



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM



**Faculté des Sciences Exactes et de l'informatique**

**Département de Chimie.**

**Filière : Chimie appliquée.**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Chimie.

Option : **Chimie appliquée.**

Présenté par :

**Freha Mohammed el Amine      Bekkadour Benattia Abdelkader**

THEME :

**Étude de l'effet du charbon actif dans le traitement de l'eau de mer avant et après le dessalement.**

Soutenu le : 04/07/2022

Devant le jury composé de :

<b>Président :</b> Mr. Harrane Amine	<b>Pr</b>	<b>Université de Mostaganem</b>
<b>Examineur :</b> Mr. Tabti Charef	<b>Dr</b>	<b>Université de Mostaganem</b>
<b>Encadrant :</b> Mr. Kadi Abdelkader	<b>Dr</b>	<b>Université de Mostaganem</b>

Année Universitaire : 2021-2022

# Remerciement

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

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

Nous remercions aussi les membres de jury, président **Mr. Harrane Amine** et examinateur **Mr. Tabti Charef**, d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

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

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

# *Dédicaces*

## **Je dédie ce mémoire**

**À mon père**, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie, puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit, Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi, et surtout pour ton amour.

**À ma mère**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

**À toute ma famille**, mes sœurs et frères, à mes chers neveux et nièces, ma femme et à toute la famille Freha. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

**À mon cher binôme** Abdelkader et sa famille.

**À mes amis** : Yasser, Lotfi, Noussa, Amine, Fabrice, Mohamed, Nouredine, Hakim, Charef, Abderezzak, Abdelaziz et Habib.

**À tous mes** camarades de master « chimie appliquée » promo : 2021/2022.

Qu'Allah vous garde et vous procure une bonne santé et une longue vie.

À tous ceux que j'aime et qui m'aime

*Amine*

# *Dédicaces*

## **Je dédie ce mémoire**

**A ma très chère mère**, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

**A mon très cher père**, tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

**A toute ma famille**, mes frères et ma sœur et à toute la famille **Ghali**.

**À mon cher binôme** Amine et sa famille.

**À mes amis** : Lotfi, Fabrice, Yasser, Amine, Mohamed, Noureddine, Hakim, Abderezzak, Abdelaziz, Habib et Charef.

**À tous mes** camarades de master « chimie appliquée » promo : 2021/2022.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

Puisse dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

*Abdelkader*

## **Résumé**

En raison d'une forte croissance démographique, surtout dans les villes côtières, cela s'est reflété dans la situation de l'eau. Alors que la majeure partie de la population et des activités économiques sont situées le long de 1200 km de la côte, le dessalement a été proposé comme solution efficace au grave problème des pénuries d'eau. Les caractéristiques des eaux méditerranéennes ont contribué à relever le dividende matériel et économique de ce processus. La méthode de l'osmose inverse a été adoptée parce qu'elle ne coûte pas cher grâce à des techniques améliorées et des membranes plus efficaces et donne plus de vie à l'usine. Coût total par mètre cube n'excédant pas 0,5 EUR, le dessalement est la solution parfaite au problème de pénurie d'eau dans la région du Sahel

Mais il y a des problèmes environnementaux associés à ce processus qui doivent être vus lors de l'utilisation de dessalement comme le résidu du processus de dessalement, qui est connu sous le nom de solution saline concentrée, qui, lorsqu'ils sont jetés dans la mer, augmentent la quantité de sels dissous dans celle-ci et affectent ainsi négativement la vie marine et aussi le pourcentage élevé de sels dans la mer a dégradé l'écosystème marin, causant des dommages au fil du temps.

Cette étude vise à préserver l'écosystème côtier ainsi que l'usine de dessalement pour durer plus longtemps en réduisant et en réduisant la concentration de sels dans l'eau de mer avant d'entrer dans l'usine et de la saumure avant de sortir et de la retourner à la mer par la technologie d'adsorption par le charbon actif.

## **Abstract**

Owing to a marked increase in the population, especially in coastal cities, this has been reflected in the water situation. While most of the population and economic activities are located along 1,200 km of the coast, desalination has been offered as an effective solution to the serious problem of water shortages. The characteristic characteristics of Mediterranean waters have helped to lift the material and economic dividend of this process. The reverse osmosis method has been adopted because it does not cost much thanks to improved techniques and more efficient membranes and gives longer life to the plant. Total cost per cubic metre not exceeding

EUR 0.5, bottom line desalination is the perfect solution to the problem of water shortage in the Sahel region

But there are environmental problems associated with this process that should be seen when using desalination such as the residue of the desalination process, which is known as the concentrated saline solution, which when thrown into the sea increases the amount of salts dissolved in it and thus adversely affects marine life and also the high percentage of salts in the sea affected the plant, causing damage over time.

This study aims to preserve the coastal ecosystem as well as the desalination plant to last longer by reducing and reducing the concentration of salts in seawater before entering the plant and in brine before exiting and returning it to the sea through adsorption technology by effective coal.

## المخلص

نظرا للازدياد الملحوظ في عدد السكان خاصة في المدن الساحلية وهذا ما انعكس على الوضع المائي. وبمأنه يتواجد معظم السكان والأنشطة الاقتصادية على طول 1200 كم من الساحل تم تقديم تحلية المياه كحل فعال لمشكلة نقص المياه الخطيرة. إن الخصائص المميزة لمياه البحر الأبيض المتوسط ساعدت على رفع العائد المادي والإقتصادي من هذه العملية، تم إعتداد طريقة التناضح العكسي لأنها لا تكلف كثيرا بفضل التقنيات المحسنة والأغشية الأكثر كفاءة كما أنها تعطي عمر أطول للمحطة. التكلفة الإجمالية للمتر المكعب لا تتجاوز 0,5 يورو، خلاصة القول تحلية المياه هي الحل الأمثل لمشكل نقص المياه في منطقة الساحل

لكن هناك مشاكل بيئية تصاحب هذه العملية يجب النظر إليها عند الإستعانة بتحلية المياه مثل مخلفات عملية التحلية وهو ما يعرف بالمحلول الملحي المركز والذي يزيد عند إلقائه في البحر كمية الأملاح الذائبة فيه وبالتالي يؤثر سلبا على الحياة البحرية وأيضاً نسبة الأملاح العالية في البحر تآثر على المحطة مما يسبب تلفها مع مرور الوقت

تهدف هذه الدراسة إلى الحفاظ على النظام البيئي الساحلي وكذلك على محطة تحلية المياه لتستمر لمدة أطول وهذا عن طريق تقليل وخفض تركيز الأملاح في مياه البحر قبل دخولها المحطة وفي المحلول الملحي قبل خروجها وإرجاعها للبحر عن طريق تقنية الإمتزاز بواسطة الفحم الفعال.

# Liste des tableaux

Tableau	Page
<b>Chapitre I :généralité sur le dessalement de l'eau de mer</b>	
Tableau I.1 : Principaux sels dissous pour une eau de mer de salinité 35 g/l .....	5
Tableau I.2 : Pourcentages en masse des principaux éléments .....	6
Tableau I.3 : classification d'une eau selon leur PH .....	13
Tableau I.4 : Classification des eaux selon la conductivité.....	13
Tableau I.5 : Classes de turbidités usuelles (NTU, néphélocimétrie turbidimétrie). .....	15
Tableau I.6 : Stations de dessalement en Algérie.....	33
Tableau I.7 : Avantages et inconvénients de dessalement en Algérie.....	34
<b>Chapitre II : L'adsorption et la conductivité</b>	
Tableau II.1 : Principales différences entre deux types d'adsorption. ....	39
Tableau II.2 : Expressions mathématiques du modèle de Langmuir .....	44
<b>Chapitre III : généralité sur l'adsorbant et le charbon actif</b>	
Tableau III.1 : Les différents types d'adsorbant.....	53
<b>Chapitre IV : Partie expérimentale</b>	
Tableau IV.1 : tableau des matériels et appareillage.....	68
Tableau IV.2 : Variation de la densité optique en fonction de la concentration du bleu de méthylène. ....	74
Tableau IV.3 : variation de $pH_f - pH_i$ en fonction de $pH_i$ . ....	75
Tableau IV.4 : les conditions opératoires du processus d'adsorption .....	76
Tableau IV.5 : Caractéristiques du charbon actif.....	77
Tableau IV.6 : Les valeurs des paramètres chimique et physico-chimique de l'eau de mer (EM) avant et après l'adsorption.....	78
Tableau IV.7 : effet du temps de contact sur l'adsorption de l'eau de mer. <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Tableau IV.8 : effet du temps de contact sur l'adsorption de l'eau de mer. <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	

Tableau IV.9 : effet du temps de contact sur l'adsorption de l'eau de mer. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.10 : les résultats de modèle cinétique du premier ordre ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.11 : les résultats de modèle cinétique du second ordre **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.12 : paramètres cinétiques d'adsorption de l'eau de mer sur le charbon actif  
..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.13 : effet de la masse de charbon actif sur l'adsorption de l'eau de mer. ... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.14 : effet de la masse de charbon actif sur l'adsorption de l'eau de mer .... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.15 : effet de la masse de charbon actif sur l'adsorption de l'eau de mer .... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.16 : isotherme d'adsorption..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.17 : Les paramètres équationnels du modèle Langmuir..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.18 : constantes relatives aux modèles de Langmuir..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.19 : Les paramètres équationnels du modèle Freundlich ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.20 : les constantes relatives aux modèles de Freundlich..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.21 : tableau comparatif entre les paramètres des modèles (Langmuir et Freundlich) ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.22 : effet de la température sur l'adsorption de l'eau de mer... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.23 : effet de la température sur l'adsorption de l'eau de mer... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.24 : effet de la température sur l'adsorption de l'eau de mer... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.25 : influence de la température sur l'adsorption de l'eau de mer .. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.26 : les valeurs des paramètres thermodynamiques de l'adsorption de l'eau de mer sur le charbon actif ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau IV.27 : les valeurs des paramètres physico-chimique de l'eau de saumure(ER) avant d'adsorption.....	81
Tableau IV.28 : les valeurs des paramètres physico-chimique de l'eau de saumure(ER) avant-après d'adsorption .....	81

# Liste des figures

Figure	Page
<b>Chapitre I : généralité sur le dessalement de l'eau de mer</b>	
Figure I.1 : L'eau de mer (salamandre).....	4
Figure I.2 : Un schéma représente le dessalement .....	17
Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF) à 3 étages.....	22
Figure I.4 : Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED) .....	23
Figure I.5 : Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur .....	25
Figure I.6 : Osmose et osmose inverse.....	26
Figure I.7 : Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse.....	27
Figure I.8 : principe de fonctionnement d'électrodialyse .....	29
Figure I.9 : Répartition des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie .....	33
<b>Chapitre II : l'adsorption et la conductivité</b>	
Figure II.1 : Phénomène d'adsorption par le charbon actif.....	37
Figure II.2 : Les deux types d'adsorption .....	38
Figure II.3 : Schéma du mécanisme de transport de l'adsorbat au sein du grain. ....	40
Figure II.4 : Représentation graphique les isothermes d'adsorption en phase. ....	47
Figure II.5 : Migration des ions en solution .....	50
Figure II.6 : La conductimètre.....	51
<b>Chapitre III : généralité sur l'adsorbant et charbon actif</b>	
Figure III.1 : Charbon actif .....	55
Figure III.2 : structure du charbon actif .....	56
Figure III.3 : Diagramme schématique de processus de la production de charbon actif .....	58
Figure III.4 : Charbon actif en poudre (CAP) .....	60
Figure III.5 : Charbon actif en grain (CAG) .....	61
Figure III.6 : charbon actif extrudé. ....	61
Figure III.7 : Représentation schématique des microstructures du charbon actif .....	62
Figure III.8 : Exemples de fonctions oxygénées présentes sur la surface d'un charbon actif..	64
Figure III.9 : structure poreuse du charbon actif.....	64

## Chapitre IV : Partie expérimentale

Figure IV.1 : Le charbon .....	69
Figure IV.2 : l'agitation puis le séchage du charbon.....	70
Figure IV.3 : tamiseuse, mortier avec son pilon et le charbon actif.....	71
Figure IV.4 : courbe d'étalonnage de la densité optique en fonction de la concentration du bleu de méthylène .....	74
Figure IV.5 : courbe d'étalonnage de la variation de PHf-PHi en fonction de PHi.....	75
Figure IV.6 : Effet du temps de contact sur l'adsorption de l'eau de mer. <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure IV.7 : effet du temps de contact sur l'adsorption de l'eau de mer ... <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure IV.8 : effet du temps de contact sur l'adsorption de l'eau de mer ... <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure IV.9 : représentation graphique du modèle cinétique du premier ordre . <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure IV.10 : représentation graphique du modèle cinétique du second ordre. <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure IV.11 : effet de la masse de charbon actif sur l'adsorption de l'eau de mer.....	79
Figure IV.12 : effet de la masse de charbon actif sur l'adsorption de l'eau de mer.....	79
Figure IV.13 : effet de la masse de charbon actif sur l'adsorption de l'eau de mer.....	79
Figure IV.14 : isotherme d'adsorption de l'eau de mer sur le charbon actif..... <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure IV.15 : représente isotherme de Langmuir .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure IV.16 : isotherme de Freundlich .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure IV.17 : effet de la température sur l'adsorption de l'eau de mer. .... <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure IV.18 : effet de la température sur l'adsorption de l'eau de mer. ....	80
Figure IV.19 : effet de la température sur l'adsorption de l'eau de mer .....	80
Figure IV.20 : influence de la température sur l'adsorption de l'eau de mer.....	80

# Listes des abréviations et symboles utilisées

symboles	Significations	unités
$Q_e$	Quantité d'adsorbat adsorbé par unité de masse d'adsorbant à l'équilibre	Mg/g
$Q_t$	Quantité d'adsorbat par gramme d'adsorbant à l'instant t	Mg/g
$Q_m$	Capacité maximale d'adsorbant appelée aussi capacité (ultime)	Mg/g
$C_0$	Concentration initiale du soluté	Mg/l
$C_e$	Concentration du soluté à l'équilibre d'adsorption	Mg/l
$V$	Volume de solution	L
$m$	Masse d'adsorbant utilisé	g
$K_L$	Constante de Langmuir	l/mg
$K_F / n$	Constantes des Freundlich	-
$K_d$	Constante de distribution	-
$P$	Densité apparente	$g/cm^3$
$\Delta H^\circ$	Enthalpie standard	Kj/mol
$\Delta S^\circ$	Entropie standard	j/mol
$\Delta G^\circ$	Enthalpie libre	Kj/mol
$\varepsilon$	La porosité	%
$\delta$	Conductivité	ms/cm
$T$	Température	$C^\circ$
$t$	Temps	min

# SOMMAIRE

Titre	Page
<b>Introduction générale</b>	1
<b>Chapitre I : généralité sur le dessalement de l'eau de mer</b>	
Partie 1 : L'eau de mer : .....	3
I.1.1 Introduction (généralité sur l'eau) : .....	3
I.1.2 Définition de l'eau de mer : .....	3
I.1.3 Les compositions chimiques de l'eau de mer : .....	4
I.1.4 Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer : .....	6
I.1.4.1 Caractéristiques chimiques : .....	6
I.1.4.1.1 Salinité : .....	6
I.1.4.1.2 L'alcalinité : .....	7
I.1.4.2 Caractéristiques physiques : .....	7
I.1.4.2.1 Température : .....	7
I.1.4.2.2 PH : .....	8
I.1.4.2.3 La masse volumique : .....	8
I.1.4.2.4 Tensions superficielles : .....	9
I.1.4.2.5 Viscosité : .....	9
I.1.4.2.6 Conductivités : .....	9
I.2 Partie 2 : l'eau potable .....	9
I.2.1 Définition de l'eau potable : .....	9
I.2.2 Les compositions chimiques de l'eau potable : .....	10
I.2.2.1 Les matières minérales : .....	10
I.2.2.2 Les matières organiques : .....	11
I.2.3 Les caractéristiques de l'eau potable : .....	11
I.2.3.1 Les caractéristiques organoleptiques : .....	11
I.2.3.2 Les caractéristiques physico-chimiques : .....	12
I.2.3.2.1 Caractéristiques physiques : .....	12
I.2.3.2.2 Caractéristiques chimiques : .....	15
I.3 Partie 3 : Dessalement .....	16
I.3.1 Introduction : .....	16
I.3.2 Définition de dessalement : .....	17

I.3.3	Les différentes techniques de dessalement :	18
I.3.3.1	Les procédés thermiques :	18
I.3.3.1.1	La congélation :	18
I.3.3.1.2	Distillations :	20
I.3.3.1.2.1	Le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF) :	21
I.3.3.1.2.2	Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED) :	22
I.3.3.1.3	Plusieurs technologies d'évaporateurs multiples effets existent :	23
I.3.3.2	Les procédés utilisant des membranes :	25
I.3.3.2.1	L'osmose inverse :	25
I.3.3.2.2	L'électrodialyse :	28
I.3.4	Les problèmes techniques rencontrés en dessalement :	30
I.3.4.1	La corrosion :	30
I.3.4.2	L'entartrage :	31
I.3.4.3	Le colmatage :	31
I.3.5	Dessalement en Algérie :	32
I.3.6	Avantages et inconvénients de dessalement en Algérie :	34

## **Chapitre II: L'adsorption et la conductivité**

II.1	Partie 1 : L'adsorption	36
II.1.1	Introduction :	36
II.1.2	Définition :	36
II.1.3	Les types d'adsorption :	37
II.1.3.1	Adsorption physique :	37
II.1.3.2	Adsorption chimique :	37
II.1.4	Mécanisme d'adsorption :	39
II.1.4.1	Diffusion externe :	39
II.1.4.2	Diffusion interne :	39
II.1.4.3	Diffusion de surface :	39
II.1.5	Les paramètres influençant l'adsorption :	40
II.1.6	Isothermes d'adsorption :	42
II.1.6.1	Isotherme de Langmuir :	42
II.1.6.2	Isotherme de Freundlich :	44
II.1.7	Classification des isothermes :	45
II.1.8	Cinétique d'adsorption :	47

II.1.9	Thermodynamique d'adsorption :	48
II.1.10	Domaines d'applications de l'adsorption :	49
II.2	Partie2 : la conductivité	49
II.2.1	Définition :	49
II.2.2	Comment mesurer la conductivité :	49
II.2.3	La solution conductrice :	50
II.2.4	La conductimètre :	51

### **Chapitre III: généralité sur l'adsorbant et le charbon actif**

III.1	Partie 1 : Généralité sur l'adsorbant	52
III.1.1	Historique :	52
III.1.2	Définition :	52
III.1.3	Principaux types d'adsorbant :	52
III.1.4	Critères de la bonne qualité de l'adsorbant :	54
III.2	Partie 2 : Charbon actif	54
III.2.1	Définition :	54
III.2.2	L'origine de charbon :	55
III.2.3	Structure du charbon actif :	56
III.2.4	Préparation du charbon actif :	57
III.2.4.1	Phase carbonisation :	57
III.2.4.2	Phase d'activation :	57
III.2.5	Différentes formes de charbon actif :	60
III.2.5.1	Charbon actif en poudre :	60
III.2.5.2	Charbon actif en grain :	60
III.2.5.3	Charbon actif extrudé :	61
III.2.6	Propriétés physiques et chimiques des charbons actifs :	62
III.2.6.1	Propriétés physiques :	62
III.2.6.2	Propriétés chimiques :	63
III.2.7	Structure poreuse :	64
III.2.8	Régénération du charbon actif :	65
III.2.8.1	Régénération à la vapeur :	65
III.2.8.2	Régénération thermique :	65
III.2.8.3	Régénération chimique :	65
III.2.8.4	Régénération biologique :	65
III.2.9	Mise en œuvre du charbon actif :	66
III.2.9.1	Le charbon actif pulvérulent CAP :	66

III.2.9.2	Le charbon actif en grain CAG : .....	66
III.2.10	Quelques applications du charbon actif : .....	66
<b>Chapitre IV: Partie expérimentale</b>		
IV.1.1	Matériels et Méthodes : .....	68
IV.1.1.1	Matériels et appareillage : .....	68
IV.1.1.2	Réactifs utilisés : .....	68
IV.1.2	Méthodologies de travail : .....	69
IV.1.2.1	Choix du charbon : .....	69
IV.1.2.2	Purification du charbon : .....	69
IV.1.2.3	Activation du charbon : .....	70
IV.1.2.4	Méthodes de caractérisation du charbon actif : .....	71
IV.1.2.4.1	La densité : .....	71
IV.1.2.4.2	Mesure de la porosité : .....	71
IV.1.2.4.3	Mesure du pH de la suspension : .....	72
IV.1.2.4.4	Taux d'humidité : .....	72
IV.1.2.4.5	Mesure de la conductivité : .....	72
IV.1.2.4.6	L'indice d'iode : .....	72
IV.1.2.4.7	L'indice de bleu de méthylène : .....	73
IV.1.2.4.8	Point de charge zéro (PZC) de RB : .....	74
IV.1.2.5	Optimisation des conditions d'adsorption de l'eau de mer et la saumure : .....	76
IV.1.2.6	Caractérisation de charbon actif : .....	77
IV.1.3	Etude fondamentale d'adsorption de l'eau de mer sur le charbon actif : .....	78
IV.1.3.1	Effet du temps de contacts : .....	78
IV.1.3.1.1	Modèle cinétique du pseudo premier ordre : .....	78
IV.1.3.1.2	Modèle cinétique du pseudo second ordre : .....	79
IV.1.3.2	Effet de la masse de charbon actif : .....	79
IV.1.3.3	Etablissement des isothermes d'adsorption : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.1.3.3.1	Modélisation des résultats expérimentaux : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.1.3.3.1.1	Le modèle de Langmuir : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.1.3.3.1.2	Le modelé de Freundlich : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.1.3.4	Effet de la température : .....	80
IV.1.3.4.1	Modèle thermodynamique : .....	80
IV.1.4	Études fondamentales d'adsorption de la saumure sur le charbon actif : .....	81
<b>Conclusion</b>		98

# Partie bibliographique

# Introduction générale

# Introduction générale

L'eau couvre la plus grande partie de la surface terrestre, avec un pourcentage qui est environ 71% pour cette raison on l'appelle la planète bleue, où volume d'eau est estimé 1,4% milliard par km cube.

