml d'eau de mer
- ✓ On les met sous agitation pendant 60 min dans chaque bécher il y' a une température (25 ; 30 ; 35 ; 40 ; 45 ; 50).
- ✓ Après agitation on filtre nos mélanges
- ✓ Finalement on fait l'analyse de conductivité.

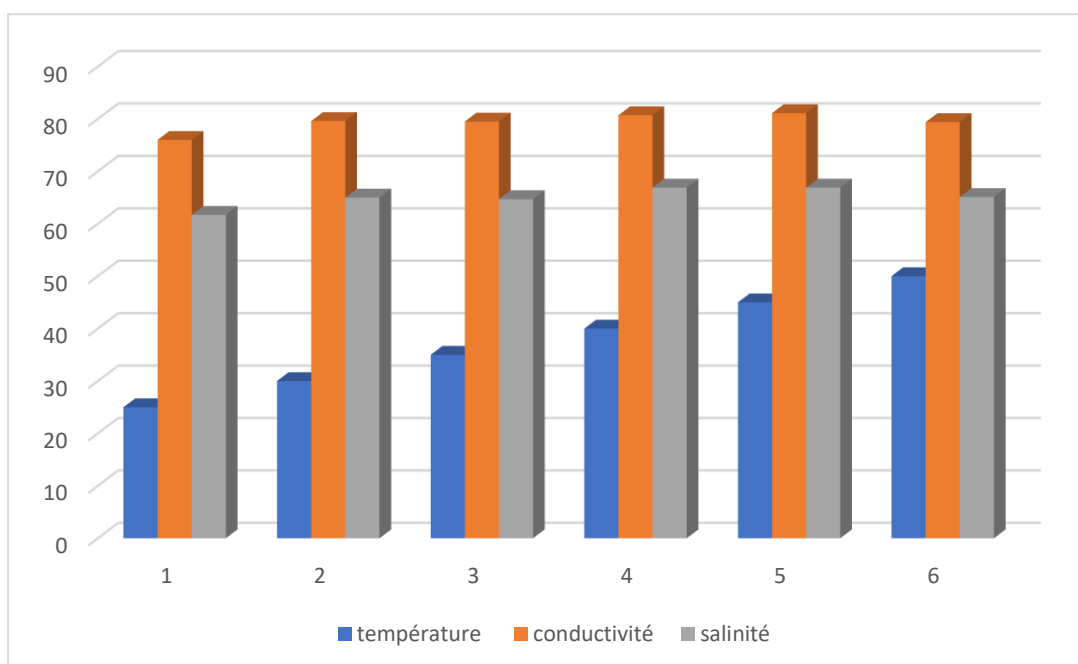
Dans le tableau ci-dessous nous avons les résultats obtenus après adsorption selon le paramètre de température :

Condition initiale de l'eau de mer :

- Conductivité = 80.9 ms/cm
- Température = 17.2 °C

**Tableau IV-19 : résultats d'analyse du paramètre de la température dans l'adsorption de la saumure**

Température (°C)	25	30	35	40	45	50
Conductivité (ms/cm)	76	77.5	79.5	80.7	85,1	88,5
Salinité	61,76	63,02	64,77	66,92	70,88	74,06



**Figure IV-17 : représentation graphique de l'effet de la température dans l'adsorption de la saumure**

- ✚ Partir du **tableau V.19** on obtient que la meilleure adsorption correspondant bien entendu à la plus faible température (25°C)

Tableau IV-20 : Effet de la température sur l'adsorption de la saumure

Température	Conductivité (ms/cm)	Ce (mg/l)	Qe (mg/g)	Taux d'élimination (%)
25	76	61,7	0,205	9,60
30	77,5	63,02	0,165	7,75
35	79,5	64,7	0,111	5,19
40	80,7	66,9	0,044	2,05
45	81,1	73,85	0,042	1,97
50	88,5	74,06	-0,180	-8,41



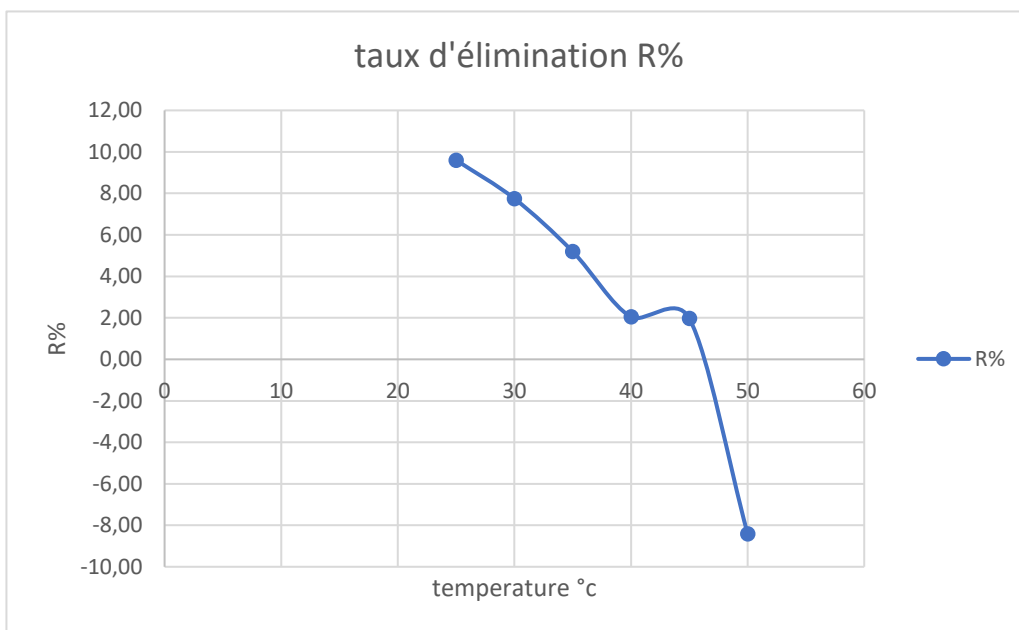
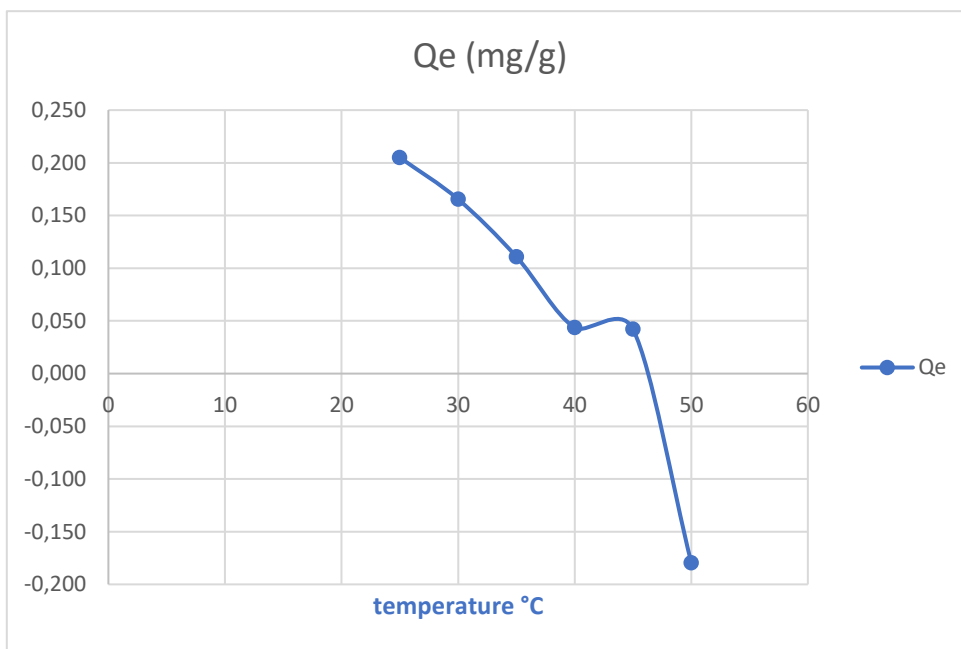