Quant à l'eau douce, sur 71% elle ne constitue que 1%, et comme on le sait, l'eau douce est un élément indispensable à la vie, mais en raison de la croissance démographique, de nombreux pays souffrent de pénurie d'eau.

Afin de couvrir les besoins des populations de manière efficace et rapide, les chercheurs ont opté pour une nouvelle technique de dessalement de l'eau de mer qui consiste à retirer les sels du l'eau en respectant les normes nationales et internationales.

Le dessalement représente une solution efficace face aux sérieux problèmes de pénurie d'eau, malgré cela il comporte certains inconvénients environnemental et économique.

L'Algérie parmi les pays qui utilise la technique de dessalement des eaux de mer, elle a développé un programme ambitieux dans ce domaine en mettant en place, en premier lieu, 23 stations « Monobloc », réparties sur un littorale qui s'étale sur plus de 1200 Km de long.

Parmi les procédés pour diminuer la salinité de l'eau de mer et la saumure, l'adsorption reste une technique relativement utilisée et facile à mettre en œuvre. Le charbon actif est l'adsorbant le plus largement utilisé en raison de sa grande capacité d'adsorption des matériaux organiques.

Dans ce travail, on étudie les effets du dessalement de l'eau de mer sur l'écosystème aquatique au moyen d'une technique d'adsorption utilisant un matériau organique (charbon actif) pour diminuer les sels de l'eau de mer et la saumure.

Ce compose de deux parties, théorique et expérimentale.

**Dans la première partie théorique on déclare trois chapitres principalement sont :**

❖ **Chapitre I :** Généralité sur l'eau et dessalement.

Nous sommes intéressés par l'étude de l'eau, notamment en ce qui concerne l'eau de mer et l'eau potable et ses méthodes de dessalement.

# Introduction générale

---

❖ **Chapitre II** : Généralité sur l'adsorption et la conductivité :

On a fait une étude sur l'adsorption ; les types ; et la cinétique de ce processus.

❖ **Chapitre III** : Généralité sur l'adsorbant et le charbon actif.

Dans ce chapitre on s'intéresse à l'étude des adsorbants ; leurs classes et notamment tout ce qui concerne le charbon actif.

**Dans la deuxième partie expérimentale :**

❖ **Chapitre IV** : partie expérimentale.

Dans cette partie, nous sommes amenés à étudier les effets de certains paramètres (temps de contact, la masse, et la température) par l'adsorption sur le charbon actif en présentant les matériaux utilisés et la méthode approuvée, et en fin les résultats obtenus sont présentés dans la conclusion et résumés les principaux résultats de ce travail avec des recommandations au cas où la recherche se poursuivrait.

# Chapitre I

# Chapitre I

## Partie 1 : L'eau de mer :

### I.1.1 Introduction (généralité sur l'eau) :

L'eau constitue un élément essentiel dans la vie et l'activité humaine. C'est une composante majeure des mondes minéral et organique. Dans le monde présent, l'eau participe à toutes les activités quotidiennes notamment, domestiques, industrielles et agricoles ce qui la rend un élément récepteur exposé à tous les genres de pollution. Le phénomène de la pollution contribue de façon considérable à la limitation des ressources en eau potable. La dégradation de l'état de l'eau de consommation a différents impacts directs ou indirects sur la santé des populations humaines en contact avec cette eau. Tout ceci oblige à faire de plus en plus appel à des eaux d'origines diverses et notamment les eaux de surface. Les insuffisances existantes dans la protection de ces eaux face aux nombreuses pollutions peuvent contribuer à la dégradation de la qualité de ces eaux et à l'augmentation de certains micropolluants minéraux et surtout organiques indésirables dans les eaux destinées à la consommation. [1]

Près de 70 % de la surface de la Terre est recouverte d'eau (97 % d'eau salée et 3 % d'eau douce dans différents réservoirs), essentiellement sous forme d'océans mais l'eau est aussi présente sous forme gazeuse, liquide et solide. Le volume approximatif de l'eau de la Terre (toutes les réserves d'eau du monde) est de 1 360 000 000 km<sup>3</sup>. Dans ce volume, la répartition est la suivante [2] :

- 1 320 000 000 km<sup>3</sup> (97,2 %) se trouve dans les océans
- 25 000 000 km<sup>3</sup> (1,8 %) se trouve dans les glaciers et les calottes glaciaires.
- 13 000 000 km<sup>3</sup> (0,9 %) sont des eaux souterraines
- 250 000 km<sup>3</sup> (0,02 %) sous forme d'eau douce dans les lacs, les mers intérieures, et les fleuves
- 13 000 km<sup>3</sup> (0,001 %) sous forme de vapeur d'eau atmosphérique à un moment donné.

### I.1.2 Définition de l'eau de mer :

L'eau de mer est l'eau salée des mers et des océans de la Terre. On dit qu'elle est « salée » parce qu'elle contient des substances dissoutes, les sels, constitués d'ions, principalement des

ions halogénures comme l'ion chlorure et des ions alcalins comme l'ion sodium. On trouve 30 à 40 g de sels dissous pour 1 kg d'eau de mer. L'eau salée s'oppose à l'eau douce, qui contient moins de 1 g de sels dissous par kilogramme. La masse volumique de l'eau de mer à la surface est d'environ 1,025 g/ml, supérieure de 2,5 % à celle de l'eau douce (1 g/ml) à cause de la masse du sel et de l'électrostriction<sup>1</sup>. [3]



Figure I.1 : L'eau de mer (salamandre)

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

L'eau de mer est une solution dans l'eau  $H_2O$  de nombreuses substances dissoutes différentes. Jusqu'à 2/3 des éléments chimiques naturels sont présents dans l'eau de mer, bien que la plupart ne trace que. Six composants, tous des ions, représentent plus de 99 % de la composition du soluté.

Les chlorures en sont à plus de 55 % à l'origine, avec le chlorure de sodium  $NaCl$  (sel de cuisine), mais elle contient aussi des sulfates, des bicarbonates, des bromures et du Fluor parmi les anions, et parmi les cations, du sodium (plus de 30 %), du magnésium, du calcium, du potassium, du Strontium, et l'acide borique comme molécule non dissociée. [4]

**Tableau I.1 : Principaux sels dissous pour une eau de mer de salinité 35 g/l**

<b>Ions</b>	<b>g/Kg</b>	<b>mol/Kg</b>
Chlorure (Cl <sup>-</sup> )	19,3524	0,54586
Sulfate (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	2,7123	0,02824
Hydrogénocarbonate (HCO <sub>3</sub> <sup>3-</sup> )	0,1080	0,001770
Bromure (Br <sup>-</sup> )	0,0673	0,000842
Carbonate (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	0,0156	0,000260
Fluorure (F <sup>-</sup> )	0,0013	6,84 × 10 <sup>-5</sup>
Hydroxyde (HO <sup>-</sup> )	0,0002	1,2 × 10 <sup>-5</sup>
Ion sodium (Na <sup>+</sup> )	10,7837	0,46907
Ion magnésium (Mg <sup>2+</sup> )	1,2837	0,05282
Ion calcium (Ca <sup>2+</sup> )	0,4121	0,01028
Ion potassium (K <sup>+</sup> )	0,3991	0,01021
Ion strontium (Sr <sup>2+</sup> )	0,0079	9,02 × 10 <sup>-5</sup>
Ion lithium (Li <sup>+</sup> )	1,73 × 10 <sup>-4</sup>	2,49 × 10 <sup>-5</sup>
Ion rubidium (Rb <sup>+</sup> )	1,20 × 10 <sup>-4</sup>	1,404 × 10 <sup>-6</sup>
Ion baryum (Ba <sup>2+</sup> )	2,0 × 10 <sup>-5</sup>	1,46 × 10 <sup>-7</sup>
Ions polyatomiques dont molybdène	1,0 × 10 <sup>-5</sup>	1,04 × 10 <sup>-7</sup>
Ions polyatomiques dont uranium	3,3 × 10 <sup>-6</sup>	1,39 × 10 <sup>-8</sup>
Ions polyatomiques dont vanadium	1,9 × 10 <sup>-6</sup>	3,73 × 10 <sup>-8</sup>
Ion fer (Fe <sup>2+</sup> ; Fe <sup>3+</sup> )	1,3 × 10 <sup>-6</sup>	2,33 × 10 <sup>-8</sup>
Ions polyatomiques dont titane	1,0 × 10 <sup>-6</sup>	2,09 × 10 <sup>-8</sup>
Ion aluminium (Al <sup>3+</sup> )	1,0 × 10 <sup>-6</sup>	3,71 × 10 <sup>-8</sup>
<b>Autres espèces</b>	<b>g/kg</b>	<b>mol/kg</b>

Eau (H <sub>2</sub> O)	965	53,57
Acide borique (B(OH) <sub>3</sub> )	0,0198	0,000320
Tétrahydroxyborate (B(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	0,0079	0,000100
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	4,0 × 10 <sup>-4</sup>	9,09 × 10 <sup>-6</sup>

Dans 100 g de sel de mer, le chlorure de sodium compte pour environ 77,7 g. Viennent ensuite le chlorure de magnésium (10,8 g), le sulfate de magnésium (4,7 g), le sulfate de calcium (3,6 g), le sulfate de potassium (2,4 g), le carbonate de calcium (0,3 g), le bromure de magnésium (0,2 g).

**Tableau I.2 : Pourcentages en masse des principaux éléments [5]**

Éléments	% en masse	Éléments	% en masse
Oxygène (O)	85,84	Soufre (S)	0,0905
Hydrogène (H)	10,82	Calcium (Ca)	0,041
Chlore (Cl)	1,935	Potassium (K)	0,040
Sodium (Na)	1,078	Brome (Br)	0,0067
Magnésium (Mg)	0,1284	Carbone (C)	0,00245

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

### I.1.4.1 Caractéristiques chimiques :

#### I.1.4.1.1 Salinité :

La 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 de l'eau de mer est de l'ordre de 35 g/L, cependant cette valeur varie fortement selon les régions et la saison :

Mer Baltique : 7 g/L

Mer Méditerranée : 36 à 39 g/L

Golfe Arabo - Persique : 40 à 70 g/L

Mer Morte : 270 g/L

Mer Rouge : environ 40g /L. [6]

Techniquement, la salinité est défini comme la masse (en grammes) des substances dissoutes dans un kilogramme d'eau de mer, lorsque les ions bromures et iodures sont remplacés par leur équivalent chlorure, les carbonates sont convertis en oxydes et l'ensemble de la matière organique est oxydée.

Comme cette valeur est difficile à obtenir, les scientifiques s'appuient sur le fait que la proportionnalité des différents sels est constante pour définir d'autres grandeurs en lien avec la salinité : la chlorinité et la chlorosité. [7]

#### **I.1.4.1.2 L'alcalinité :**

Alcalinité : L'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bases et de sels d'acides faibles dans les eaux naturelles . L'alcalinité d'une eau correspond à sa capacité à réagir avec les ions hydrogène (H) qui est due à la présence des ions hydrogénocarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ).

Autrement dit, on est amené à considérer deux types d'alcalinité qui correspondent, encore une fois à deux bornes de pH :

##### **- Alcalinité au virage du rouge de méthyle :**

elle correspond à l'alcalinité totale au pH de 4.5, ce qui revient à déterminer les ions  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{OH}^-$ . Cette alcalinité se nomme également titre alcalimétrique complet TAC.

##### **- Alcalinité au point de virage de la phénophtaléine (alcalinité composite) :**

elle correspond à l'alcalinité entraînée par les ions  $\text{OH}^-$  et à la moitié des ions  $\text{CO}_3^{2-}$  Cette alcalinité composite est nulle pour une eau dont le pH est inférieur ou égal à 8.3. L'alcalinité composite se nomme également titre alcalimétrique (TA). L'unité utilisée est le degré français ( $1^\circ\text{F} = 10 \text{ mg/l de CaCO}_3 = 0,2 \text{ milliéquivalent . l}^{-1}$ ) [8]

#### **I.1.4.2 Caractéristiques physiques :**

##### **I.1.4.2.1 Température :**

La température des eaux de l'océan résulte de l'action de facteurs antagonistes, les uns d'échauffement (absorption des radiations provenant du Soleil et du ciel, transfert par convection à partir de l'atmosphère, condensation de la vapeur d'eau, transformation en chaleur de l'énergie des vents agissant sur la surface), les autres de refroidissement

(rayonnement de grande longueur d'onde à partir de la surface de l'océan, transfert par convection vers l'atmosphère, évaporation).

En surface, la température moyenne de l'eau croît, naturellement, des latitudes élevées vers les latitudes basses, depuis des valeurs faiblement négatives (de  $-1$  à  $-1,50^{\circ}\text{C}$ ) pour les mers polaires jusqu'à près de  $30^{\circ}\text{C}$  dans certaines aires équatoriales ; l'équateur thermique est d'ailleurs légèrement décalé vers le nord par rapport à l'équateur géographique. La température de surface est évidemment affectée par les échanges thermiques entre l'eau et l'atmosphère, tant à l'échelle saisonnière qu'à l'échelle de l'alternance des jours et des nuits. Sauf dans les cas où des phénomènes dynamiques provoquent, en un point donné, un remplacement saisonnier des masses d'eau, les températures de surface sont toujours plus élevées en saison chaude qu'en saison froide ; la variation annuelle est faible dans les eaux polaires et dans les eaux tropicales et équatoriales (en général de l'ordre de  $1$  à  $30^{\circ}\text{C}$ ) ; dans les mers tempérées, l'écart saisonnier est beaucoup plus grand :  $8^{\circ}\text{C}$  pour la Manche, de  $12$  à  $13^{\circ}\text{C}$  pour la Méditerranée. Les fluctuations diurnes, qui sont beaucoup plus faibles et n'affectent que la couche la plus superficielle, n'atteignent pas  $10^{\circ}\text{C}$  dans les eaux du large ; dans certaines aires côtières peu profondes, elles peuvent avoisiner  $50^{\circ}\text{C}$  et être fortement perturbées par les mouvements de masses d'eaux dus aux marées, lorsque celles-ci ont une amplitude assez importante. [9]

#### **I.1.4.2.2 pH :**

Le pH correspond à la concentration d'ions hydrogène. Il mesure l'acidité ou la basicité d'une eau. Le pH interfère avec d'autres paramètres de la qualité dans les complexes réactions chimiques : dureté, alcalinité, turbidité, conductivité. Le pH de l'eau conditionne les équilibres physico-chimiques, en particulier l'équilibre calco-carbonique et donc l'action de l'eau sur les carbonates (attaque ou dépôt). [10]

Le pH des eaux de mer décroît avec une augmentation de température. Pour une eau chlorite de 19.5% et de  $\text{pH}=8$ , une élévation de température de  $1^{\circ}\text{C}$ , entre  $10^{\circ}\text{C}$  et  $20^{\circ}\text{C}$ , diminue le pH de 0,0109. De même, une augmentation de pression de 100 bars produit une diminution du pH de l'ordre de 0.02. [11]

#### **I.1.4.2.3 La masse volumique :**

La masse volumique varie avec la température et la pression, elle passe par un maximum à environ  $4^{\circ}\text{C}$ . Cette propriété entraîne diverses conséquences, aussi bien dans la nature que dans la station de traitement. L'eau est considérée comme un fluide incompressible. Mais, en fait, c'est un fluide légèrement élastique. [12]

$$\text{Masse volumique}(\rho)=\text{masse}(m)/\text{Volume}(V)$$

**(Kg/m<sup>3</sup>)                      (Kg)                      (m<sup>3</sup>)**

#### **I.1.4.2.4 Tensions superficielles :**

Elle caractérise une propriété des interfaces (surface limitant deux phases). Elle est définie comme une force de traction qui s'exerce à la surface du liquide en tendant toujours à réduire le plus possible l'étendue de cette surface. La tension superficielle diminue avec l'augmentation de la température, et aussi l'addition de sels dissous augmente généralement la tension superficielle. Il existe d'autres corps qui la diminuent, ils sont appelés tensioactifs (exemple : détergents). [12]

#### **I.1.4.2.5 Viscosité :**

C'est la propriété que présente un fluide (liquide ou gaz) d'opposer une résistance aux divers mouvements soit internes (exemple : turbulence), soit globaux (exemple : écoulement). Elle est à la base des pertes de charge et joue donc un rôle important en traitement d'eau. Elle diminue lorsque la température croît. Par contre, elle augmente avec la teneur en sels dissous ; l'eau de mer est donc nettement plus visqueuse que l'eau de rivière. [13]

#### **I.1.4.2.6 Conductivités :**

L'eau est légèrement conductrice. La conductivité est une grandeur qui permet d'évaluer la concentration en ions d'une solution, en effet toute espèce solvates chargée est susceptible de transporter du courant électrique au sein d'une solution, elle est exprimée généralement en Micro siemens par centimètre ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 20°C. La conductivité de l'eau la plus pure que l'on ait obtenue est de 4,8 micro siemens par mètre à 20°C. Elle augmente lorsque des sels sont dissous dans l'eau et elle varie en fonction de la température.

La conductivité de l'eau de mer est environ de 50 mS/cm (50'000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 20 °C. [14]

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

### **I.2.1 Définition de l'eau potable :**

L'eau potable est une eau douce propre à la consommation humaine qui peut être utilisée sans restriction pour boire ou préparer la nourriture. L'eau potable est une ressource naturelle primaire à la consommation; la potabilité permet la survie des êtres vivants et les

activités humaines fondamentales car l'eau subit un traitement qui élimine les agents pathogènes.

Une eau potable est une eau douce chimiquement et biologiquement saine, conforme pour un usage lié à la consommation humaine pour éviter toute maladie. Les normes appliquées à une telle eau ne devraient pas être inférieures à celles proposées dans la dernière édition de "Normes internationales pour l'eau potable" publiée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). L'eau du robinet est très utilisée par les ménages car son niveau de potabilité est élevé.

Des procédés de purification améliorent la potabilité de l'eau pour la rendre consommable sans risque sanitaire. [15]

## **I.2.2 Les compositions chimiques de l'eau potable :**

L'eau contient des gaz dissous (voir Écosystèmes aquatiques continentaux) essentiellement de l'oxygène et du gaz carbonique mais aussi de l'azote ou encore du méthane. Tous n'ont pas la même solubilité dans l'eau et celle-ci décroît quand la température augmente. Elle contient aussi, sous forme dissoute ou en suspension, des substances minérales et organiques. Si les substances minérales sont limitées à une centaine de composés, les substances organiques sont innombrables (plusieurs centaines de mille voire plusieurs millions) et leur identification individuelle très difficile. [16]

### **I.2.2.1 Les matières minérales :**

L'eau contient beaucoup d'ions dissous dont les principaux sont le calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ), le magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ ), le sodium ( $\text{Na}^+$ ), le potassium ( $\text{K}^+$ ), les carbonates ( $\text{CO}_3^-$ ), les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), les sulfates ( $\text{SO}_4^-$ ), les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) et les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ). Ils proviennent pour l'essentiel du lessivage des sols par les eaux de pluie. Aussi, leur teneur dépend-elle directement de la nature des roches du bassin versant. Elle peut varier du milligramme par litre au gramme par litre pour les eaux les plus salées.

En moins grande concentration (du microgramme au milligramme par litre), l'eau contient aussi des éléments nutritifs, ou nutriments, que sont l'azote (contenu dans l'ammoniac, les nitrites et les nitrates), le phosphore (contenu dans les phosphates) et la silice, mais aussi le fer et le manganèse.

D'autres éléments ne sont présents qu'à l'état de trace (de 0,1 à 100 microgrammes par litre), comme l'arsenic, le cuivre, le cadmium, le manganèse, le fer, le zinc, le cobalt, le plomb... Ils proviennent des roches mais aussi parfois des activités industrielles et domestiques.

L'eau contient aussi des matières minérales en suspension (matériaux argileux, limons, etc.).[16]

### **I.2.2.2 Les matières organiques :**

Les matières organiques peuvent être présentes sous forme dissoute (carbohydrates, acides humiques, pigments et composés d'origine artificielle comme les hydrocarbures, les solvants chlorés, ou les pesticides), ou en suspension (déchets végétaux, plancton...). Elles proviennent pour l'essentiel de la dégradation de la matière organique présente dans le milieu ou dans les sols lessivés par les pluies (décomposition des plantes et des animaux), mais aussi de composés issus de l'activité humaine. Leur concentration, infime dans les eaux profondes, peut atteindre quelques dizaines de milligrammes par litre dans les eaux de surface. [16]

### **I.2.3 Les caractéristiques de l'eau potable :**

Les qualités admises d'une eau d'alimentation impliquent la garantie de son innocuité vis-à-vis de l'homme qui est appelé à la consommer. Une eau potable doit présenter un certain nombre de caractères physiques, chimiques et biologiques et répondre, à certains critères essentiels (incolore, insipide, inodore...) appréciés par le consommateur. Toutefois, ses qualités ne peuvent pas se définir dans l'absolu, ni d'une manière inconditionnelle. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a édicté des normes internationales pour l'eau de boisson. [17]

#### **I.2.3.1 Les caractéristiques organoleptiques :**

Les facteurs organoleptiques (couleur, saveur, turbidité et odeur) constituent souvent les facteurs d'alerte pour une pollution sans présenter à coup sûr un risque pour la santé.