Figure IV-18 : Effet de la température sur l'adsorption de la saumure

## IV.4.5 Modèle thermodynamique

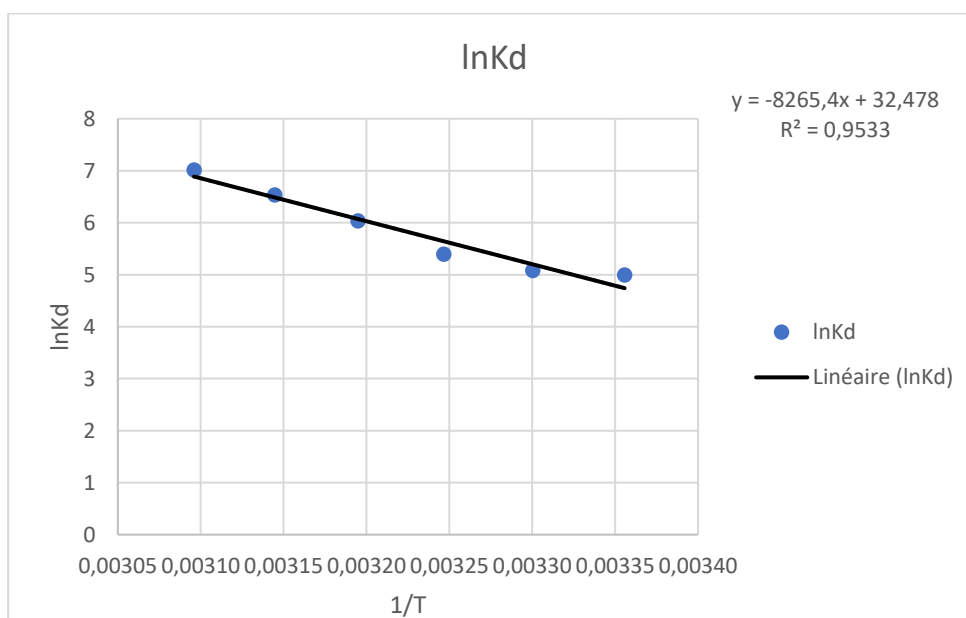
Le tracé de  $\ln Kd = f\left(\frac{1}{T}\right)$  en utilisant l'équation  $\ln Kd = \left(\frac{\Delta S^\circ}{R}\right) - \left(\frac{\Delta H^\circ}{R}\right) * \frac{1}{T}$  donne une droite linéaire.

Ces paramètres nous permettent de calculer :

- L'entropie standard ( $\Delta S^\circ$ ) **J/mol**
- L'enthalpie standard ( $\Delta H^\circ$ ) **KJ/mol**
- L'enthalpie libre standard  $\Delta G^\circ$  par l'équation suivante :  $\Delta G^\circ = R * T * \ln Kd$

**Tableau IV-21 : influence de la température sur l'adsorption de la saumure**

1/T	LnKd
0,00336	4,99
0,00330	5,08
0,00325	5,39
0,00319	6,03
0,00314	6,53
0,00310	7,01



**Figure IV-19 : influence de la température sur l'adsorption de la saumure**

Les valeurs obtenues sont regroupées dans le tableau qui suit :

**Tableau IV-22 : valeurs des paramètres thermodynamiques de l'adsorption de la saumure sur la bentonite**

$\Delta S^\circ$ (J/mol)	$\Delta H^\circ$ (KJ/mol)	$\Delta G^\circ$ (KJ/mol)					
270,02	68.68	298	303	308	313	318	323
		-12.35	-12.79	-13.79	-15.68	-17.25	-18.81

### Interprétation

- ✚ La valeur positive de  $\Delta H$  a montré que le processus est endothermique.
- ✚  $\Delta S$  peut être employé pour décrire l'aspect aléatoire à l'interface solide-solution pendant le phénomène d'adsorption.
- ✚ La valeur négative  $\Delta G$  indique que le processus d'élimination est spontané et qu'il s'agit d'une adsorption physique.

#### IV.4.6 Résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau de mer et de la saumure

Dans le tableau ci-dessous nous avons énumérer les valeurs obtenues avant et après lors de l'adsorption sur l'eau de mer

**Tableau IV-23 : Les valeurs des paramètres chimique et physico-chimique de l'eau de mer avant et après l'adsorption**

Paramètres	Unités	Avant adsorption	Après adsorption
Température	°C	25	25
PH		8.12	7.67
Conductivité	ms/cm	80.7	59.6
Turbidité	NTU	2,49	0,25
TDS	mg/l	62	42.3
TH	°F	750	680
Mg <sup>2+</sup>	mg/l	2500	1874
Ca <sup>2+</sup>	mg/l	710	566
TAC	°F	14	15
Cl <sup>-</sup>	mg/l	18400	20992
Chlore libre	mg/l	0.68	0.92
Nitrites	mg/l	1.72	0.98

Dans le tableau ci-dessous nous avons énumérer les valeurs obtenues avant et après lors de l'adsorption sur la saumure

#### Méthode opératoire

- ❖ On pèse 1.6 g de bentonite activée dans un bécher.
- ❖ On ajoute 50 ml d'eau de saumure.
- ❖ On les met sous agitation pendant 60 min et température 25°C.
- ❖ Après agitation on filtre notre mélange
- ❖ Finalement on fait l'analyse de conductivité.
- ❖ Les résultats obtenus sont dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV-24 : Les valeurs des paramètres chimique et physico-chimique de l'eau de saumure (ER) avant et après l'adsorption**

Paramètres	Unités	Avant adsorption	Après adsorption
Température	°C	19.6	18.4
PH		8.91	7.67
Conductivité	ms/cm	114.2	109.3
Turbidité	NTU	8.64	0,25
TDS	mg/l	73340	70541
TH	°F	12.5	680
Mg <sup>2+</sup>	mg/l	2710	2600
Ca <sup>2+</sup>	mg/l	870	758
TAC	°F	14	15
Cl <sup>-</sup>	mg/l	40540	40620
Chlore libre	mg/l	0.02	0.04
Nitrites	mg/l	1.22	0.98

**Tableau IV-25 : la comparution de conductivité dans chaque année**

Année	2020-2021	2021-2022
Conductivité (ms/cm)	102.8	114.2

✚ Le tableau V-25 montre une augmentation de la salinité chaque année, et ces causes que nous recevons chaque année constituent une menace pour l'écosystème.

# **Conclusion générale**

### CONCLUSION GENERALE

D'un point de vue général, ce sujet se situe à l'intersection de trois disciplines : Chimie

Des matériaux (l'utilisation des argiles), génie des procédés (la mise en œuvre d'un procédé d'adsorption) et environnement (traitement des eaux). L'eau est un élément très indispensable pour les êtres vivant malheureusement la grande surface d'eau qui nous entoure est de l'eau mer cette eau contient un taux élevé de sel et pour s'en débarrasser nous sommes appuyés sur la technologie de dessalement de l'eau de mer, et pour le traiter nous avons mis en place le procédé d'adsorption,

Notre objectif principal est tout simplement de diminuer la concentration en sel de l'eau de mer et de la saumure par le procédé d'adsorption sur la bentonite active. Enfin de préserver les matériaux de la station de dessalement et protéger l'écosystème marin

1- le meilleur taux d'activation est obtenu à 30% après un traitement avec le chlorure d'ammonium pendant un temps d'activation de 24h

2- l'adsorption de la saumure atteint un maximum de 30.68 mg/g au bout de 60 minutes. Cette cinétique plus au moins lent montre qu'il s'agit de la physisorption.