- **La couleur :**

Dans l'idéal, l'eau potable doit être claire et incolore. Le changement de couleur d'une eau potable peut être le premier signe d'un problème de qualité. Dans un échantillon d'eau, l'intensité relative d'une couleur est analysée à l'aide d'une échelle arbitraire composée d'unités de couleur vraie [18]

- **Goût et Odeur :**

Les eaux de consommation doivent posséder un goût et une odeur non désagréables. La plupart des eaux, qu'elles soient ou non traitées, dégagent une odeur plus ou moins perceptible et ont une certaine saveur. Ces deux propriétés, purement organoleptiques, sont dextrement subjectives et il n'existe aucun appareil pour les mesurer. Selon les physiologistes, il n'existe que quatre saveurs fondamentales : salée, sucrée, aigre et amère. [18]

- **La saveur :**

La saveur peut être définie comme l'ensemble des sensations perçues à la suite de la stimulation par certaines substances solubles des bourgeons gustatifs. [19]

### **I.2.3.2 Les caractéristiques physico-chimiques :**

#### **I.2.3.2.1 Caractéristiques physiques :**

- **La température :**

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et des gaz, dans la dissociation des sels dissous, donc sur la conductivité électrique et dans la détermination du pH. [20]

La température des eaux de superficielle (rivières lacs et retenues) est très variable selon les saisons et peut passer de 2°C en été. La source principale de l'augmentation de la température est d'origine anthropique pour les eaux de surface est constituée par le contrôle thermique et nucléaire (70 à 80), le reste étant lié à la métallurgie aux industries chimiques et alimentaires ...etc. La température optimale pour se désaltérer se situe vers 12°C à 15°C .en pratique, elle n'a pas d'action directe sur la santé de l'homme. [21]

- **pH (Potentiel Hydrogène) :**

Le pH permet de connaître l'acidité, la basicité ou la neutralité de l'eau, par la mesure de sa concentration en ion  $H^+$ . Le pH d'une eau de surface dépend de l'origine de celle-ci et de nature des terrains traversés, certaines eaux ont parfois un pH s'élèvent brutalement en été résultant d'une forte production végétale .Généralement il se situe dans la plupart des eaux brutes entre 6.5 et 8.5. Le pH est si intimement lié a d'autre aspects de la qualité de l'eau de boisson qu'il est difficile de savoir s'il exerce une influence directe sur la santé dans la fourchette des valeurs généralement observées. [22]

**Tableau I.3 : classification d'une eau selon leur pH [23]**

pH <5	Acidité forte => présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
pH=7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée => majorité des eaux de surface
5,5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines
pH = 8	Alcalinité forte, évaporation intense

- **Conductivité :**

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes, elle permet d'apprécier la qualité des sels dissous dans l'eau et nous renseigne également sur les degrés de minéralisation de l'eau. Elle est exprimée en micro siemens par centimètre ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) Elle dépend des charges de matière organique endogène et exogène, génératrice de sels après décomposition et minéralisation et également avec le phénomène d'évaporation qui concentre ces sels dans l'eau, elle varie aussi suivant le substrat géologique traversé. La conductivité en tout que t'elle n'a pas d'effet sur la santé, puisqu'elle reflète la concentration de l'ensemble des minéraux dissous. [24]

**Tableau I.4 : Classification des eaux selon la conductivité [25]**

Type d'eaux	Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{Cm}$ )	Résistivité ( $\Omega. \text{m}$ )
<b>Eau pure</b>	<23 $\mu\text{S}/\text{Cm}$	>30000
<b>Eau douce peu minéralisée</b>	100 à 200 $\mu\text{S}/\text{Cm}$	5000 à 10000
<b>Eau de minéralisation moyenne</b>	250 à 500 $\mu\text{S}/\text{Cm}$	2000 à 40000
<b>Eau très minéralisée</b>	1000 à 2500 $\mu\text{S}/\text{Cm}$	4001000
<b>Eau de mer</b>	50 mS/cm	17.8

- **Salinité :**

La salinité est un facteur écologique propre aux biotopes aquatiques (mais aussi aux sols) qui caractérise leur teneur en sel (NaCl) et autres sels dissous dans les eaux. Par ailleurs, toute modification intempestive de la salinité due à l'action de l'homme peut présenter un impact redoutable sur les biotopes aquatiques concernés. [26]

- **Taux des sels dissous(TDS) :**

Les sels corrosifs les plus répandus sont les chlorures. Les eaux saumâtres en contiennent des proportions variables, des eaux de surface et les nappes sont de plus en plus polluées par des déversements. En général, jusqu'à 100 mg de chlorures par litre. Les eaux de dureté moyenne ne manifestent par l'action corrosive appréciable. Au-delà de cette teneur, la corrosion croît rapidement vers 1g/l de chlorures, la destruction des métaux, fer acier inoxydable détruit en six mois par une eau froide a 1g de NaCl par litre. [27]

Les sels dissous agissent :

- Par augmentation de conductibilité de l'eau
- Par modification de la structure de tartre déposé

- **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, les limons et les micro-organismes. Une faible part de la turbidité peut être due également à la présence de matières colloïdales d'origine organique ou minérale. La turbidité résulte de la diffusion de la lumière qui est ainsi déviée dans toutes les directions. Ce sont des particules en suspension dans l'eau qui diffusent la lumière. Leur origine peut être extrêmement variable : érosion des roches, entraînement des matières minérales ou organiques du sol, déversement d'eaux usées domestiques ou industrielles riches en matières en suspensions grossières. D'autres unités comparables sont employées, l'unité néphélométrique de turbidité ou NTU. [28]

**Tableau I.5 : Classes de turbidités usuelles (NTU, néphélocimétrie turbidimétrie).**

NTU<5	Eau claire
5<NTU<30	Eau légèrement trouble
NTU>50	Eau trouble
NTU	La plupart des eaux de surface en Afrique atteignent ce niveau de turbidité

### I.2.3.2.2 Caractéristiques chimiques :

- **Oxygène dissous :**

L'oxygène dissous mesure la concentration du dioxygène dissous dans l'eau. Sa solubilité est liée à plusieurs facteurs particuliers : la température, la pression atmosphérique et la salinité et aussi en fonction de l'origine de l'eau, les eaux superficielles peuvent en contenir des quantités relativement importantes proches de la saturation. Les eaux profondes n'en contiennent le plus souvent que quelques milligrammes par litre. Il est exprimé en mg/L.

La diminution de l'oxygène dissous jusqu'à moins 80 : environ de la saturation entraîne une altération organoleptique de l'eau, cependant, elle ne présente aucun effet direct sur la santé. [29]

- **Les matières en suspension (MES) :**

Les matières en suspension (MES) dans l'eau, généralement visibles à l'œil nu (dimension supérieures à 10 (µm), déterminent la turbidité. Les MES sont des particules solides très fines qui se classent en matières décan table et matières colloïdales. La teneur et la composition des matières en suspension sont très variables selon origine de l'eau, elles sont fonction de la teneur des terrains, de la saison, de la pluviométrie, des travaux, des rejets, la concentration peut varier de plusieurs grammes par litre (rivière en crue, par exemple). [30]

Les MES ayant une large surface d'adsorption forment un support idéal pour les ions, les diverses molécules et les agents biologiques de ce fait, elles peuvent constituer un vecteur pour la pénétration de ces produits dans l'organisme. [30]

- **Les résidus secs :**

La détermination des résidus totaux sur une eau non filtrée reflète la teneur en matières dissoutes et en suspension non volatiles. La mesure des résidus secs après filtration correspond quant à elle, aux matières dissoutes (dimension inférieure à 1 $\mu$ m). Les résidus secs permettent d'apprécier la minéralisation d'une eau. Les eaux très minéralisées semblent bien contribuer à l'équilibre des différentes constantes physiologiques de l'homme et surtout de l'enfant, cependant elles peuvent poser des problèmes endocriniens complexes. D'après l'OMS une eau est considérée comme d'excellente qualité pour une teneur de l'extrait sec inférieure à 300 mg/L et inacceptable pour une teneur supérieure à 1200mg/l. [31]

- **Alcalinité :**

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence des bicarbonates, carbonates et les hydroxydes, elle est mesurée soit par le titre alcalimétrique (TA) ou par le titre alcalimétrique complet (TAC). [32]

- **Le Titre Alcalimétrique (TA) :**

Permet de connaître la teneur en hydroxyde (OH<sup>-</sup>), la moitié de la teneur en Carbonate CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>, et un tiers environ des phosphates présents. [33]

- **Le Titre Alcalimétrique Complet (TAC) :**

Elle correspond à la teneur en ions OH<sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> pour des pH inférieurs à 8.3, la teneur en ions OH<sup>-</sup> et CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> est négligeable (TA =0) dans ce cas la mesure de TAC correspond au dosage des bicarbonates seuls. [34]

## **Partie 3 : Dessalement**

### **I.3.1 Introduction :**

La double croissance économique et démographique de notre planète a pour conséquence une pression importante sur l'ensemble des ressources naturelles, jamais les tensions sur les matières premières n'ont été aussi fortes. [35]

Les besoins deviennent de plus en plus importants et les pollutions rendent la ressource inutilisable.

Une des solutions pour pallier le déficit d'eau potable, est la conception des stations de dessalement. [36]

Le dessalement (désalinisation ou dessalage) consiste à produire de l'eau douce à partir d'une eau salée ou saumâtre, généralement par extraction de l'eau douce et plus rarement par extraction du sel.

C'est une technique intéressante en vue de l'abondance de la matière première : l'eau de mer et les eaux saumâtres. [37]

Les premières technologies utilisées industriellement furent des méthodes, dites « thermiques », de distillation. Dans les années 1980, se sont développées les méthodes dites à « membranes » telles que l'osmose inverse et l'électrodialyse, présentant un coût énergétique plus faible, aujourd'hui de 3,5 KWh/m<sup>3</sup> d'eau produite en moyenne. [38]

### I.3.2 Définition de dessalement :

Le dessalement de l'eau (également appelé dessalage ou désalinisation) est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce (potable) à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer notamment).

Ce qu'il faut retenir, c'est qu'il est plus simple et plus économique de rechercher des sources d'eau douce à traiter (eaux de surface, telles que lac et rivière, ou eau souterraine), que de dessaler l'eau de mer. Cependant, dans de nombreuses régions du monde, comme l'Algérie, les sources d'eau douce sont rares. On se tourne donc vers le dessalement d'eau de mer. [39]

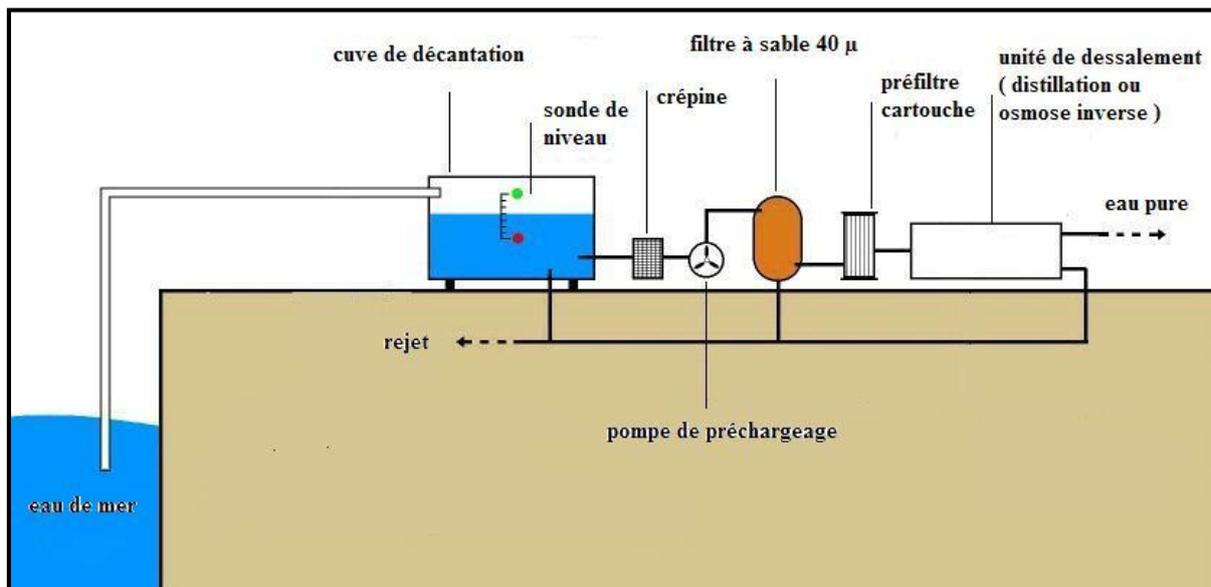


Figure I.2 : Un schéma représente le dessalement

➤ **Importance du dessalement :**

La technique du dessalement d'eau de mer représente une ressource alternative qui apporte des réponses aux besoins en eau à court et à long terme. 72% de la surface totale de la terre est recouverte d'eau, dont 97% est salée. Les 3% d'eau douce qui restent sont inégalement répartis : 10 pays se partagent 60% des réserves, alors que 29 autres essentiellement en Afrique et au Moyen Orient font régulièrement face à des pénuries.

Bien qu'un peu moins de 1% de l'eau potable consommée dans le monde soit produite à partir du dessalement, les perspectives offertes par cette technologie sont inexorablement grandissantes.

40 % de la population mondiale vit à moins de 70 kilomètres d'une côte, soit la zone d'utilisation raisonnable du dessalement. Avec plus de 17 000 unités de production d'eau potable, soit 51 millions de m<sup>3</sup>/jour d'eau produite, la production d'eau dessalée a atteint en 2016, 109 millions de m<sup>3</sup>/jour.

En Mer Méditerranée, la salinité varie entre 38, 4 g/l et 41, 2 g/l.

### **I.3.3 Les différentes techniques de dessalement :**

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 précités, 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. [40]

#### **I.3.3.1 Les procédés thermiques :**

##### **I.3.3.1.1 La congélation :**

La technologie de dessalement par congélation a été proposée comme alternative de la distillation et de l'osmose inverse pour le dessalement de l'eau de mer dans plusieurs travaux.

Cette technologie peut également être appliquée au traitement des eaux usées. On distingue deux types de procédés par congélation, cette dernière pouvant être «directe» ou «indirecte». [41]

**a. Dessalement par congélation directe :**

Le principe de la congélation directe repose sur la formation de cristaux de glace par contact direct entre un réfrigérant et l'eau de mer. Ce réfrigérant peut être l'eau de mer elle-même : la chaleur est soustraite à la saumure par une évaporation flash sous pression réduite. Ce procédé est appelé VFVC (Vacuum Freezing Vapour Compression) dans la littérature anglo-saxonne. La congélation directe peut également être assurée par un réfrigérant secondaire : le refroidissement est obtenu par la vaporisation de butane liquide et froid injecté sous pression directement dans la saumure. Le procédé est alors appelé SRF (Secondary Refrigerant Freeze). Quelques petites unités de dessalement par congélation directe ont été développées au cours des quarante dernières années, mais la technologie n'a jamais été utilisée commercialement pour produire de l'eau potable. Les unités pilote de Wright ville beach en Caroline du Nord (USA) utilisaient la technologie VFVC. Une unité construite en Floride (USA) était basée sur le procédé SRF ; Dans la littérature, on trouve aussi des brevets concernant des procédés de dessalement par congélation directe.

SIMON-CARVES a inventé un procédé pour produire des cristaux de glace à partir de l'eau de mer. Le principe de ce procédé est similaire au procédé SRF. Il consiste :

- À congeler l'eau de mer pour produire des cristaux de glace par ébullition du butane liquide.
- séparer les cristaux de glace de leur liqueur mère.
- faire fondre les cristaux de glace pour former l'eau douce.

Wilson a inventé un procédé de dessalement de l'eau salée par refroidissement par un échange thermique alimenté par du méthane liquide ou du gaz naturel. [41]

**b. Dessalement par congélation indirecte :**

Dans le cas de la congélation indirecte, le refroidissement est assuré par un échangeur de chaleur et une couche de glace est déposée sur les parois froides de l'échangeur. Plusieurs unités pilotes basées sur la congélation indirecte ont été décrites dans la littérature :

- Zahed et coll ont combiné l'énergie solaire et la congélation pour produire de l'eau douce dans une usine située à Yanbu (Arabie Saoudite). Le procédé permettait de produire environ  $180\text{m}^3$  /j.

- Mueller a inventé une technique pour produire de l'eau douce dans les avions et dans les vaisseaux spatiaux par recyclage des eaux usées. L'invention combine la congélation, l'osmose inverse et une dernière étape de désinfection par rayonnement ultraviolet. L'eau ainsi produite n'est cependant pas potable mais peut être utilisée dans les douches ou les toilettes.

- le système de purification de Hussein pour la décontamination et le dessalement de l'eau de mer. L'auteur revendique que le système est capable d'éliminer de grandes quantités d'ions, des agents chimiques et biologiques y compris les gaz, les vapeurs, les herbicides et les pesticides organiques.

- le système de dessalement par congélation discontinue d'Oularé .Le procédé est composé d'un cristalliseur double enveloppé pour produire des cristaux de glace en suspension avec la solution mère et un bain thermostaté pour refroidir le cristalliseur. L'auteur n'a pas réussi à obtenir de l'eau douce par cette technique mais il a seulement pu réduire la salinité de la solution initiale. Il rapporte les résultats obtenus avec trois solutions. La salinité de l'eau de mer de Rabat a ainsi été abaissée de 36g/l, initialement, à 27g/l dans la glace fondue. La salinité de deux autres solutions a été abaissée de 23g/l et 9g/l à respectivement 18g/l et 7 g/l.

- le procédé d'écaillage a été étudié par Adrian pour le traitement des eaux résiduaires et de tous types d'effluents. Il faut donc quatre cycles de fonctionnement pour produire de l'eau potable à partir d'eau salée de concentration 35g/kg. [41]

#### **I.3.3.1.2 Distillations :**

Dans les procédés de distillation, il s'agit de chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur ainsi produite ne contient pas de sels, il suffit alors de condenser cette vapeur pour obtenir de l'eau douce liquide. Il s'agit en fait d'accélérer le cycle naturel de l'eau. En effet l'eau s'évapore naturellement des océans, la vapeur s'accumule dans les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux.

L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet pour transformer un kg

d'eau liquide en 1 kg d'eau vapeur à la même température il faut environ 2250 kilo joules (si le changement d'état se fait à 100 °C). Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

Deux procédés se partagent le marché du dessalement thermique : le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF) et le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED).[42]

#### **I.3.3.1.2.1 Le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF) :**

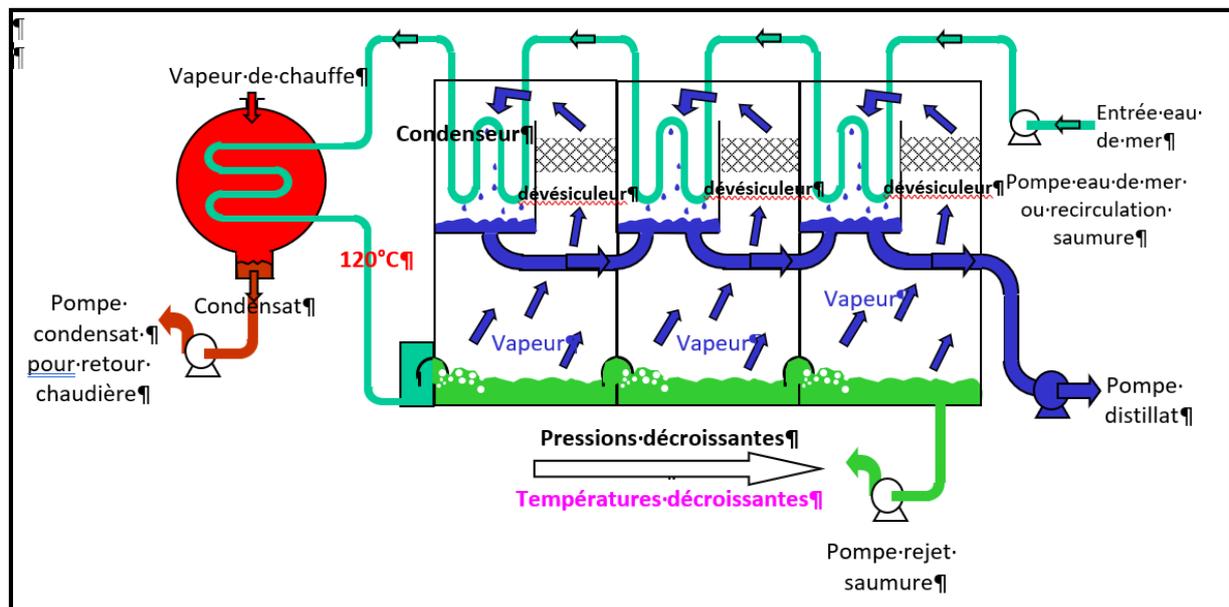
Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120 °C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore (voir figure 3) puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détente successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle.

Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120 °C, l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 120 °C grâce à de la vapeur à une température supérieure à 120 °C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité.

On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un dévésiculateur constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte. L'avantage principal du procédé MSF est que l'évaporation de l'eau de mer ne se produit pas autour des tubes de chauffe puisque le liquide « flashe » ceci limite les risques d'entartrage.