3- l'augmentation de la masse de bentonite activée de (0.2 à 1.6) g augmente le taux de l'élimination de la saumure à 22.62 soit 31.78 mg/l

4- l'augmentation de la température à (25 à 50) °c provoque une diminution de quantité d'adsorbat ( $Q_e$ ) de 0.33 à 0.29 cela indique une diminution de l'absorption ce que nous signifie qu'il y avait une désorption

5- le meilleur modèle qui représente les résultats expérimentaux de la cinétique d'adsorption est le modèle du pseudo-second-ordre.

6- les isothermes d'adsorption sont tous bien décrits par le modèle Langmuir.

7- le processus d'élimination est spontané ( $\Delta G^\circ$ ) et endothermique ( $\Delta H^\circ > 0$ ).

Nous avons conclu de cette étude que la masse de bentonite (1.6g) et le temps de contact (60 min) avec une température  $< 25^\circ\text{C}$ , la capacité d'adsorption de la bentonite activée pour la saumure est très élevée.

Il faut signaler que le taux de salinité des eaux de mer est en augmentation continue nous devons déclencher l'alarme pour préserver notre planète.

## Reference Bibliographique

---

### Reference bibliographiques

- [1] : pierre Barthélémy, <<combien d'eau y'va-t-il sur terre ?>>, sur Passeurs des sciences (consulté le 29 janvier 2022)
- [2] : Ask A scientist- biology (consulté le 10 janvier 2022) sur [www.newton.dep.anl.gov](http://www.newton.dep.anl.gov)
- [3] : (en) Z. Etzion et R. Yagil, « Metabolic effects in rats drinking increasing concentrations of sea-water », *Comp. Biochem. Physiol. A*, vol. 86, no 1, 1987, p. 49-55
- [4] : O.M.S, 1986 ; « Directives de qualité pour l'eau de boisson ». Vol. 3 : contrôle de la qualité de l'eau de boisson destinée à l'approvisionnement des petites collectivités. Genève.
- [5] : site [aquaportail.com](http://aquaportail.com) (page consultée le (04/02/2022). Définition EAU DE MER publiée le 29/11/2009 (mise à jour le 29/12/2019). Eau de mer : définition et explications ([aquaportail.com](http://aquaportail.com))
- [6] : Souad, G. (s.d.). Université Hassiba Ben Bouali de Chlef. Faculté de Sciences de la nature et de la vie, Département Eau, environnement et Développement Durable Cours Licence Aquaculture et Pisciculture. p.18
- [7] : Souad, G. (s.d.). Université Hassiba Ben Bouali de Chlef. Faculté de Sciences de la nature et de la vie, Département Eau, environnement et Développement Durable Cours Licence Aquaculture et Pisciculture. p.11
- [8] : 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](http://futura-sciences.com))
- [9] : (Calvé, 2002). (Page consulté le 01/03/2022).récupéré sur ([Http://isitv.univ-tln.fr/~lecalve/oceano/](http://isitv.univ-tln.fr/~lecalve/oceano/))
- [10] : setec lerm. (Page consultée le 02/03/2022). Salinité de l'eau de mer. Salinité de l'eau de mer ([lerm.fr](http://lerm.fr))
- [11] : RODIER. J et al, 2009 ; « L'analyse e de l'eau ». 9ème Ed. Dunod. France
- [12] : Lenntech (European Head Office) (page consultée le 03/03/22), ph et alcalinité. PH et alcalinité ([lenntech.fr](http://lenntech.fr))