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière, cette énergie peut être peu coûteuse si on récupère de la vapeur basse pression à la sortie d'une turbine de centrale électrique. Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer.

Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup> d'eau dessalée par jour. [42]



**Figure I.3 : Principe de fonctionnement d'un système par détonées successives (MSF) à 3 étages**

### I.3.3.1.2.2 Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED)

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1er effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2ème effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2ème effet et ainsi de suite (voir figure 4). Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m<sup>3</sup> d'eau douce produite). [42]

### I.3.3.1.3 Plusieurs technologies d'évaporateurs multiples effets existent :

- Les évaporateurs multiples effets à tubes horizontaux arrosés sont les appareils les plus utilisés actuellement. Dans ces appareils le fluide de chauffage s'écoule dans les tubes horizontaux tandis que l'eau de mer à évaporer est arrosée de façon à s'écouler sous forme de film le plus uniforme possible sur l'extérieur des tubes. La vapeur produite dans la calandre (enceinte cylindrique qui contient le faisceau de tubes) est ensuite envoyée dans les tubes de l'effet suivant où elle cédera son énergie de condensation. Ces évaporateurs présentent un très bon coefficient d'échange grâce à l'écoulement en film de l'eau de mer. C'est la raison pour laquelle ils remplacent actuellement les plus anciens évaporateurs à faisceau de tubes noyés dans lesquels les tubes étaient plongés dans l'eau de mer. [42]

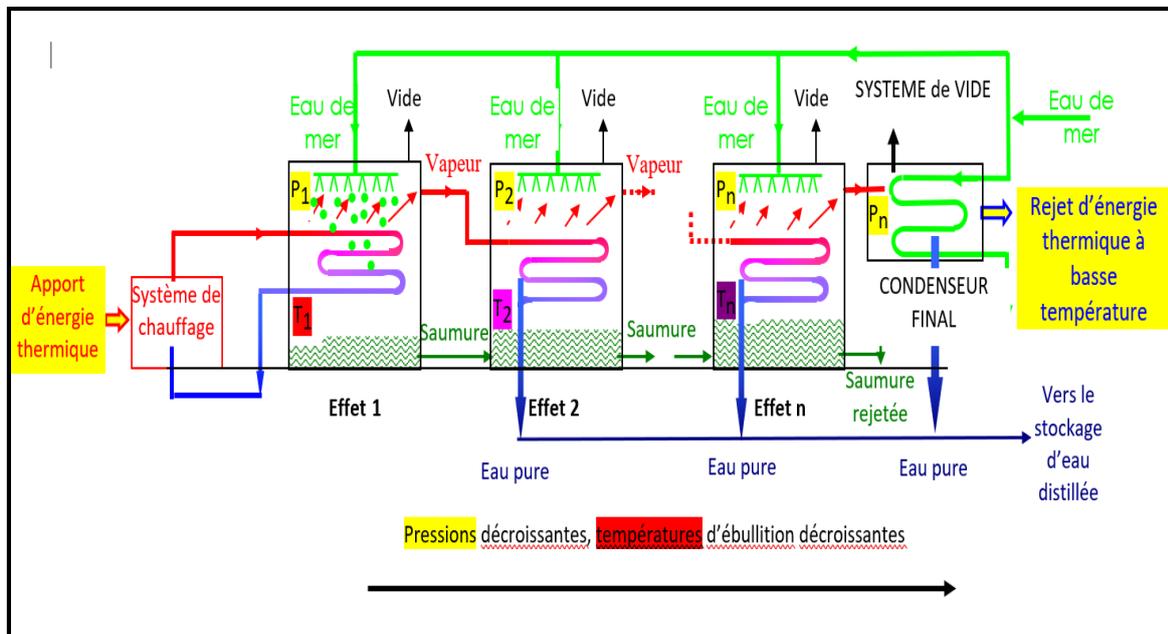


Figure I.4 : Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED)

- Des évaporateurs multiples effets à plaques sont également en cours de développement. L'eau de mer à évaporer s'écoule alors sous forme de film mince le long d'une mince plaque métallique chauffée par la vapeur provenant de l'effet précédent qui s'écoule le long de l'autre face de la plaque métallique. De nombreuses plaques entre lesquelles s'écoulent alternativement l'eau de mer et la vapeur de chauffage sont associées en

parallèle pour constituer un effet. La vapeur produite est recueillie dans une calandre cylindrique dans laquelle sont placées les plaques. Cette vapeur est ensuite envoyée entre les plaques situées dans une calandre qui constitue le deuxième effet et ainsi de suite.

Un système compact à bases de plaques EasyMED constitué de cellules élémentaires comprenant une zone d'évaporation et une zone de condensation brevetée en 1998 est également en cours de développement. L'agencement judicieux de cellules élémentaires pour que chaque zone d'évaporation se situe entre deux zones de condensation de l'effet précédent permet d'obtenir un appareil plus compact puisqu'il ne nécessite pas une volumineuse calandre pour chaque effet.

L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière produisant le fluide de chauffage pour le premier effet. On peut cependant utiliser des chaleurs résiduelles en couplant le procédé MED à des usines de production d'électricité ou des usines rejetant produisant les eaux résiduelles à des températures de l'ordre de 80 °C. Il faut également de l'énergie électrique pour les pompes de circulation et la production de vide.

Afin de limiter la consommation d'énergie thermique, il est aussi possible d'utiliser la compression mécanique de vapeur. Ceci est possible dans le cas de l'évaporation simple ou multiple effet. La vapeur produite dans le dernier effet ou dans l'effet unique (pour de petites unités) est aspirée par un compresseur. Après compression, la température de saturation de la vapeur haute pression est augmentée. Cette vapeur peut donc être utilisée (elle est envoyée dans les tubes du faisceau tubulaire) pour porter à ébullition l'eau de mer dans l'évaporateur où règne une pression plus faible. La vapeur haute pression est ainsi condensée et se transforme en eau distillée liquide et le cycle se reproduit avec la vapeur produite par l'évaporation partielle de l'eau de mer. [42]

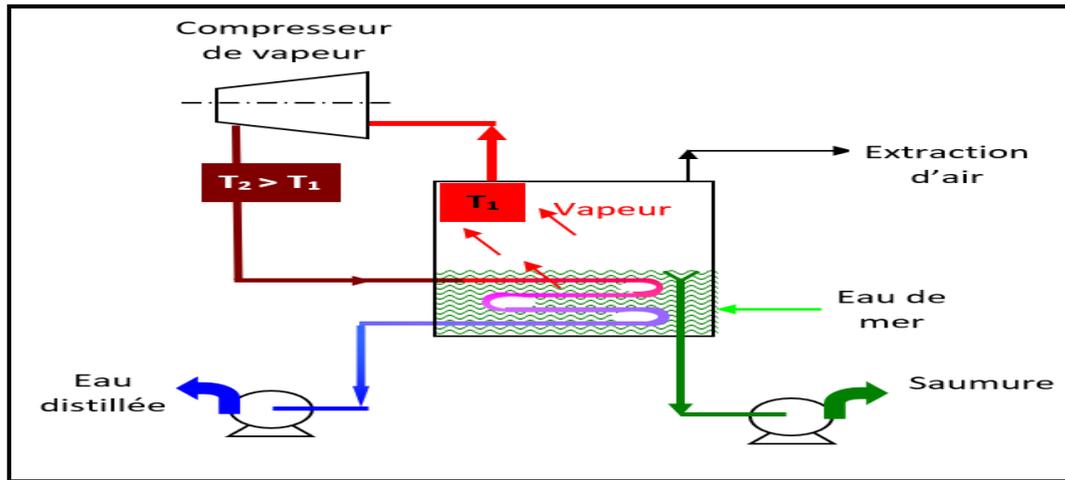


Figure I.5 : Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur

### I.3.3.2 Les procédés utilisant des membranes :

#### I.3.3.2.1 L'osmose inverse :

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de  $10^{-7}$  mm de taille. L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression.

La teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de  $0,5 \text{ g.l}^{-1}$ . [42]

#### ✚ Principe de l'osmose inverse

On appelle osmose le transfert de solvant (eau dans la plupart des cas) à travers une membrane semi-perméable sous l'action d'un gradient de concentration.

Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes. Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique. [42]

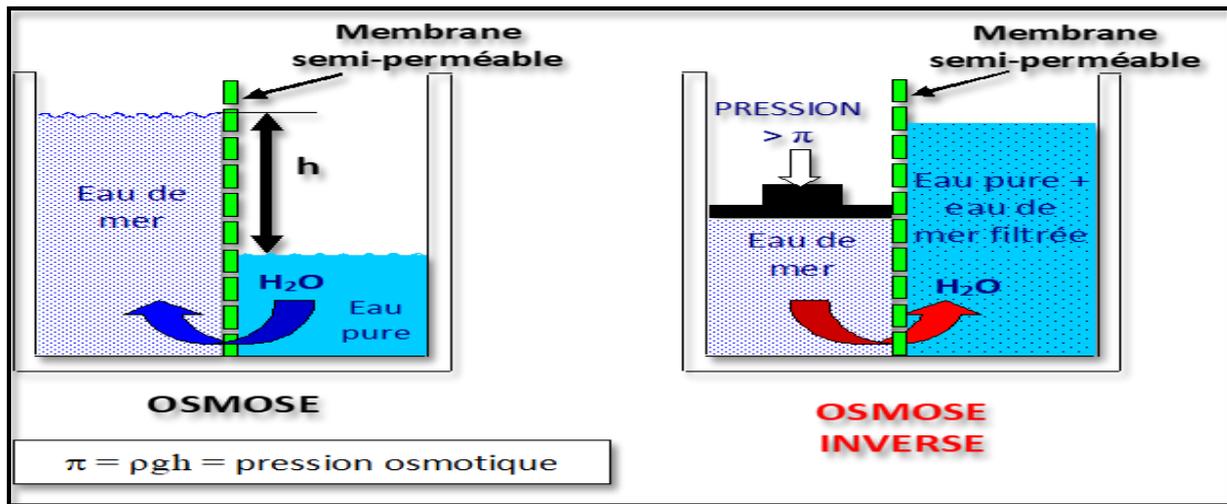


Figure I.6 : Osmose et osmose inverse

Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique, c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse.

Pour les solutions suffisamment diluées, la pression osmotique notée  $\pi$  peut être calculée d'après la loi de Van't Hoff :

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

- $i$  est le nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte,
- $C$ 'est la concentration en sels en  $\text{mol.m}^{-3}$
- $R$  est la constante des gaz parfaits  $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- $T$  est la température absolue de la solution en Kelvin.

Application :

La pression osmotique d'une eau à 20°C contenant 35 g de chlorure de sodium par litre vaut :

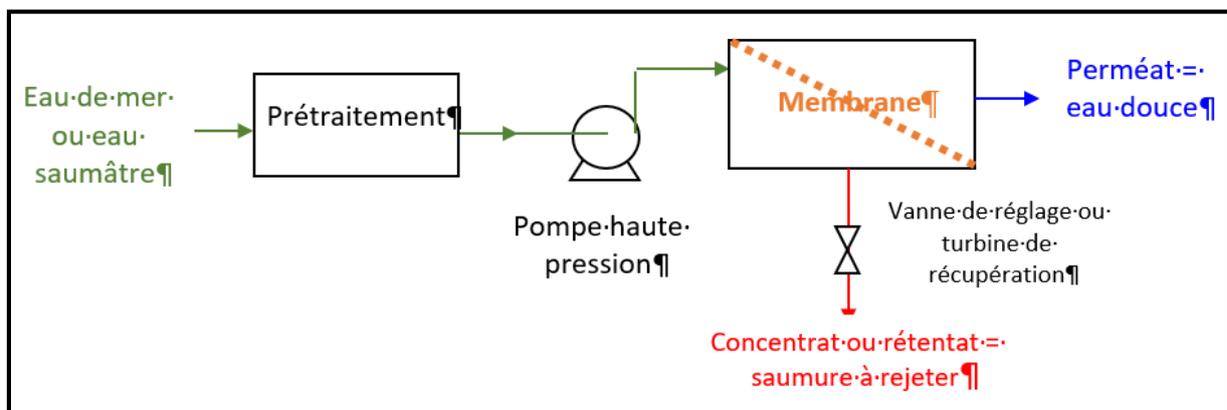
$$\Pi = 2 \times (35 \times 10^3 / 58,5) \times 8,314 \times 293 = 29,14 \times 10^5 \text{ Pa} = 29,14 \text{ bar.}$$

Le débit spécifique  $J_1$  (débit massique par  $m^2$  de membrane) d'eau osmosée produite est proportionnel à la différence entre la pression appliquée  $P$  et la pression osmotique  $\pi$  de la solution concentrée.

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

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

$J_2 = B \times \pi C$ , où  $B$  est le coefficient de perméabilité vis-à-vis du sel. [42]



**Figure I.7 : Eléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse**

Le dessalement par osmose inverse nécessite d'abord un pré-traitement très poussé de l'eau de mer pour éviter le dépôt de matières en suspension sur les membranes qui conduirait très rapidement à une diminution des débits produits.

Il est nécessaire de retenir toutes les particules de dimension supérieure à 10 à 50  $\mu m$  selon le type de module d'osmose inverse. Ceci est réalisé à l'aide d'une préfiltration grossière puis d'une filtration sur sable pour éliminer les matières en suspension les plus grosses. Puis un traitement biocide et une acidification sont nécessaires pour éviter le développement de microorganismes sur la membrane et éviter la précipitation de carbonates. Enfin une filtration sur cartouches permet de retenir les particules de taille de l'ordre de quelques dizaines de  $\mu m$  qui n'ont pas été retenues par le filtre à sable.

La pompe haute pression permet ensuite d'injecter l'eau de mer dans le module d'osmose inverse dans lequel se trouvent les membranes.

De plus, un deuxième phénomène intervient lors de l'osmose inverse, il s'agit de la polarisation de concentration de la membrane. En effet, au cours du temps, la concentration de la solution salée augmente puisque la majorité des molécules sont retenues d'un seul côté de la membrane. De ce fait, la pression osmotique augmente également près de la couche limite, avec des risques de précipitation des composés à faible produit de solubilité. Pour un même rendement, la pression à appliquer est donc plus élevée. Pour éviter ce phénomène on balaye la membrane du côté de la solution salée par un flux d'eau continu. Toute l'eau n'est pas filtrée, une partie sert à nettoyer la membrane. Ce procédé est donc semblable à une filtration tangentielle. L'eau non filtrée est appelée retentât tandis que l'eau qui a traversé la membrane est appelée perméat.

Afin de limiter la consommation d'énergie du procédé, on peut placer sur le circuit du retentât une turbine qui permet de récupérer une partie de l'énergie contenue dans ce fluide sous haute pression. [42]

#### **I.3.3.2.2 L'électrodialyse :**

L' électrodialyse est un procédé qui utilise la mobilité des ions d'un électrolyte soumis à un champ électrique, le dessalement étant assuré par des membranes qui éliminent sélectivement les sels, ce qui permet d'obtenir de l'eau douce. L'ED a été introduit sur le marché au début des années 1960. L'unité ED de base se compose de plusieurs centaines de cellules reliées entre elles par des électrodes à un bloc extérieur qui constitue la pile. L'eau d'alimentation est distribuée à travers toutes les cellules. Certains flux vont alors s'appauvrir en sel, tandis que d'autres vont au contraire s'enrichir, compte tenu du caractère sélectif des membranes. Des additifs peuvent être mélangés à l'alimentation pour réduire l'entartrage. [43]

#### **Description du procédé :**

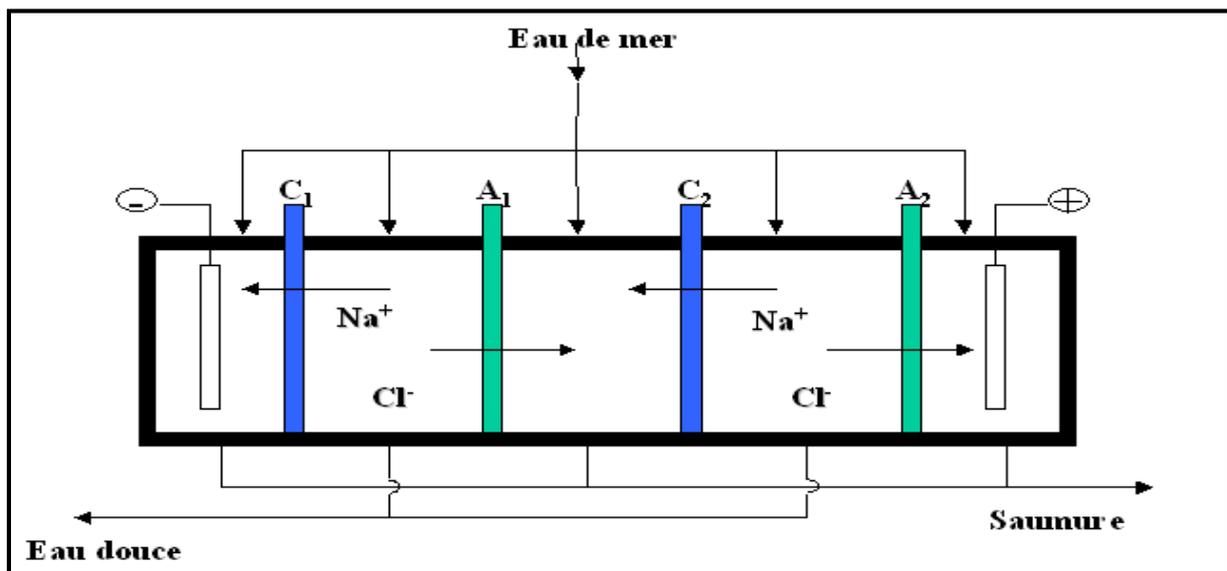
L'extraction des ions se fait par migration des ions à travers des membranes sélectives (anioniques ou cationiques) sous l'action d'un champ électrique. Ainsi seuls les anions peuvent traverser une membrane anionique et seuls les cations peuvent traverser une membrane cationique. En plaçant plusieurs membranes en parallèle laissant passer alternativement les ions positifs et les ions négatifs, on peut éliminer certains ions de l'eau. Dans certains compartiments il y a concentration des ions et dans d'autres les ions sont éliminés. Les particules qui ne portent pas de charge électrique ne sont pas éliminées. [44]

**Application au dessalement :**

L'électrodialyse est utilisée pour le dessalement d'eau de mer. Sur le schéma ci-dessous vous est présenté le fonctionnement d'une unité en parallèle de dessalement. En fin de chaîne de traitement l'on récupère à la fois de l'eau douce et du saumure. Il existe également des unités en série et d'autres modèles de système d'électrodialyse. [44]

**Principe de fonctionnement :**

Sous l'effet d'un courant appliqué dans les bacs externes les ions  $\text{Na}^+$  sont attirés vers l'électrode négative et les ions  $\text{Cl}^-$  vers l'électrode positive. En raison de la sélectivité des membranes ; c'est à dire les ions  $\text{Na}^+$  peuvent uniquement traverser les membranes cathodiques et les ions  $\text{Cl}^-$  les membranes anioniques, on obtient de l'eau douce dans deux des quatre compartiments.



**Figure I.8 : principe de fonctionnement d'électrodialyse**

Les membranes cationiques sont constituées de polystyrène sulfonaté, tandis que les membranes anioniques sont constituées de polystyrène avec des ammoniums quaternaires. Parfois il est nécessaire d'effectuer un prétraitement avant l'électrodialyse. Les solides en suspension avec un diamètre supérieur à 10 mm doivent être éliminés, sinon ils risquent de boucher les pores de la membrane. Il y a aussi des substances qui sont capables de neutraliser la membrane, comme par exemple les anions organiques de grande taille, les colloïdes, les oxydes de fer et de manganèse. Ils perturbent l'effet sélectif de la membrane.

Les méthodes de prétraitement, qui aide à empêcher ces effets sont la filtration sur charbon actif (pour la matière organique), la floculation (pour les colloïdes) et les différentes techniques de filtration. [44]

### **I.3.4 Les problèmes techniques rencontrent en dessalement :**

Les problèmes rencontrés dans les différents procédés de dessalement sont principalement liés à l'utilisation de solutions 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.

#### **I.3.4.1 La corrosion :**

La corrosion des matériaux par l'eau de mer (ou des solutions salines concentrées) est un phénomène important qui conditionne la durée de vie des installations, donc leur coût. Elle dépend d'un certain nombre de facteurs, comme :

- ✚ la teneur élevée en chlorures la teneur en oxygène dissous la présence de  $H_2S$
- ✚ la présence de particules solides, de bactéries, d'organismes marins (algues)
- ✚ la conductivité.

Cette dernière, très élevée en eau de mer, peut conduire à des effets galvaniques si les matériaux ne sont pas judicieusement choisis. L'utilisation dans le circuit haute pression d'osmose inverse d'aciers austénitiques ou ferritiques voire de titane (coût élevé) est recommandé malgré des surcoûts importants. Il en est de même pour les évaporateurs dans lesquels circulent de l'eau de mer à haute température.

La production d'eaux trop agressives par distillation ou par osmose inverse implique une remise à l'équilibre de ces eaux avant injection dans les réseaux d'eau potable et parfois une reminéralisations lorsque la teneur en sels dissous est insuffisante. Dans le premier cas une simple neutralisation peut être suffisante par exemple à la chaux ou la soude, mais dans le second l'ajout de chaux doit être combiné à celui de gaz carbonique. [45]

### I.3.4.2 L'entartrage :

L'entartrage correspond à la formation d'un dépôt de sels minéraux. C'est un phénomène qui se produit sur les surfaces d'échanges aussi bien thermiques que membranaires qui sont des zones de concentration ionique élevée. L'entartrage est lié à la formation de solides amorphes ou cristallisés qui est fonction de la température (diminution de la solubilité quand la température augmente) et de la composition de l'eau.