## Reference Bibliographique

---

- [13] : HABET, L, Contribution à l'étude des impacts du dessalement des eaux de mer sur L'environnement, Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, 153pages, 2012.
- [14]: Souad, G. (s.d.). Cours chimie marine. Récupéré sur sholar google.fr.
- [15] : Site Suezwaterhandbook.fr
- [16] : 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)
- [17] : : CNRS ; L'eau dure, l'eau douce (page consulté le 17/03/2022) sagascience.cnrs.fr
- [18] : « Film d'animation sur le réseau d'eau non potable parisien », sur Dailymotion (consulté le 07 mars 2022
- [19] : luxorion (page consultée le 18/03/2022). L'eau l'or bleu. L'eau potable (astrosurf.com)
- [20] : Marina BERTSCH, dessalement la mer à boire @ElementTerre (vidéo YouTube) chaine France 24, 4min30s
- [21] : 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<sup>ème</sup> Edition (2006).
- [22] : 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
- [23] : site cap.sience.net
- [24] : Le magazine de chronique scientifique, le dessalement de l'eau de mer PDF, N°4/ Juilly et Aout 2005.
- [25] : Purostar. (Page consultée le 19/03/2022). Le procédé de Coagulation – Flocculation. Créateur de solution de traitement d'eau. Le procédé de Coagulation - Flocculation (purostar.com)
- [26] : TANSAKUL, C. Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 182 pages, 2009.

## Reference Bibliographique

---

- [27] : OLIVIER. J, PIERRE. C, Analyse du cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan 2ème Édition, 2010, 302 p.
- [28] : H, HECTOR, « supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable », Thèse de Doctorat. Institut national de sciences appliquées de Toulouse, (2006).
- [29] : HAMANI, A, Etude des performances du pilote d'électrodialyse dans la Déminéralisation des eaux saumâtres, Mémoire de fin d'études, Ecole nationale supérieure de L'hydraulique Abra oui Abdellah, 100 pages, 2013.
- [30] : LA CITE DE LA MER – Cherbourg, La mer à boire, Rapport Technopole Cherbourg-Normandie, 33p., Avril 2012
- [31] : 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.
- [32] : 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
- [33] : RENAUDIN Viviane (2003, novembre). "Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres\*" dans Dossiers Chimie et question de société sur le site Culture Sciences chimie : site de ressources scientifiques pour les enseignants en chimie. Page consultée le 21/05/2012. Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres | Culture Sciences-Chimie (ens.fr)
- [34]: Mandri, étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide, Thèse de doctorat de l'université Claude Bernard Lyon 2006.
- [35] : CORBASSON Cécile, PONCERY Anaïs, CACHARD Sophie. "La désalinisation de l'eau de mer (électrodialyse)" dans Exposés : Les applications de l'électrolyse sur le site La 3ème9 : une classe à projet scientifique.
- [36] : ARZATE, A, Procédé de séparation membranaire et leurs applications dans l'industrie alimentaire, Revue de littérature, Centre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole Inc., référence 642-RVL-0508, Saint-Norbert d'Athabaska, 2008.