La formation de tartre doit être évitée pour maintenir un fonctionnement correct des installations. Une première solution consiste à jouer sur le procédé même : apport d'énergie calorifique supplémentaire dans le cas des procédés de distillation, application d'une pression supérieure dans celui des procédés membranaires. Une deuxième solution consiste à prétraiter l'eau par :

- ✚ l'ajout d'acide qui induit une décarbonatation du milieu par dégazage du gaz carbonique formé à partir des hydrogénocarbonates.
- ✚ l'ajout de chaux et de germes de cristallisation qui favorise la précipitation du carbonate de calcium.
- ✚ l'emploi d'inhibiteurs d'entartrage : poly phosphate, organophosphoré, polymères poly carboxyliques.

Le traitement va dépendre de la nature de la ou des espèces susceptibles de provoquer l'entartrage et du procédé de dessalement utilisé.

Quelle que soit la solution adoptée, elle augmente le coût du dessalement.

### I.3.4.3 Le colmatage :

Les eaux brutes naturelles peuvent également contenir des substances organiques, des microorganismes. En osmose inverse ces organismes qui sont retenus par les membranes peuvent les encrasser et trouver des conditions favorables à leur développement. Elles forment alors un biofilm qui peut conduire au colmatage des membranes. Ce phénomène a des conséquences directes sur la capacité de production des installations et le coût du process.

Comme pour les autres problèmes il est possible de réduire le colmatage par un prétraitement adéquat : dans certains cas une étape de coagulation-floculation suivie d'une filtration sera indispensable. [46]

### **I.3.5 Dessalement en Algérie :**

L'Algérie est un pays qui possède des ressources hydriques limitées pour des raisons climatiques capricieuses, caractérisé par une pluviométrie irrégulière oscillant entre 100 et 600 mm/an et enregistrant un déficit hydrique estimé à 20% durant les cinq dernières années. Ces faits se sont aggravés par une période exceptionnelle de sécheresse qui dure depuis une vingtaine d'années. La mobilisation des ressources en eau depuis l'indépendance a été axée en premier lieu sur les ressources souterraines. L'accroissement rapide de la demande en eau dans les secteurs de l'irrigation, de l'industrie ainsi que besoins incompressibles de la population ont amené les pouvoirs publics à mobiliser de en plus de ressources superficielles. Pour assurer une alimentation pérenne en eau potable, l'Algérie a choisi de se tourner résolument vers la mer. Ce faisant, notre pays entend profiter au maximum de l'expérience déjà acquise dans d'autres pays. Dans le cas algérien, le dessalement réduit de manière durable les pénuries d'eau car plus de la moitié de la population réside sur la longue bande littorale de 1200 km, théâtre d'un déficit chronique en eau potable. [47]

#### **❖ Le programme national de dessalement d'eau de mer :**

Un important programme d'investissement pour le dessalement d'eau de mer a été alors engagé par le gouvernement afin de faire face à :

- La rareté chronique et grandissante de l'eau notamment à l'ouest du pays,
- La faiblesse durable de la pluviométrie,
- L'importance des objectifs de développement économique et social
- La problématique de sécurisation de l'approvisionnement en eau potable des grandes villes et des localités côtières. [47]

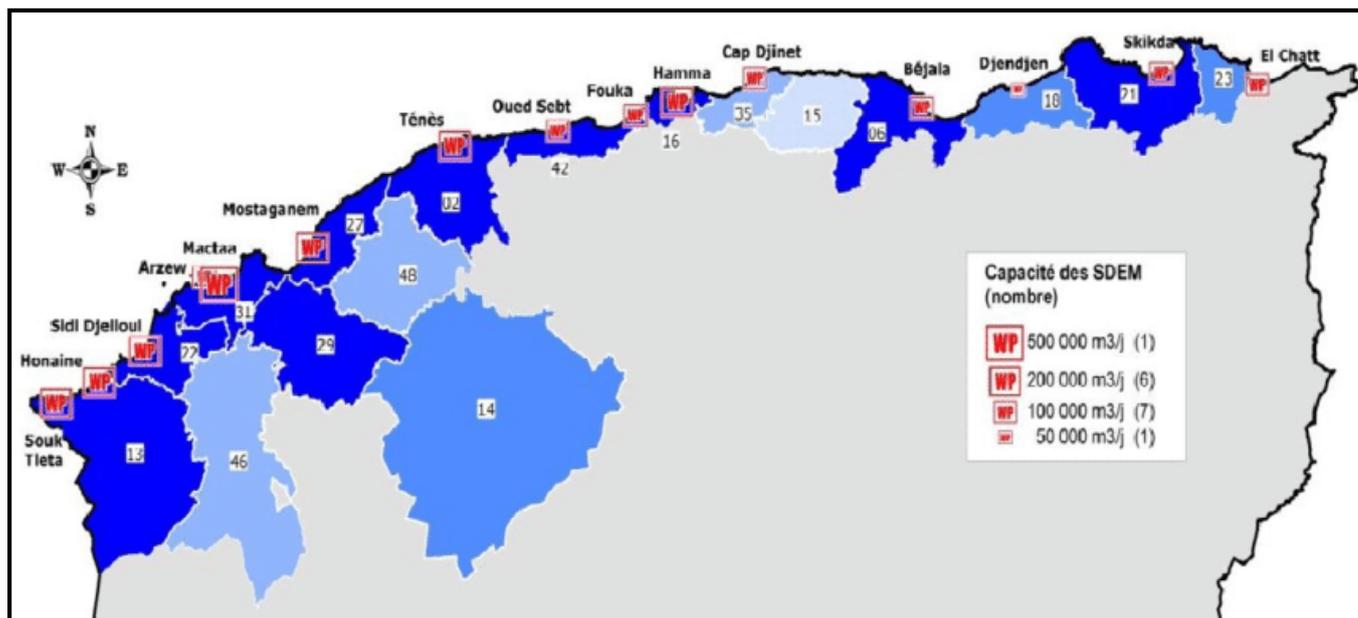


Figure I.9 : Répartition des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie

Le tableau résume les principales stations de dessalement en Algérie dont la capacité dépasse les 80.000 m<sup>3</sup>/Jour :

Tableau I.6 : Stations de dessalement en Algérie.

Stations	capacité	Population à servir
HDW (Alger)	200.000 m <sup>3</sup> /Jour	L'Algérois
ADS (skikda)	100.000 m <sup>3</sup> /Jour	666 660
BWC (Beni saf)	200.000 m <sup>3</sup> /Jour	1333 320
AAS (Tlemcen)	200.000 m <sup>3</sup> /Jour	1333 320
MT (Tipaza)	120.000 m <sup>3</sup> /Jour	-
STMM (Mostaganem)	200.000 m <sup>3</sup> /Jour	1333 320
MBH (Tlemcen)	200.000 m <sup>3</sup> /Jour	1333 320
SDM (cap Djenet)	100.000 m <sup>3</sup> /Jour	666660
TL (Ténes)	200.000 m <sup>3</sup> /Jour	999990
TMMT (Oran)	500.000 m <sup>3</sup> /Jour	1333 320
EL Taref	100.000 m <sup>3</sup> /Jour	-
Oued Sebti (Tipaza)	100.000 m <sup>3</sup> /Jour	-
Bejaia	100.000 m <sup>3</sup> /Jour	-

### I.3.6 Avantages et inconvénients de dessalement en Algérie :

Certes, le dessalement de l'eau de mer, à travers les différentes techniques de dessalement que nous avons passé, amènent une solution aux besoins d'eau douce des pays en situation de déficit hydrique. Néanmoins cette technique de production d'eau potable a des impacts positifs et autres négatifs, c'est ce que nous allons décrire ci-après. [48]

Parmi les impacts dus à une usine de dessalement, il y a ceux qui se limitent à la phase de construction et ceux qui sont liés à la phase d'exploitation. Les impacts commencent avec une transformation de l'occupation du sol, puis continuent avec des conséquences visuelles et des nuisances sonores pour s'étendre à des émissions dans l'atmosphère et des rejets dans l'eau ainsi qu'à des dommages potentiels pour le milieu récepteur. [49]

**Tableau I.7 : Avantages et inconvénients de dessalement en Algérie**

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'Algérie dispose d'un littoral de 1200 km.</li> <li>▪ L'utilisation de l'eau de mer qui est une ressource pratiquement non polluante et inépuisable.</li> <li>▪ La population ainsi que l'industrie à grande consommation d'eau se trouvent à proximité de la mer.</li> <li>▪ Le domaine de dessalement de l'eau de mer a connu ces dernières années une avancée technologique remarquable grâce au développement de différents procédés (l'osmose inverse).</li> <li>▪ Une importante demande en eau se situe à proximité de la cote ce qui réduit davantage les prix de revient d'eau.</li> <li>▪ la sécurisation de l'alimentation en eau (potable ou industrie) des différents consommateurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ impact sur l'environnement terrestre</li> <li>▪ besoins énergétiques importants.</li> <li>▪ rejets de saumures concentrées (chaudes dans le cas de la distillation) en mer ou injectées dans le sol.</li> <li>▪ emploi de produits chimiques pour nettoyer les membranes.</li> <li>▪ traces de métaux lourds échappés des installations.</li> <li>▪ bruit généré par les pompes hautes pression et certains systèmes de récupération d'énergie tels que les turbines.</li> <li>▪ émission de gaz à effet de serre sont plus fortes si l'énergie électrique du dessalement est produite à partir de combustibles fossiles.</li> </ul>

- ✚ **L'eutrophisation** : est une forme singulière mais naturelle de pollution de certains écosystèmes aquatiques qui se produit lorsque le milieu reçoit trop de matières nutritives assimilables par les algues et que celles-ci prolifèrent. Les principaux nutriments à l'origine de ce phénomène sont le phosphore (contenu dans les phosphates) et l'azote (contenu dans l'ammonium, les nitrates, et les nitrites) ; et les sels dans la saumure.

# Chapitre II

## Chapitre II

### Partie 1 : L'adsorption

#### II.1.1 Introduction :

Le procédé de séparation par adsorption constitue aujourd'hui un des techniques les plus importants. Son principe repose sur la propriété qu'ont les solides à fixer sur leurs surfaces certaines polluantes, elle est largement utilisée pour la dépollution et la purification dans des domaines très variés, par exemple les industries pétrolières, pétrochimique, chimiques, pharmaceutiques et aux applications environnementales. [50]

#### II.1.2 Définition :

Le phénomène d'adsorption est un phénomène de dépôt de molécules en phase fluide (l'adsorbat) sur une surface solide (l'adsorbant). Tous les constituants d'un mélange ne s'adsorbent pas à la même vitesse et dans les mêmes proportions. Cela entraîne un phénomène de séparation. Depuis le début des années soixante, les procédés de séparation par adsorption sont devenus des opérations industrielles courantes. Ils sont conçus autour d'un ou plusieurs lits fixes de solide adsorbant, aussi appelés colonnes d'adsorption. Ce sont des cylindres remplis de particules de solide adsorbant. Un mélange fluide s'écoule le long de ce lit dans lequel les différents constituants sont séparés. [51]

L'adsorption définit la propriété de certains matériaux de fixer à leur surface des ions ou des molécules de façon plus ou moins réversible. Les médias utilisés ont une structure poreuse leur procurant une grande surface spécifique. Les éléments indésirables sont alors liés de façon chimique et physique aux ports du média de filtration. [52]

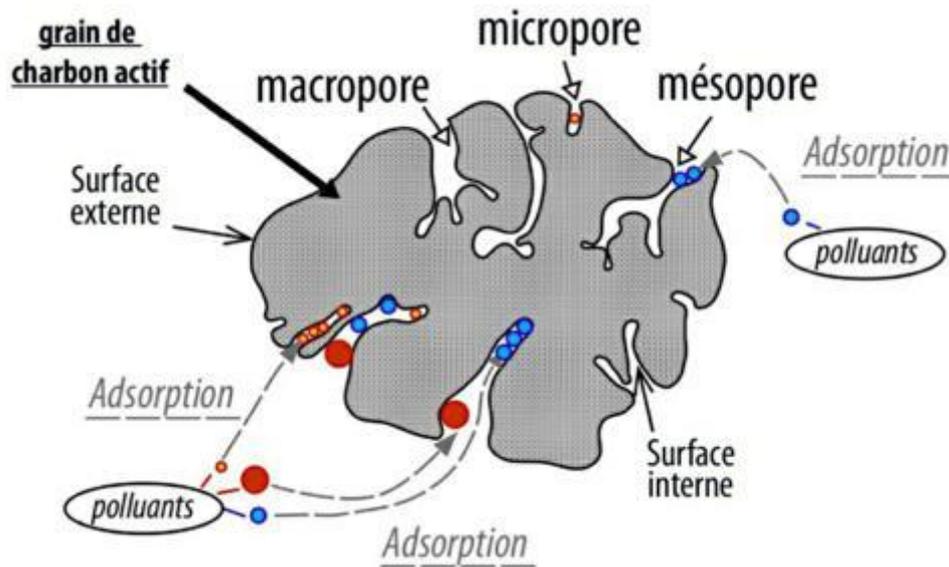


Figure II.1 : Phénomène d'adsorption par le charbon actif

### II.1.3 Les types d'adsorption :

Les interactions entre l'adsorbant et l'adsorbé permettent de définir deux types d'adsorption, à savoir, l'adsorption physique (physisorption) et l'adsorption chimique (chimisorption) qui se distinguent par la chaleur d'adsorption, la vitesse, la réversibilité et la spécificité du processus. [53]

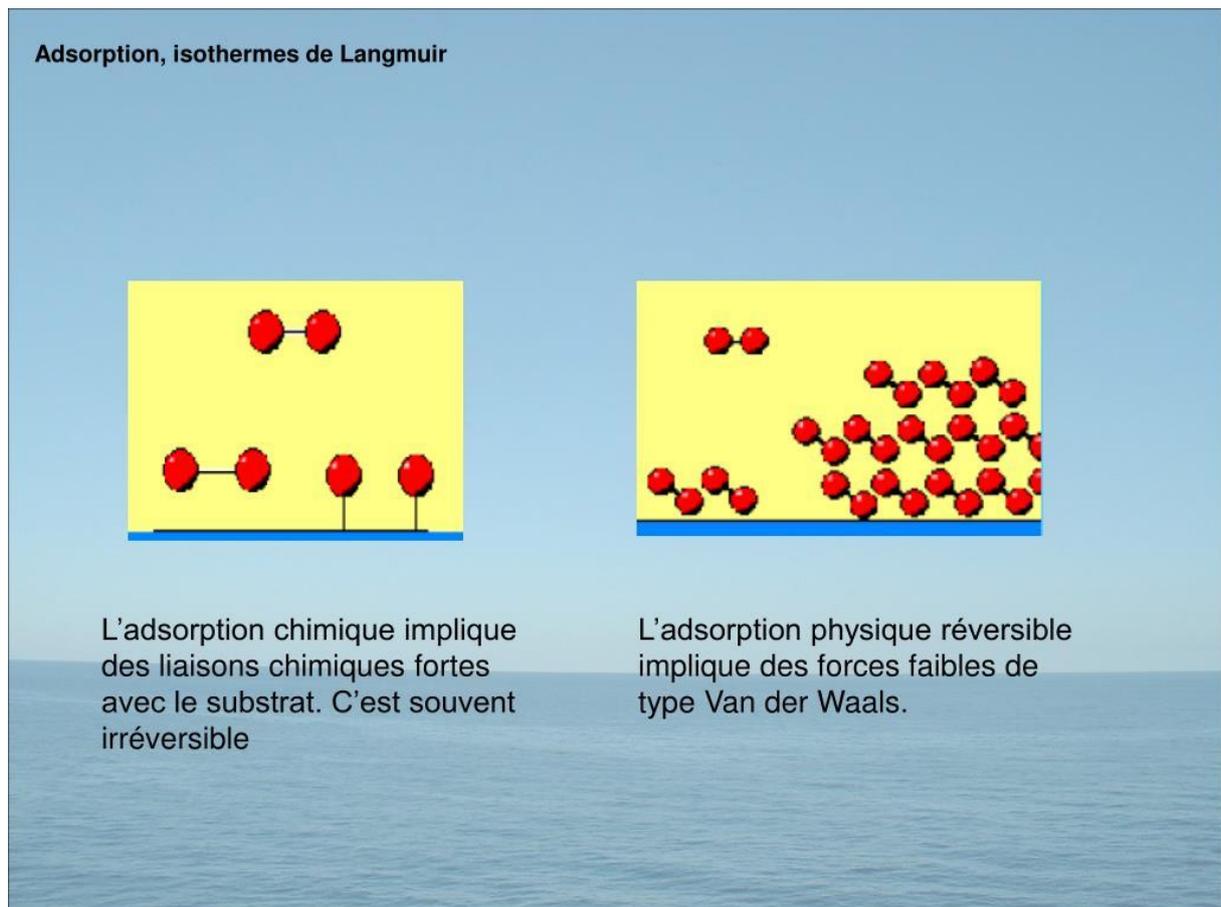
#### II.1.3.1 Adsorption physique :

L'adsorption physique se produit à des températures basses. Les molécules s'adsorbent sur une ou plusieurs couches (multicouches), avec des chaleurs d'adsorption souvent inférieure à 20 kcal/mol. Les interactions entre les molécules du soluté (adsorbé) et la surface du solide (adsorbant) sont assurées par des forces électrostatiques de types dipôles-dipôles, liaison hydrogène ou de van der Waals. La physisorption est rapide, réversible et n'entraîne pas de modification des molécules adsorbées. [54]

#### II.1.3.2 Adsorption chimique :

Ce type d'adsorption est caractérisé par des liaisons adsorbé- adsorbant de type covalentes ou ioniques de fortes intensités impliquant un transfert d'électrons entre l'adsorbé et l'adsorbant semblable aux liaisons chimiques, en conséquence les particules adsorbées se trouvent dans un état nettement différent de leur état initial. Les énergies associées à ces liaisons peuvent être importantes (10 à 100 Kcal /mol). Ce processus nécessitant obligatoirement une

activation appréciable est favorisé par l'accroissement de température à plus de 100 °C. Il est spécifique, irréversible et usuellement exothermique bien qu'il soit possible de rencontrer des cas endothermiques. La cinétique dans ce cas est lente en particulier en dessous de la température d'activation. Dans le cas idéal il se forme une monocouche saturant toutes les valences libres de la surface de l'adsorbant. [55]



**Figure II.2 : Les deux types d'adsorption**

**Tableau II.1 : Principales différences entre deux types d'adsorption. [56]**

Critère de comparaison	Adsorption physique	Adsorption chimique
Nature des interactions	Liaisons faibles de van der Waal	Liaisons chimiques
Chaleur d'adsorption   $\Delta H_{ads}$	<40 KJ/mol	>40 KJ/mol
Activation du processus	Processus non activé	Processus activé
Cinétique du processus	Spontanée	Appréciable
Réversibilité	Complètement réversible	Souvent irréversible
Spécificité	Non spécifique	spécifique
Distance d'équilibre Mol- surface	4 à 6 Å	<3 Å
Nombre de couches adsorbées	Mono-ou poly moléculaire	mono moléculaire
Température du processus	Basse température	Température élevée

### II.1.4 Mécanisme d'adsorption :

A chaque fois qu'un gaz ou un liquide est en contact avec un solide ; celui-ci est retenu par les atomes superficiels du solide et se concentre à sa surface. Ce processus se déroule en trois étapes : [57]

#### II.1.4.1 Diffusion externe :

Elle correspond au transfert du soluté (molécule de la phase liquide) du sein de la solution à la surface externe des particules. Le transfert de la matière externe dépend des conditions hydrodynamiques de l'écoulement d'un fluide dans un lit d'adsorbant ;

#### II.1.4.2 Diffusion interne :

Les particules de fluide pénètrent dans les pores. Elle dépend du gradient de concentration du soluté ;

#### II.1.4.3 Diffusion de surface :

Elle correspond à la fixation des molécules à la surface des pores. Le mécanisme du transport d'un adsorbat au sein d'un grain du solide est donné par la figure ci-dessous

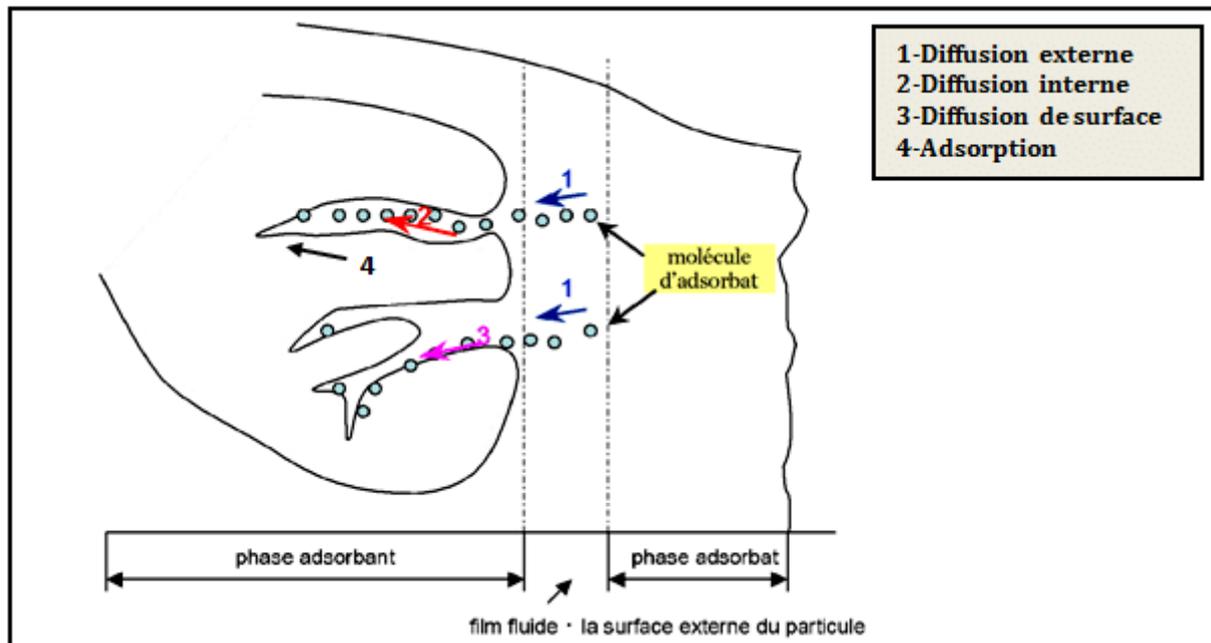


Figure II.3 : Schéma du mécanisme de transport de l'adsorbat au sein du grain.

### II.1.5 Les paramètres influençant l'adsorption :

La capacité d'adsorption d'un matériau dépend d'un nombre important de paramètres dont les principaux sont :

➤ **Température :**

L'adsorption physique s'effectue à de basses températures (phénomène exothermique), alors que l'adsorption chimique demande des températures plus élevées (phénomène endothermique), ce qui nécessite de fixer la température du processus dès le départ. En pratique, il n'y a pas des modifications significatives dans l'intervalle 5 – 20 °C. [58]

➤ **pH :**

Le pH est un facteur important dans toute étude d'adsorption du fait qu'il peut influencer à la fois sur la structure de l'adsorbant, ainsi que le mécanisme d'adsorption, ce facteur dépend de l'origine des eaux à traiter et du procédé de leur traitement. Donc il est judicieux de connaître l'efficacité de l'adsorption à différents pH. Chaque adsorbat a un pH spécifique, l'élimination optimale de la tyrosine sur charbon actif en poudre est observée à des pH acides inférieurs à 6. [59]

➤ **Présence d'espèces compétitives :**

En général la présence de la compétition diminue la capacité de chaque espèce sur l'adsorbant. On étudie l'influence d'alcools aliphatiques sur l'adsorption d'acides aminés (phylalanine et tyrosine) sur charbon actif en poudre, cette étude a montré que les alcools ramifiés provoquent l'inhibition de l'adsorption de ces acides aminés de l'ordre de 85 %. [60]

➤ **Surface spécifique :**

Plus la surface spécifique est grande, plus on aura une meilleure adsorption, ceci a été montré dans l'étude d'adsorption de la tyrosine sur charbon actif.[61]

➤ **Masse d'adsorbant :**

La capacité d'adsorption est d'autant plus grande que la masse de l'adsorbant dans la solution est importante du fait le coût élevé des adsorbants, le choix d'un rapport liquide solide optimal est recommandé. [62]

➤ **Distribution des diamètres des pores :**

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 méso-poreux dans le cas de macromolécules. [63]

➤ **Nature des groupements fonctionnels :**

Bien que les propriétés précédemment situées jouent un rôle primordial dans la capacité d'adsorption, ce sont les groupements fonctionnels présents à la surface de l'adsorbant qui influent principalement sur celle-ci. À la surface des charbons activés. On trouve principalement des sites oxygènes et des sites aminés lors de l'étude de l'adsorption de celui-ci sur des charbons de nature basique sont plus importants que sur des charbons de nature acide. [64]

➤ **Solution d'adsorbant :**

La solubilité d'un adsorbant joue un rôle important lors de son adsorption, plus la solubilité est grande, l'adsorption sera plus faible. Certains auteurs ont comparé l'adsorption de l'acide 4-hydroxy benzoïque (solubilité = 5 g/l<sup>-1</sup> 25 °C) de l'acide syringique (1 g/l<sup>-1</sup>). Et de l'acide gallique (15 g. l<sup>-1</sup>). Il constate que les capacités d'adsorption suivent l'ordre inverse des solubilités. [65]

➤ **Polarité :**

Un soluté polaire aura plus d'affinités pour un solvant ou pour l'adsorbant polaire. Il faut que l'adsorbant et l'adsorbant soient de polarité voisine. [65]

➤ **Structure moléculaire de l'adsorbat :**

Plus la structure moléculaire des particules à fixer est grande, plus le remplissage des pores s'effectuent rapidement et la saturation est atteinte avec des rendements faibles, ce qui fait diminuer le nombre des sites libres pour les autres molécules. [66]

### II.1.6 Isothermes d'adsorption :

En réalité aucune modélisation si complexe, soit elle, ne permet de couvrir l'ensemble de l'isotherme et encore moins d'expliquer les mécanismes d'adsorption, pour la seule raison que toute surface est physiquement et énergétiquement hétérogène.

De nombreux auteurs ont proposé des modèles théoriques et/ou empiriques pour décrire la relation entre la quantité de l'adsorbat fixée par unité de masse de l'adsorbant et la concentration de l'adsorbat à l'équilibre d'adsorption. Les modèles les plus utilisés dans l'étude de l'adsorption solide-liquide sont : le modèle de Langmuir et le modèle de Freundlich. Il s'agit de relations empiriques non cinétiques appelées souvent isothermes. [67]

#### II.1.6.1 Isotherme de Langmuir :

Ce modèle proposé en 1918 repose sur les hypothèses suivantes :

- La surface est énergétiquement homogène
- Une seule entité est adsorbée par site
- L'activité à un site donné n'affecte pas l'activité des sites adjacents
- Les molécules adsorbées ne réagissent pas entre elles
- L'adsorption se fait en une seule couche complètement saturée et l'adsorbant présente une capacité d'adsorption limitée ( $q_m$ ). [68]

L'isotherme de Langmuir est décrite par la relation suivante :

$$Q_e = Q_m \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \text{équation 1}$$

✚  $Q_m$  : capacité maximale d'adsorption (mg/g).

✚  $K_L$  : constante d'équilibre de Langmuir (l/mg)

Dans le cas d'une faible quantité de soluté adsorbé, le terme ( $K_L C_e$ ) peut être très inférieur à 1 et il est alors négligé. La relation de LANGMUIR se réduit alors à une relation

directe entre la capacité d'adsorption et la concentration à l'équilibre de l'adsorbat en phase liquide : [69]

$$Q_e = Q_m K_L C_e \quad \text{équation 2}$$

Dans le cas d'une forte quantité de soluté adsorbée, le terme  $(K_L \cdot C_e)$  devient largement supérieur à 1. Cela implique tend vers  $q_m$ . La linéarisation de l'équation (1) conduit à l'équation suivante : [70]

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{Q_m K_L} \frac{1}{C_e} \quad \text{équation 3}$$

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

**$Q_m$**  : Quantité d'adsorbat nécessaire couvrir la première couche de l'adsorbant (mg/g).

**$K_L$**  : Constante d'équilibre caractéristique de l'adsorbant, dépendant de la température et des conditions expérimentales (l/mg).

Le rapport  $R_L$  comme une grandeur sans unité indiquant si l'adsorption d'autant plus favorable que  $R_L$  tend vers zéro  $R_L (R_L \rightarrow 0)$  et d'autant plus défavorable que  $R_L$  tend vers 1 ( $R_L \rightarrow 1$ )

Définit par :

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_e} \quad \text{équation 4}$$

Où :

**$K_L$**  : constante de Langmuir et  $0$  est la concentration initiale maximale de l'adsorbat. (mg/l).

Le modèle de Langmuir est représenté par les relations suivantes :

**Tableau II.2 : Expressions mathématiques du modèle de Langmuir**

<b>Isotherme</b>	<b>Expression non linéaire</b>	<b>Expression linéaire</b>	<b>Trace</b>
<b>Langmuir 1</b>	$Q_e / Q_m = \theta = K_l C_e / (1 + K_l C_e)$	$1/Q_e = (1/C_e) (1/Q_m K_l) + 1/Q_m$	1/Q <sub>e</sub> vs. 1/C <sub>e</sub>
<b>Langmuir 2</b>	$Q_e/Q_m = \theta = K_l C_e / (1 + K_l C_e)$	$C_e/Q_e = C_e / Q_m + 1/ Q_m K_l$	C <sub>e</sub> /Q <sub>e</sub> Vs .C <sub>e</sub>

**K<sub>l</sub>** : Constante de Langmuir en l/mg ou l/mol.

**Q<sub>m</sub>** : Capacité d'adsorption maximale en mg/g.

Donc on peut représenter les expressions linéaires graphiquement pour avoir les Valeurs de q<sub>m</sub> et K<sub>l</sub>. En traçant 1/ en fonction 1/, la droite représentée à une pente 1/K<sub>l</sub> et une ordonnée à l'origine 1/Q<sub>m</sub> dans le cas de Langmuir 1, mais dans le cas de Langmuir 2 consiste à représenter C<sub>e</sub>/Q<sub>e</sub> en fonction C<sub>e</sub>, la pente est 1/ Q<sub>m</sub> et l'ordonnée à l'origine est 1/Q<sub>m</sub> K<sub>l</sub>.

### II.1.6.2 Isotherme de Freundlich :

Ce modèle proposé en 1926 est l'indicatif d'une surface hétérogène. Contrairement à l'isotherme de Langmuir où les sites sont énergétiquement équivalents, l'isotherme de Freundlich admet la coexistence de sites d'énergies différentes, la possibilité d'interactions entre les particules adsorbées et ne prévoit pas de limites supérieures à l'adsorption. Ce modèle est peu satisfaisant pour des concentrations élevées de solutés mais représente bien l'adsorption des solutions diluées. Il repose sur l'équation empirique suivante : [71]

$$Q_e = K_f C_e^{1/n} \quad \text{équation 5}$$

Où :

**Q<sub>e</sub>** : quantité d'adsorbat adsorbée par gramme de solide à l'équilibre (mg/g).

**C<sub>e</sub>** : concentration d'adsorbat dans la solution à l'équilibre (mg/l).

**Kf** et **n** : constantes de Freundlich, caractéristiques de la solution et de l'adsorbant, déterminées expérimentalement.

Des valeurs élevées de **Kf** et **n** traduisent une forte adsorption des solutés, n'a toujours une valeur supérieure à 1 et est souvent voisine de deux.

La linéarisation par changement d'échelle de la relation de FREUNDLICH conduit à l'équation suivant :

$$\log Q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad \text{équation 6}$$

En portant **log (Qe)** en fonction de **Log Ce**, on obtient une droite de pente (**1/n**) et d'ordonnée à l'origine égale à **log Kf**, d'où on tire les constantes de Freundlich (**Kf**) et **n**.

### II.1.7 Classification des isothermes :

Tous les systèmes adsorbant-adsorbât ne se comportent pas de la même manière. Expérimentalement, on distingue quatre classes principales nommées : S (Sigmoide), L (Langmuir), H (Haute affinité) et C (partition Constante). La figure 13 présente cette classification. Après cette description nous abordons l'interprétation des différentes classes d'isothermes. Nous commençons par la plus fréquente : l'isotherme de Langmuir. [72]

#### 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 Waal, 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.

**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.

**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.

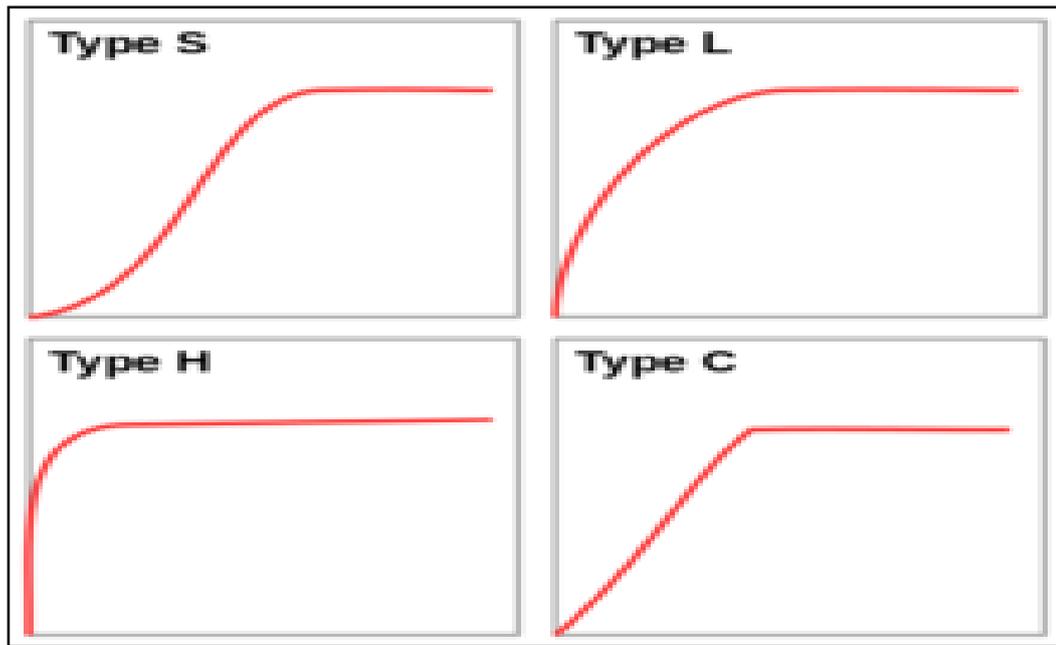


Figure II.4 : Représentation graphique des isothermes d'adsorption en phase.

### II.1.8 Cinétique d'adsorption :

La connaissance de la cinétique d'adsorption dans des opérations fondées sur les phénomènes d'adsorption présente un intérêt pratique considérable pour la mise en œuvre optimale d'un adsorbant ainsi que 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 d'étapes qui déterminent la vitesse globale du processus : [73]

✓ **1ère étape :**

(La diffusion externe) : le transfert des molécules de soluté de la phase liquide externe vers la phase liquide liée à la particule solide (par diffusion et par convection).

✓ **2ème étape :**

(La diffusion interne) : le transfert du soluté à travers le film liquide vers la surface externe de l'adsorbant (caractérisé par le coefficient de transfert  $K_f$ ).

✓ **3ème étape :**

La diffusion de l'adsorbat à l'intérieur de la particule de l'adsorbant sous l'effet du gradient de concentration. La molécule adsorbat peut diffuser d'un site d'adsorption à un autre soit à l'état libre (après désorption) dans la phase liquide intra particulaire (migration

caractérisée par un coefficient de diffusion  $D_f$ ), soit à l'état adsorbé, d'un site d'adsorption vers un site adjacent (migration de surface caractérisée par un coefficient de diffusion  $D$ ).

✓ **4ème étape :**

Lors de l'adsorption ou de la désorption, est principalement dû à une différence de concentration. On peut donc faire varier le taux d'adsorption en faisant varier la concentration de l'adsorbant ou de l'adsorbat. Si le taux de charbon est augmenté dans la matrice, il va adsorber une plus grande quantité de pesticides et de matière organique. De plus, ce phénomène est influencé par de nombreux facteurs, relatifs aux propriétés physicochimiques du charbon, de l'adsorbat et des conditions extérieures. Les phénomènes d'adsorption et de désorption sont instantanés.

### II.1.9 Thermodynamique d'adsorption :

L'étude thermodynamique d'un processus d'adsorption consiste en la détermination des constantes ci-dessous : [74]

✓ **La constante d'équilibre  $K_c$  :**

Exprimée en concentrations, la constante d'équilibre prend la forme suivante :

$$K_c = C_a / C_e \quad \text{équation 7}$$

✚  **$C_a$  :** concentration de l'adsorbat adsorbée à l'équilibre (mg/l).

✚  **$C_e$  :** concentration de l'adsorbat à l'équilibre d'adsorption (mg/l).

✓ **L'enthalpie libre  $\Delta G^\circ$  :**

Le processus d'adsorption est spontané lorsque la valeur de  $\Delta G^\circ$  est négative. Une valeur importante de  $\Delta G^\circ$  reflète une haute affinité entre l'adsorbant et l'adsorbat.

$$\Delta G^\circ \text{ (KJ/mol)} = - RT \ln K_c = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad \text{équation 8}$$

✓ **L'enthalpie  $\Delta H^\circ$  et l'entropie  $\Delta S^\circ$  :**

Ces deux paramètres sont déterminés à partir de la pente et l'ordonnée de la courbe de variation de  $\ln K_c$  en fonction de  $1/T$ .

$$\ln K_c = (\Delta S^\circ / R) - (\Delta H^\circ / RT) \quad \text{équation 9}$$

La valeur de  $\Delta S^\circ$  (KJ/mol) donne une indication sur le degré de liberté de la substance adsorbée à l'interface solide-liquide. La valeur et le signe de

$\Delta H^\circ$  (KJ/mol K) décrivent l'aspect énergétique du processus d'adsorption.

### II.1.10 Domaines d'applications de l'adsorption :

L'adsorption est utilisée pour différentes applications : [75]

- ❖ Le raffinage des produits pétroliers
- ❖ Le séchage, la purification
- ❖ La catalyse
- ❖ La récupération de solvants et d'alcool dans le processus de fermentation
- ❖ La décoloration des liquides
- ❖ La chromatographie gazeuse (la méthode de fractionnement est basée sur les différences de vitesse d'adsorption de substances différentes, sur un adsorbant donné).

## Partie2 : la conductivité

### II.2.1 Définition :

Aptitude d'un matériau ou d'une solution à laisser les charges électriques se déplacer librement, donc à permettre le passage d'un courant électrique.

La conductivité électrique est l'inverse de la résistivité.

Pour les solutions d'électrolytes (ayant des ions en solution), la valeur de la conductivité dépend de la nature des ions présents dans la solution et de leurs concentrations. La conductivité d'une solution peut être mesurée à l'aide d'un conductimètre. [76]

### II.2.2 Comment mesurer la conductivité :

La conductivité se mesure en appliquant un courant électrique alternatif (I) à deux électrodes immergées dans une solution et en mesurant la tension (V) qui en résulte. Lors de

cette expérience, les cations migrent en direction de l'électrode négative, les anions se dirigent vers l'électrode positive et la solution se comporte comme un conducteur électrique. [77]

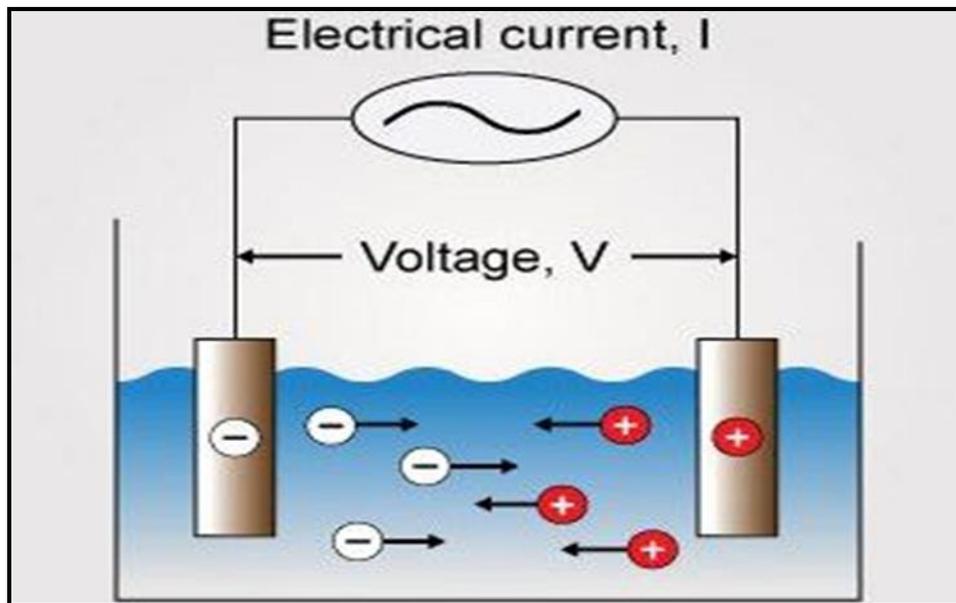


Figure II.5 : Migration des ions en solution

### II.2.3 La solution conductrice :

La conductivité est typiquement mesurée dans des solutions aqueuses d'électrolytes. Les électrolytes sont des substances qui contiennent des ions, c'est-à-dire des solutions de sels ioniques ou de composés qui s'ionisent en solution. Ce sont les ions formés dans la solution qui vont transporter le courant électrique. Les électrolytes, acides, bases et sels, peuvent être soit forts soit faibles. Les solutions les plus conductrices sont les solutions aqueuses puisque l'eau a la capacité de stabiliser les ions formés par un procédé appelé solvatation. [77]

#### ✚ Electrolytes forts :

Les électrolytes forts sont des substances qui sont entièrement ionisées en solution. Il en résulte que la concentration des ions en solution est proportionnelle à la concentration de l'électrolyte ajouté. Ils comprennent les solides ioniques et les acides forts, par exemple HCl.

Les solutions d'électrolytes forts sont conductrices car les ions positifs et négatifs peuvent migrer de manière très indépendante sous l'influence d'un champ électrique.

**✚ Electrolytes faibles :**

Les électrolytes faibles sont des substances qui ne sont pas entièrement ionisées en solution. Par exemple, l'acide acétique se dissocie partiellement en ions acétate et en ions hydrogène. Une solution d'acide acétique va donc contenir à la fois la molécule et les ions. Une solution d'électrolyte faible ne va pas aussi bien conduire l'électricité qu'un électrolyte fort. Ceci s'explique par le fait qu'il y a moins d'ions présents dans la solution pour transporter les charges d'une électrode à l'autre.