## Reference Bibliographique

---

- [37] : Genesis Water Tech. (Page consultée le 19/03/2022). Avantages et inconvénients du dessalement de l'eau de mer à l'aide d'osmose terrestre pour l'eau de boisson. Genesis water Technologie. Avantages et inconvénients du dessalement de l'eau de mer par osmose inverse pour l'eau potable - Genesis Water Technologies
- [38] : (s.d.). memento degremont. Consulté le 04 18, 2022, sur Jsuez:  
<https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/processus-elementaires-du-genie-physico-chimique-en-traitement-de-l-eau/adsorption/mecanisme-adsorption>
- [39] : BOURAHLA.S. (s.d.). Chimie de surface et catalyse : cours et applications. Adsorption et catalyse hétérogène. Consulté le avril 18, 2022
- [40] : ARGYROU M, « Impact of Desalination Plant on marine macrobenthos in the coastal waters of De hkelia bay, Cyprus ». Internal Report, 2000.
- [41] : EMNA ERRAIS, thèse du diplôme de docteur de l'université de STRASBOURG (géochimie de l'environnement), réactivité de surface d'argiles naturelles. Etude de l'adsorption de colorants anioniques, 21/03/2011, P47, 58, 59.
- [42] : S. E. CHITOUR, chimie de surfaces, introduction à la catalyse, Edition OPU Alger (1981).
- [43] : BARRER. ZEOLITES and CLAY MINERALS adsorbent and moléculaire SIEVES.
- [44] : (S.d.). Généralités sur pollution. Consulté le avril 19, 2022, sur 123dok :  
<https://123dok.net/article/facteurs-influen>
- [45] : BARKA, N. (s.d.). Etude comparative des propriétés d'adsorption de quelques micro--polluants sur les phosphates naturels et le charbon actif. Consulté le avril 20, 2022, sur mémoireonline: [https://www.memoireonline.com/05/10/3518/m\\_](https://www.memoireonline.com/05/10/3518/m_)
- [46] : DIPA ET COLL, 2002 ; AVOM ET COLL., 2001.
- [47] : Cavet, R., Le sol - Propriétés et fonction ; Tome 1 : *Edition France Agricole*, (2003).
- [48] : Allen, S.J., Mckay, G., Khander, K. Y. H., *J. Chimical Technology and Biotechnol.* 45 (1989) 291.
- [49] : Ho, Y.S., McKay, G., *Process. Biochem.* 34 (1999) 451.
- [50] : KAYODE O.A, UNUABONAH E.I, OLU-OWOLABI B.I., KINETIC and thermodynamique aspects of the adsorption of Pb<sup>2+</sup> and
- [51] :(s.d.). conductivité de l'eau. Consulté le avril 21, 2022, sur lenntech :  
<https://www.lenntech.fr/applications/ultrapure/conductivite/eau-conductivite.htm>

## Reference Bibliographique

---

- [52] : M, A. (s.d.). La conductivité électrique : tout savoir. Consulté le avril 23, 2022, sur TotalEnergies : <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/logement>
- [53] : Imerys S.A. - 43 Quai de Grenelle, 75015 Paris : bentonite consulté le 05/05/2022, sur Bentonite | Imerys
- [54] : Ch. Abdellaoui., « Etudes des phénomènes d'adsorption et de diffusion des métaux lourds dans les sols argileux- application aux sites de charges », mémoire de magister en génie civil de l'université de Tlemcen-Algérie, (2007).
- [55] : 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
- [56] : JOZJA N.2003. Étude de matériaux argileux Albanais. Caractérisation "multi- échelle" d'une bentonite magnésienne. Impact de l'interaction avec le nitrate de plomb sur la perméabilité. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans
- [57] : CAILLERE S, HENIN S, RAUTUREAU M, *minéralogie des argiles : Classification et Nomenclature* (Tome 1), Ed. Masson. Paris, 1982, 9, 107.
- [58] : Ch. Abdellaoui., « Etudes des phénomènes d'adsorption et de diffusion des métaux lourds dans les sols argileux- application aux sites de charges », mémoire de magister en génie civil de l'université de Tlemcen-Algérie, (2007).
- [59] : BOUKADAH N, 2007. ETUDE DE L'ADSORPTION DE MICROPOLLUANTS ORGANIQUES SUR LA BENTONITE mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme magister, à l'Université 20 Août 55, Skikda. p 38.
- [60] : Mlle BELBACHIR Ihssan (2018). Modification de la Bentonite de Maghnia et Applications dans l'adsorption de colorants textiles et de métaux lourds. These de doctorat chimie analytique et environnement UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMEN. 8p
- [61] : 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
- [62] : MAILLOT G. Géologie des argiles : Altérations, Sédimentologie, géochimie, Masson et Cie, 1965, 47, 387.
- [63] : VELDE B. *Introduction to clay minerals: chemistry, origins, uses and environmental significance*, Chapman ET Hall, London, 1992, 35,256
- [64]: GILLOT E, JOHN W, *Clay engineering geology*.1987, 81, 484.

## Reference Bibliographique

---

[65] : 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.

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

[67] : MEBARKI K, TABAHRILI M. N. 2011, *Géochimie de la bentonite du gisement de la Région de Maghnia et applications industrielles*. Mém. Mast. Univ. Tlemcen.