**II.2.4 La conductimètre :**

Appareil de mesure de la conductivité d'une solution. Il est composé d'un générateur basse fréquence (courant alternatif), d'un ampèremètre et d'un voltmètre. Cette technique a été développée par Friedrich Kohlrausch en 1874 (Loi de Kohlrausch). [76]



**Figure II.6 : La conductimètre**

# Chapitre III

## Chapitre III

### Partie 1 : Généralité sur l'adsorbant

#### III.1.1 Historique :

Les premiers adsorbants utilisés il y a plusieurs siècles, furent les argiles et terres colorantes, puis à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle furent développés les charbons actifs. La première guerre mondiale vit apparaître les gels de silice, puis dans les années 1939- 1940, les alumines activées. Ils sont caractérisés essentiellement par leur surface spécifique plus ou moins grande, celle -ci détermine la capacité d'adsorption qui n'est autre que la quantité de substance fixée par unité de masse du solide. Elle est liée à sa granulométrie et à sa porosité. Ainsi, les distributions de taille des grains et des pores sont des propriétés importantes. [78]

#### III.1.2 Définition :

Les adsorbants sont des solides microporeux présentant des surfaces par unité de masse importantes (de 100 m<sup>2</sup>/g jusqu'à ou plus de 1000 m<sup>2</sup>/g). Ils sont des solides poreux se présentant sous forme de granulés, de poudre. Il y a grand nombres des adsorbants, certain ont une origine organique comme les charbons actifs..., et d'autres sont d'origine minérale telles que les argiles, les gels de silice et des adsorbants à base de polymère. Dans l'industrie on distingue cinq types d'adsorbants principaux : les charbons actifs, les argiles, les zéolithes, les gels de silices, et les alumines activées qui sont caractérisés par un certain nombre de propriétés physiques. [79]

#### III.1.3 Principaux types d'adsorbant :

En traitement des eaux, on utilise presque exclusivement le charbon activé comme adsorbant. Toutes proportions gardées, c'est un matériau économique qui permet d'éliminer une grande quantité de polluants. Autre que le charbon actif il existe d'autres types d'adsorbant utilisés en industrie, On cite les Zéolites, les alumines activées, les argiles et le gel de silice.

Tableau III.1 : Les différents types d'adsorbant

Types d'adsorbants	Caractéristiques	
	Origine (précurseur)	Méthodes d'obtention et principales caractéristiques
<b>Les charbons actifs</b>	Charbon ou matériaux végétal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Préparés par pyrolyse.</li> <li>- Plusieurs centaines de qualités suivant le précurseur et les conditions de traitement.</li> </ul>
<b>Les zéolites</b>	Aluminosilicates cristallisés microporeux de formule globale $(AlO_2 M_n SiO_2)$ (M est un métal ou alcalinoterreux, $\geq 1$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cristaux de synthèse</li> <li>- plus de 100 espèces différentes par la valeur de n et la structure cristallographique</li> </ul>
<b>Les alumines activées</b>	$Al_2 O_3, 5 H_2O$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produit de synthèse</li> <li>- Surface couverte de groupements Al OH</li> <li>- Adsorption préférentielle par liaison hydrogène</li> <li>- Adsorbant amorphes, Moyennement polaire et hydrophiles.</li> <li>- Surface spécifique 150 à 300 m<sup>2</sup>/g.</li> </ul>
<b>Les gels de silice</b>	$(SiO_2)_n, (H_2O)_x$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procédés hydrothermal (formation du <math>[Si(OH)_4]</math> puis Polycondensation progressive).</li> <li>- Surface couverte de groupements Si OH.</li> <li>- Adsorption préférentielle par liaison hydrogène.</li> <li>- Surface spécifique 350 à 800 m<sup>2</sup>/g</li> </ul>
<b>Le noir animal</b>	Os d'animaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carbonisation en absence d'air.</li> <li>- Surface spécifique de l'ordre de 120m<sup>2</sup>/g</li> </ul>
<b>Les argiles activées</b>	Des aluminosilicates de formule brute proche des zéolithes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Produits naturels, utilisés surtout pour le séchage.</li> <li>- Structure cristalline différente de celle des zéolithes.</li> </ul>

### III.1.4 Critères de la bonne qualité de l'adsorbant :

Les adsorbants utilisés dans divers traitements doivent avoir les qualités suivantes :[80]

- ✚ Haute capacité d'adsorption
- ✚ Grande efficacité pour adsorption
- ✚ Sélectivité élevée
- ✚ Aptitude à être facilement régénérée et utilisées de nouveau
- ✚ Prix peut élever.

## Partie 2 : Charbon actif

### III.2.1 Définition :

Les charbons actifs comptent parmi les plus importants et les plus anciens des adsorbants fabriqués et exploités par l'Homme. Dans l'Ancienne Egypte, par exemple, ces matériaux étaient employés sous forme de charbon de bois pour la purification de l'eau et c'est à partir du 18ème siècle que les propriétés adsorbants (adsorption d'odeurs et décoloration des liquides) des charbons actifs ont véritablement été découvertes. Au cours des siècles suivants, d'importants progrès concernant leur élaboration ont été réalisés et le procédé d'activation a été mis au point. Il n'a cessé d'être amélioré afin d'augmenter les capacités d'adsorption de ces matériaux. [81]

Les charbons actifs commerciaux sont produits à partir de précurseurs hydrogénocarbonés très variés et disponibles sous différentes formes : 55% de la production totale est sous forme pulvérulente (poudre), 35% sous forme granulaire et 10% sous forme de bâtonnets. D'après Bansal, 80% de la production totale de charbons actifs est utilisée pour des applications en adsorption liquide (décoloration et dépollution des rejets industriels, traitement de l'eau potable et industrielle) et 20% pour des applications en adsorption gazeuse (décoloration, purification de l'air, purification et séparation des gaz, applications militaires pour la protection contre les gaz chimiques). [81]

Les charbons actifs ont la capacité d'adsorber la plupart des molécules organiques. Par exemple, les composés aromatiques et les hydrocarbures substitués sont fortement adsorbés. En revanche, les molécules organiques légères sont faiblement adsorbées, en particulier celles qui contiennent moins de trois atomes de carbones (comme par exemple les alcools simples). Les

carbones activés sont également très employés dans l'adsorption des cations ; des gaz et des vapeurs organiques. [82]



**Figure III.1 : Charbon actif**

### **III.2.2 L'origine de charbon :**

La fabrication du charbon passe nécessairement par l'identification et le choix de la matière première, les matières premières peuvent être obtenues à partir d'un grand nombre de matériaux contenant le carbone d'origine végétale ; animal ou minérale. [83]

#### **a. Origine végétal :**

Il existe une multitude de produits d'origine végétale qui peuvent intervenir dans la synthèse des charbons actifs et sous différentes formes variées :

Déchets agricoles non utilisables exemple : noyaux de fruit, coque de noix de coco, bagasse de canne à sucre. Paille et enveloppes de céréales exemple : blé et riz.

Arbre sous forme de copeaux ou de sciure de bois exemple : bouleau, chêne, eucalyptus, lignite.

**b. Origine animal :**

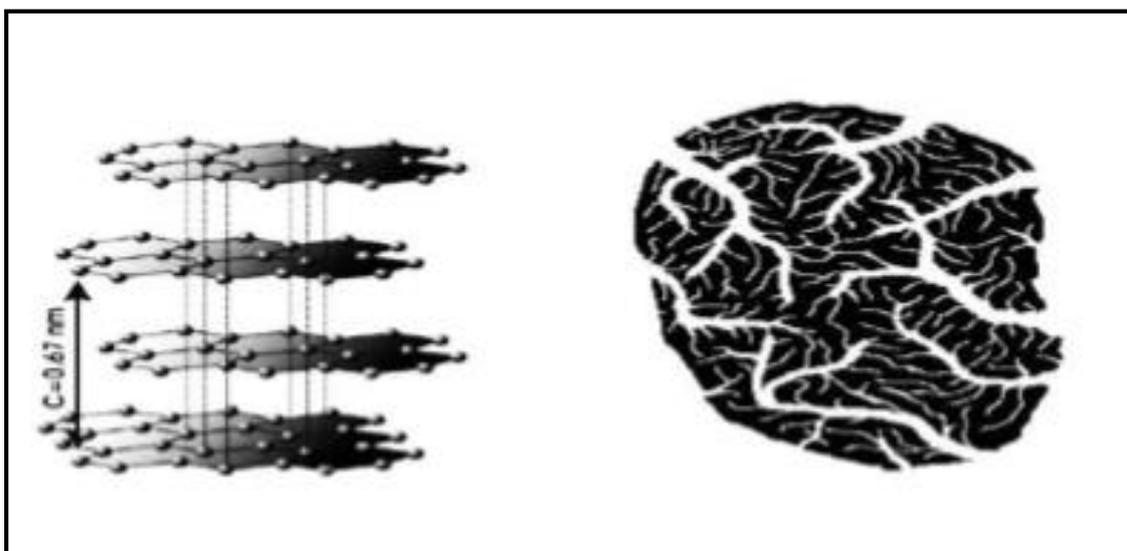
Les charbons sont essentiellement obtenus à partir d'ossements d'animaux, mais aussi à partir de leur sang voire de leur chair.

**c. Origine minérale :**

Les charbons sont obtenus en grande majorité à partir de matériaux combustibles comme le charbon minéral (houille, coke) ou la tourbe.

**III.2.3 Structure du charbon actif :**

La structure et la nature chimique d'un charbon activé, évoluent au long des processus de carbonisation et d'activation. Les processus de polymérisation et de polycondensation débutent vers 400 °C, avec une augmentation de la teneur en carbone sous la forme de cycles aromatiques condensés. La montée de température, facilite le réarrangement de la matière organique, et conduit à une structure poreuse. Ce qui provoque une compression sur les parois des différents pores, et par conséquent diminue leur volume. Au-delà de 1000 °C, on aboutit à une structure cristalline du type graphitique. En revanche l'ordre dans lequel les feuillets sont arrangés, est moins parfait que dans le cas du graphite. Cette structure finale, turbostratique, est appelée « noir de carbone ». [84]



**Figure III.2 : structure du charbon actif**

### III.2.4 Préparation du charbon actif :

Le charbon actif ou charbon activé, c'est tout charbon ayant subi une préparation particulière et qui, de ce fait, possède à un haut degré la propriété d'adsorber des fluides amenés à son contact. Il s'agit d'une structure amorphe composée principalement d'atomes de carbone, généralement obtenue après une étape de carbonisation à haute température et présentant une très grande surface spécifique qui lui confère un fort pouvoir adsorbant. Il se caractérise aussi par sa thermo stabilité. [85]

Le processus de fabrication de ces adsorbants comporte deux grandes étapes : la carbonisation et l'activation Il existe deux procédés d'activation qui sont l'activation physique et l'activation chimique. Cette dernière, notent permet d'obtenir un meilleur rendement, une plus grande surface spécifique et un meilleur développement de la structure poreuse du charbon. [86]

#### III.2.4.1 Phase carbonisation :

La carbonisation est la décomposition thermique des matières carbonées elle consiste à éliminer les matières volatiles par voie thermique. Cette étape s'effectue à des températures inférieures (500-700°C) et sous un courant continu d'un gaz inerte (absence d'oxygène) en présence de catalyseurs d'oxydation : acide phosphorique, acide sulfurique, sulfure de potassium, chlorure de zinc (interdit pour les applications agroalimentaires), sels de cuivre, potasse... Ces agents chimiques favorisent la déshydratation pendant 5 à 6 heures. [87]

#### III.2.4.2 Phase d'activation :

L'activation assure un meilleur développement de la surface spécifique et de la structure poreuse obtenue à l'étape de carbonisation. Elle est réalisée à l'aide d'agents oxydants physiques ou chimiques. Le procédé d'activation qui utilise la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone ou l'oxygène correspond à la méthode physique. Elle consiste en une gazéification du matériau carbonisé au moyen du dioxyde de carbone, de la vapeur d'eau. La nature de l'agent d'activation influence la distribution poreuse du matériau par exemple, l'utilisation du dioxyde de carbone comme agent oxydant, favorise le développement de la microporosité alors que la vapeur d'eau favorise une porosité aux dimensions plus larges, et la formation des groupements fonctionnels de surface généralement oxydés qui sont à l'origine des interactions entre le solide et les molécules adsorbées.

En générale l'activation physique a été opérée à une température élevée et à un temps d'activation très long. Par ailleurs, lors de l'activation chimique, la carbonisation et l'activation sont réalisées simultanément. L'utilisation d'agents oxydants (tels que l'acide phosphorique ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), le chlorure de Zinc ( $\text{ZnCl}_2$ ) ou l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) influe sur la décomposition pyrolytique, en jouant le rôle d'agent déshydratant. Les conditions d'activation (température, durée, agent d'activation) influent fortement la structure du produit final. En effet, les agents oxydants chimiques inhibent la formation de goudron et la production de composés volatils (méthanol, acide acétique, etc...), conduisant ainsi à un meilleur rendement.

Dans l'activation chimique la carbonisation et l'activation sont normalement réalisées à des températures plus basses. La figure 16 représente le processus de la production du charbon actif. Le produit qui va résulter est un produit possédant un ensemble de paramètres au niveau de sa texture (surface spécifique et porosité) et également au niveau des groupements fonctionnels (Types de fonctions organiques présents à la surface). Ils sont essentiels dans le processus d'adsorption. [87]

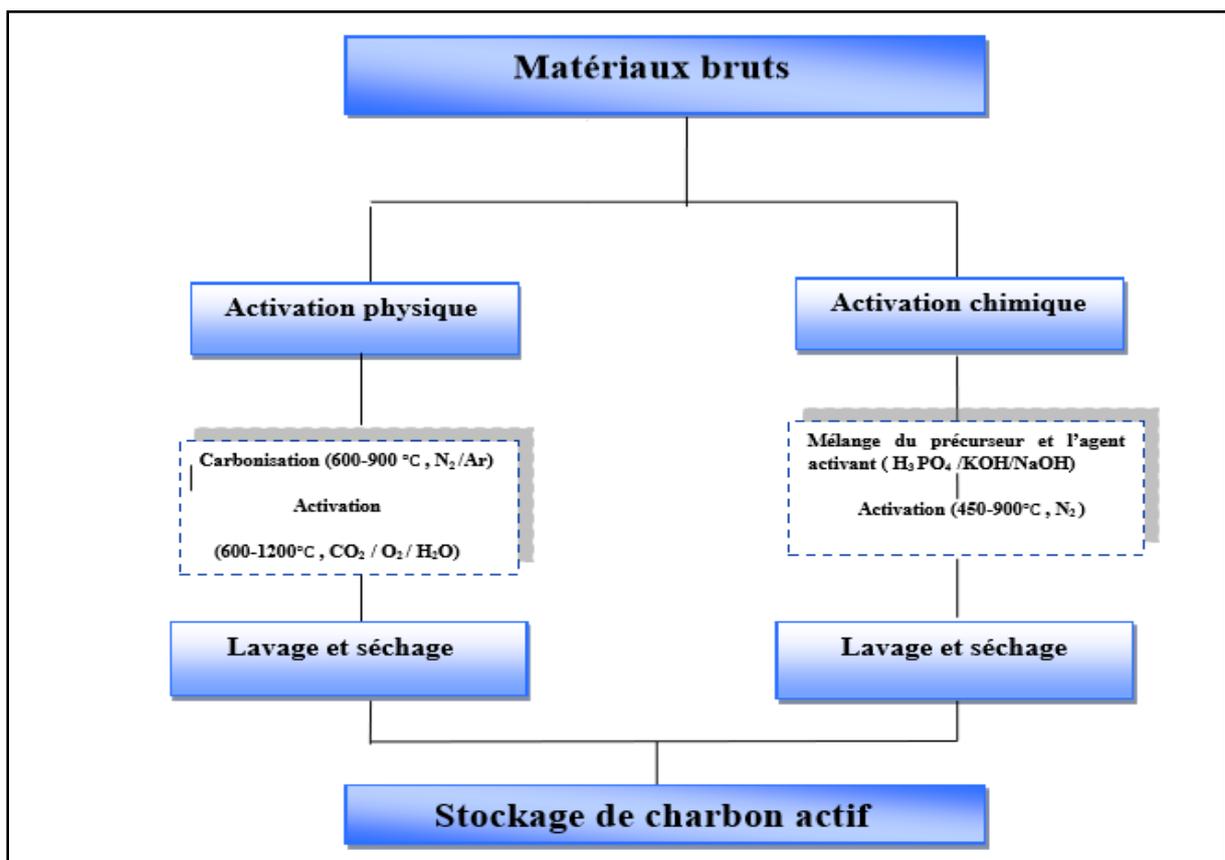


Figure III.3 : Diagramme schématisé de processus de la production de charbon actif

**a. Activation physique :**

L'activation physique consiste en une oxydation du charbon à haute température (800 à 1000°C) à l'aide d'un agent faiblement oxydant pendant 24 à 72 heures. Les réactifs gazeux principalement utilisés sont l'air, la vapeur d'eau ainsi que le dioxyde de carbone. Tous ces gaz peuvent être employés seuls ou en mélange. Dans ce processus, les matières désorganisées carbonées obstruant les pores sont éliminées par la réaction suivante :



Le contrôle de la température est un paramètre important car au-dessus de 1000°C, la réaction engendre une dégradation du matériau. En revanche, en dessous de 800°C la réaction est trop lente ou incomplète et donc économiquement inintéressante. Généralement, les charbons actifs produits par cette activation physique présentent une structure poreuse fine. [86]

**b. Activation chimique :**

Contrairement à l'activation physique, l'activation chimique est classiquement réalisée simultanément avec l'étape de carbonisation en présence de catalyseurs d'oxydation tels que l'acide phosphorique, l'acide sulfurique, le sulfure de potassium, le chlorure de zinc, des sels de cuivre ou la potasse. Le matériau brut est imprégné d'un de ces agents chimiques puis chauffé sous atmosphère inerte entre 400°C et 600°C. La réorganisation structurale permet de développer une microporosité et une méso porosité par élargissement du diamètre des pores. Les revues portant sur cette voie d'activation montrent que la taille des pores dans le charbon actif final est déterminée par le degré d'imprégnation : plus celui-ci est élevé, plus le diamètre des pores est grand. De plus, ces charbons actifs présentent une structure poreuse ouverte (les pores débouchent à la surface du grain), idéale pour l'adsorption de grosses molécules. Néanmoins, les charbons activés chimiquement gardent généralement des traces de l'agent responsable de l'oxydation de surface (phosphore, soufre, zinc, cuivre, potassium). [88]

### III.2.5 Différentes formes de charbon actif :

Les différentes formes du charbon actif selon leurs applications, les charbons actifs sont disponibles soit en poudre, soit sous forme de fibres. [89]

#### III.2.5.1 Charbon actif en poudre :

Les charbons actifs en poudre présentent une granulométrie inférieure à 100  $\mu\text{m}$ , avec un diamètre moyen situé entre 15 et 25  $\mu\text{m}$ . Ils ont une surface externe et une faible profondeur de diffusion. Ce qui engendre une vitesse d'adsorption très rapide. [90]



Figure III.4 : Charbon actif en poudre (CAP)

#### III.2.5.2 Charbon actif en grain :

La forme granulaire du charbon actif, est caractérisée par une taille de particule supérieure à 1 mm, un faible diamètre de pores, une grande surface interne et une surface externe relativement faible. Il en résulte que les phénomènes de diffusion à l'intérieur des pores prennent une grande importance dans les processus d'adsorption. Ces charbons sont préférentiellement utilisés en lit fixe pour l'adsorption des gaz et vapeurs, ils sont couramment utilisés pour le traitement de l'eau. [91]



Figure III.5 : Charbon actif en grain (CAG)

### III.2.5.3 Charbon actif extrudé :

Le charbon actif est de forme cylindrique (figure N° 07), avec des diamètres allant de 0.8 mm Il est principalement utilisé pour des applications en phase gazeuse à cause de sa faible perte de charge, de sa grande résistance mécanique et de sa faible teneur en poussière. [90]



Figure III.6 : charbon actif extrudé.

### III.2.6 Propriétés physiques et chimiques des charbons actifs :

Les propriétés des charbons actifs sont en relation directe avec l'origine et la matière de départ par laquelle ils sont formés. Plusieurs techniques d'analyse sont utilisées pour définir ces propriétés larges et différentielles. Aussi bien les procédés de fabrication des charbons actifs ont leurs attributions des propriétés particulières.

#### III.2.6.1 Propriétés physiques :

##### a) Propriétés texturales :

La structure du charbon peut être vue comme un assemblage aléatoire de feuillets plans constitués par des poly cycles aromatiques (encore appelés feuillets de graphène). L'espace libre entre ces feuillets constitue la porosité du charbon. [92]

##### b) Structure interne du charbon actif :

La structure des charbons actifs est constituée d'une association aléatoire de plans d'atomes de carbone. Ces atomes sont organisés sous forme de cycles aromatiques qui forment des feuillets de carbone appelés graphène. Le graphène a une structure bidimensionnelle d'atomes de carbone rappelant celle d'un nid d'abeille. Le nuage d'électrons  $\pi$  délocalisés sur ces cycles donne au charbon son excellente qualité d'agent adsorbant. L'arrangement des plans de cycles aromatiques se fait d'une manière irrégulière créant entre les feuilles des interstices nommés pores, qui sont à l'origine de la grande surface spécifique des charbons actifs. [93]

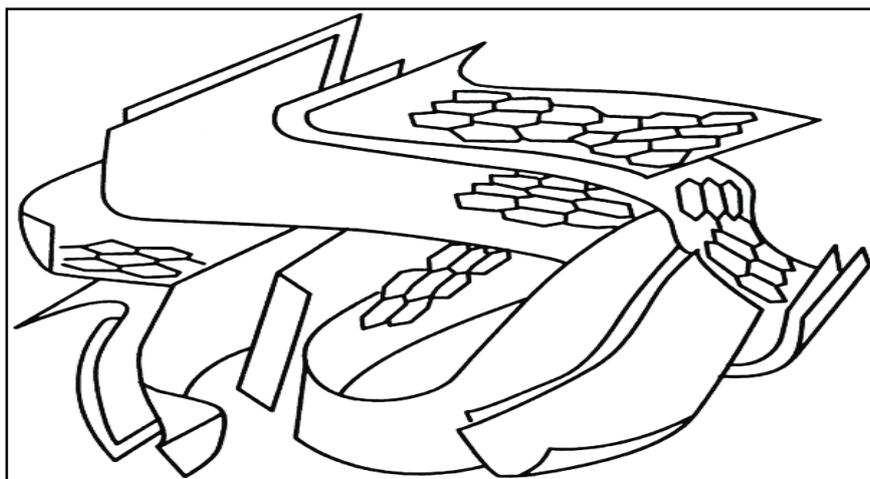


Figure III.7 : Représentation schématique des microstructures du charbon actif

**c) La dureté :**

Elle informe sur la résistance du matériau. C'est un facteur important pour le dimensionnement du système de traitement et sa durée de vie. Il permet d'évaluer la formation de poussières fines nuisibles au fonctionnement des installations et indique si l'intégrité physique du CAP est maintenue lors d'un rétro lavage. Il dépend de la matière première et du niveau d'activation. [94]

**d) La granulométrie :**

C'est la mesure de la dimension des grains du charbon actif. Il est bien évident que tous les grains d'une certaine qualité de charbon actif n'ont pas la même dimension. Ainsi, il est indispensable de faire l'étude statistique des dimensions des grains du charbon.

La granulométrie consiste à peser un échantillon après séchage, ensuite par tamisage sur un empilement de tamis normalisés. On note le poids des matériaux qui ont traversé chaque tamis dont la maille est inférieure à la maille du tamis considéré, on exprime ce poids en pourcentage du poids de matériaux utilisés pour l'analyse, on trace ensuite la courbe représentant ces pourcentages en fonction des vides de maille de chaque tamis. [95]

**e) Humidité et teneur en cendres :**

Ces deux paramètres sont également importants lorsqu'il s'agit de sélectionner un charbon actif. A la livraison, l'humidité doit être inférieure à 5% tandis que la teneur en cendres ne doit pas dépasser 10% sinon le pH risque d'atteindre des valeurs élevées et de causer la précipitation des carbonates de l'eau sur le charbon. Ceci entraîne évidemment une baisse de la capacité d'adsorption. [96]

**III.2.6.2 Propriétés chimiques :****a. Composition global du charbon actif :**

Bien que le carbone soit l'élément majoritaire du charbon actif, d'autres composés (oxygène, hydrogène, soufre, azote, minéraux, ...) sont aussi présents et influent fortement sur les propriétés d'adsorption du charbon actif.

### b. Fonctions de surface du charbon actif :

L'hétérogénéité chimique du charbon actif est donc principalement associée aux différentes fonctions de surface, surtout les groupements oxygénés, qui lui confèrent son caractère acido-basique et déterminent, selon l'environnement (pH de la solution) sa charge électrique. [97]

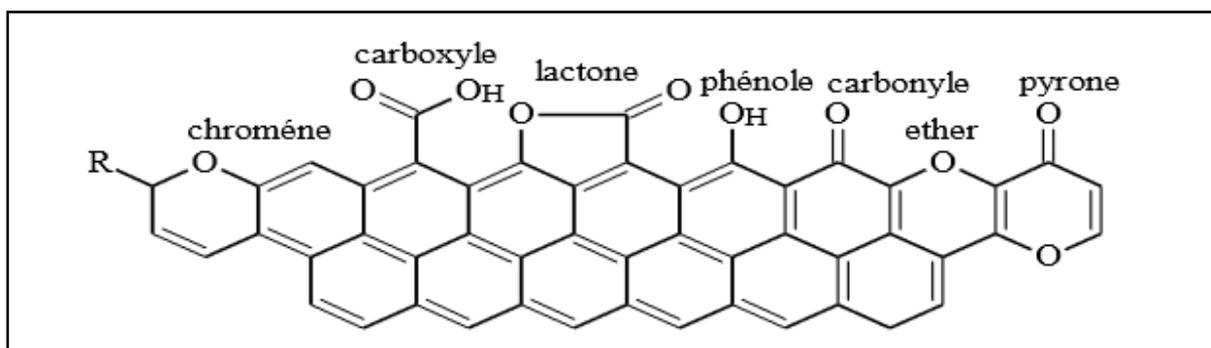


Figure III.8 : Exemples de fonctions oxygénées présentes sur la surface d'un charbon actif

### III.2.7 Structure poreuse :

Les CA sont des matériaux très poreux pouvant posséder trois types de pores selon leur dimension. La gamme de porosité est usuellement décrite selon les définitions de l'IUPAC par trois domaines distincts selon la largeur des pores. Chaque type de pore joue un rôle particulier dans le phénomène d'adsorption. Les micropores déterminent pratiquement à eux seuls la capacité d'adsorption d'un charbon actif : ils représentent presque la totalité de la surface et du volume offerts à l'adsorption. Les macropores et les méso pores constituent les voies de passage vers les micropores. [98]

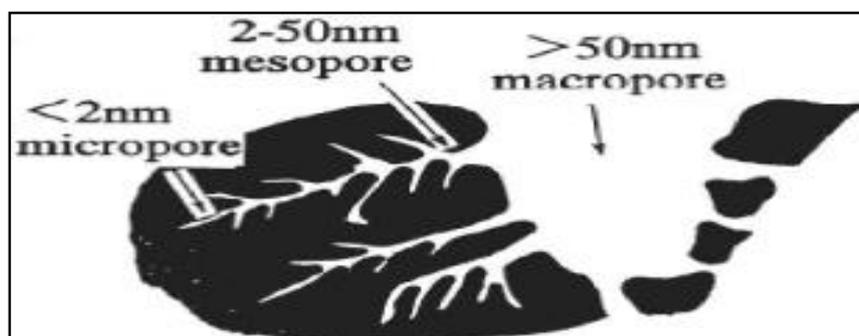


Figure III.9 : structure poreuse du charbon actif.

### **III.2.8 Régénération du charbon actif :**

Le charbon actif se sature progressivement et il finit par ne plus pouvoir fixer les molécules à sa surface. Afin de le valoriser et le ré utiliser, il est important de pouvoir le régénérer de façon à ce qu'il puisse retrouver ses propriétés initiales d'adsorbant. La régénération peut s'effectuer de différentes façons :

#### **III.2.8.1 Régénération à la vapeur :**

Cette méthode est réservée à la régénération des charbons actifs qui ont simplement adsorbé des produits très volatils. Cependant, le traitement à la vapeur peut être utile pour déboucher la surface des grains de charbons et désinfecter le charbon. [99]

#### **III.2.8.2 Régénération thermique :**

Elle est réalisée par pyrolyse ou en brûlant les matières organiques adsorbées par les charbons actifs. La régénération thermique consiste en un séchage, une désorption thermique des composés et un traitement à température élevée (650 à 980 °C) en présence de quantités limitées de vapeur d'eau, de gaz d'échappement et d'oxygène. Ce type de régénération, efficace à 100%, reste le procédé le plus appliqué actuellement, bien que la consommation d'énergie soit importante et que la manipulation du charbon saturé entraîne 5 à 10% de perte en masse par cycle de régénération. [99]

#### **III.2.8.3 Régénération chimique :**

Il s'agit d'une régénération acide ou basique, ou par oxydation chimique ou par utilisation d'un solvant d'extraction Les pertes de masse de charbon étant de l'ordre de 0,5% de la masse traitée. Toutefois, l'utilisation fréquente de réactifs chimiques pose le problème des éluas pollués par la substance extraite du charbon actif régénéré.

#### **III.2.8.4 Régénération biologique :**

Bien que le procédé de la régénération biologique soit remis en question, le fait expérimental demeure : en conditions aérobies les bactéries les bactéries son capable de minéraliser la matière organique du charbon. [100]

### III.2.9 Mise en œuvre du charbon actif :

Les charbons actifs sont commercialement disponibles sous deux formes : en poudre **CAP (0.045 à 0.14 mm)** et en grain **CAG (0.4 à 4 mm)**. Le choix d'une forme par rapport à une autre dépend des spécificités du problème à traiter et des objectifs du traitement. [101]

#### III.2.9.1 Le charbon actif pulvérulent CAP :

Est disposé dans l'eau (par agitation) dans laquelle il se maintient en quasi suspension et agit en qualité d'adsorbant. A la fin du traitement il est souvent éliminé dans des décanteurs.

Le CAP présente l'avantage de permettre un surdosage en cas de pollution de pointe et d'avoir une cinétique d'adsorption très rapide car une grande surface étant directement accessible. Son inconvénient est qu'il est pratiquement impossible à régénérer. Sa mise en œuvre est simple et nécessite des coûts d'investissement peu coûteux. Il est trois fois moins cher que le charbon en grain. [102]

#### III.2.9.2 Le charbon actif en grain CAG :

Est employé sous forme de lit filtrant permettant d'utiliser dans un même ouvrage les propriétés filtrante et adsorbant du charbon. La performance de ces filtres dépend de leurs profondeurs et du taux d'échange. [103]

### III.2.10 Quelques applications du charbon actif :

Les charbons actifs sont utilisés dans plusieurs domaines : [104]

- Le traitement des eaux potables ou des eaux industrielles qui sont produites à partir des eaux de surface. Le charbon actif fixe alors les composés organiques dissous qui n'ont pas été éliminés par autoépuration (ou élimination biologique naturelle). Nous citons en exemple les substances qui donnent le goût et la saveur à l'eau. Ces adsorbants retiennent également certains métaux lourds à l'état de traces.
- Le traitement tertiaire des eaux résiduaires ou industrielles. Dans ce cas le charbon actif peut être considéré comme un complément au traité biologique. Ce procédé est utilisé au niveau de la station d'épuration de l'unité Couvertex de Aïn-Djasser, Wilaya de Batana, pour l'élimination des colorants.

- Le traitement des eaux résiduaires industrielles : ce traitement est employé lorsque l'utilisation des techniques biologiques n'est pas permise. Le but du charbon actif est donc d'éliminer les composés toxiques non biodégradables.
- La purification industrielle des produits pharmaceutiques, chimiques ou alimentaires (sucre, huiles végétales...).
- L'action catalytique en tant que support de catalyseur.
- Le charbon exerce un effet catalytique lors de la réaction d'oxydation de l'eau par le chlore libre



Ainsi, on effectue la décoloration d'une eau ayant subi un traitement de chloration par excès.

Enfin, Il est à noter que les traitements avec le charbon actif en poudre ou en grains sont d'un intérêt croissant car ils se caractérisent essentiellement par :

- Un faible coût dynamique.
- Une mise en œuvre simple.
- Une meilleure compétitivité par rapport à d'autres procédés de traitement telle que la biodégradation.

# Partie Expérimentale

# Chapitre IV

## Chapitre IV

### Objectif :

L'objectif de cette partie expérimentale est de diminuer le taux de salinité de l'eau de mer et la saumure par le procédé d'adsorption en utilisant un charbon actif comme support adsorbant.

### IV.1.1 Matériels et Méthodes :

#### IV.1.1.1 Matériels et appareillage :

**Tableau IV.1 : tableau des matériels et appareillage**

Matériels	appareillages
Bécher (500-250-50ml) Buchner – fiole à vide Fiole (500ml-1L) Pissette - Verre de montre Papier Josef - petite cuillère Cristalliseur Papier filtre Tissu (comme un filtre) Mortier Spatule Tamis de 200 $\mu$ m	Agitateur magnétique + barreau magnétique Balance électrique L'étuve pH mètre Conductimètre Tamiseuse

#### IV.1.1.2 Réactifs utilisés :

Les réactifs ce qu'on a utilisés dans cette manipulation sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Opérations analytiques	Réactifs
Purification du charbon	L'eau distillée Solution de NaOH (2M)
Activation du charbon	Solution H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (96%)

## IV.1.2 Méthodologies de travail :

### IV.1.2.1 Choix du charbon :

Le charbon employé dans ce travail provient de la noix des dettes. Il est caractérisée par une surface spécifique moyennement importante de l'ordre de 2000 m<sup>2</sup>/g et un pH acide (3.24).

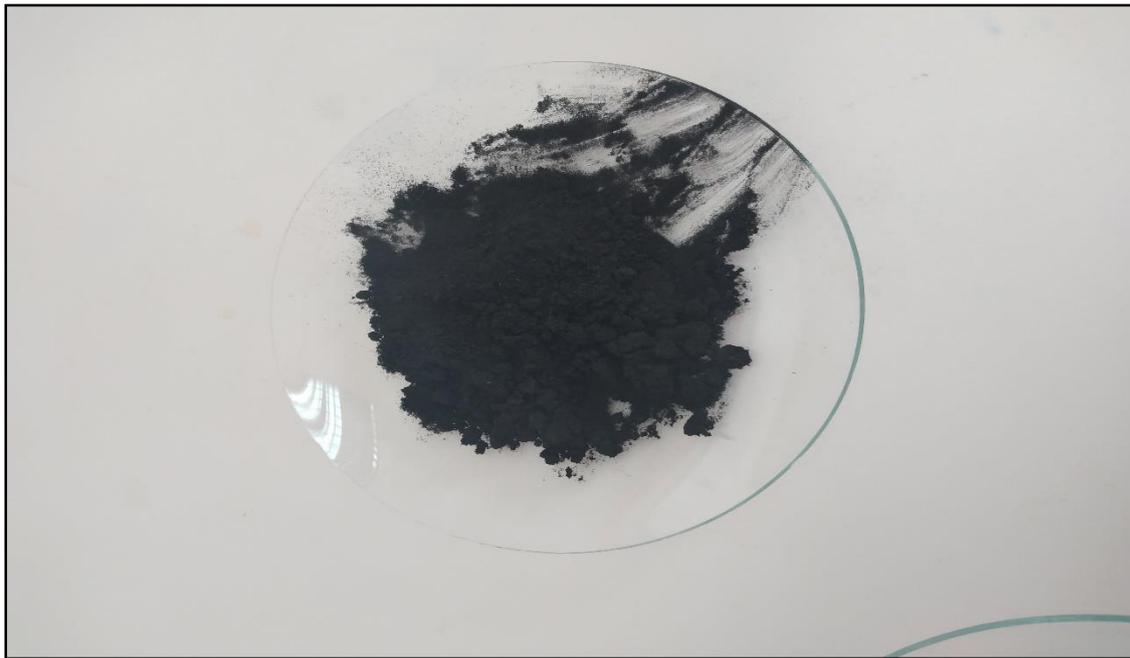


Figure IV.1 : Le charbon

### IV.1.2.2 Purification du charbon :

- On avait deux échantillons de charbon (acide – basique), on les a mélangés dans un seul échantillon.
- On a commencé par lavage de notre produit avec l'eau distillé puis la filtration jusqu'à la neutralisation (pH=6-7).
- A chaque fois on a changé l'eau distillée

Lavage dure jusqu'à 4 étapes :

Étapes	pH
1 <sup>ème</sup> étape	3.24 – 3.24 – 3.25
2 <sup>ème</sup> étape	3.90 – 3.91 – 3.93
3 <sup>ème</sup> étape	4.20 – 4.20 – 4.20
4 <sup>ème</sup> étape	4.47 – 4.47 – 4.47

- Le pH été fixé à 4.47 bien qu'on a fait lavage plusieurs fois mais ça n'a rien changé ce qui nous devrait faire l'addition du NaOH à l'eau distillé, et également la valeur de pH été augmenté jusqu'à 6.57 (notre charbon est neutralisé).
- Le charbon lavé est mis en l'étuve pendant 6h à 110c° pour sécher.
- Le charbon est broyé puis tamisée à trois reprises sur tamis de 200µm afin d'obtenir CP (charbon poudre).

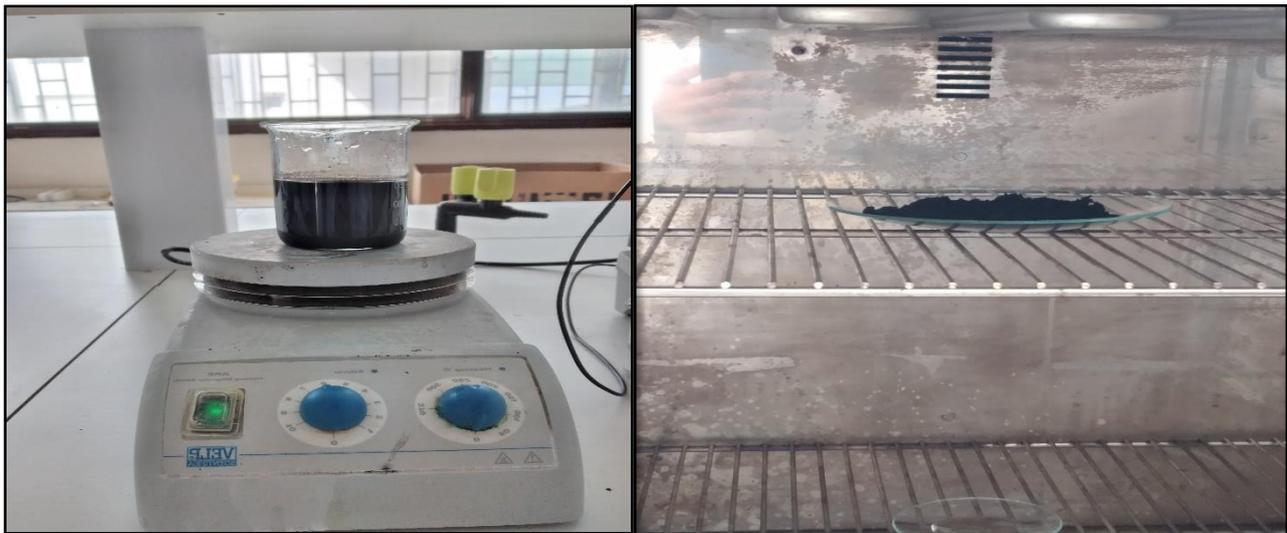


Figure IV.2 : l'agitation puis le séchage du charbon

#### IV.1.2.3 Activation du charbon :

- Le charbon est activé avec l'acide sulfurique
- Nous avons préparé la solution d'acide sulfurique  $H_2SO_4$  à partir de (remplir une fiole « 1L » avec l'eau distillé et 66ml  $H_2SO_4$ )
- On a mélangé le charbon avec l'acide sulfurique puis l'agitée pendant 30min
- Après l'agitation on l'a laissé au repos à l'ombre durant 24h

- Après de contact entre les deux réactifs, on a dû filtrer le mélange pour récupérer le charbon « actif » et le laisse au repos à l'étuve pendant 6h afin de sécher.
- On a fait encore fois le broyage du charbon actif et le tamisé pour récupérer le CAP.



**Figure IV.3 : tamiseuse, mortier avec son pilon et le charbon actif**

#### **IV.1.2.4 Méthodes de caractérisation du charbon actif :**

Le charbon actif ayant donné un maximum d'adsorption de l'eau de mer et la saumure est caractérisé au moyen des cinq expériences suivantes :

##### **IV.1.2.4.1 La densité :**

Dans une éprouvette graduée, une masse de charbon  $m$  occupera un volume  $V_a$ .

La densité apparente peut être calculée au moyen de l'équation suivante :

$$P = m/V_a \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

##### **IV.1.2.4.2 Mesure de la porosité :**

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

$$\varepsilon = \frac{\frac{(m_2 - m_1)}{\rho_{\text{méthanol}}} - V_2}{V_1}$$

**équation 9**

**IV.1.2.4.3 Mesure du pH de la suspension :**

Une masse de 1g du charbon est introduite dans 100 ml d'eau distillée déminéralisée, la solution est agitée d'une manière continue pendant 24 heures, puis filtrée. Le pH est mesuré au repos sur le filtrat à chaque intervalle de pendant 3 jours.

**IV.1.2.4.4 Taux d'humidité :**

Peser 4g de l'échantillon  $m_1$  sur un verre de montre, Sécher à l'étuve à une température de  $105^\circ\text{C}$ , suivre l'évolution de la masse pendant le temps jusqu'à un poids constant  $m_2$ . L'humidité (H) a été déterminée en appliquant la relation suivante :

$$\mathbf{H(\%) = \left[ \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \right] \times 100} \quad \mathbf{\text{équation 10}}$$

**IV.1.2.4.5 Mesure de la conductivité :**

Placer dans un flacon de 500 ml, 2g du charbon de et 40 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.1.2.4.6 L'indice d'iode :**

Pour déterminer l'indice d'iode de nos adsorbants nous avons suivi le protocole ci-dessous :

- Peser avec précision 0,2 gramme de charbon en poudre et l'introduire dans un erlenmeyer de 250 ml.
- Ajouter 10 ml d'acide chlorhydrique et agiter jusqu'à ce que le charbon soit 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 trente secondes.
- Filtrer à travers le papier Whatman N° 2.
- Mélanger le filtrat et en prendre 50 ml pour transférer 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 :

$$\mathbf{\text{Indice d'iode} = ((V_2 - V_1) \times N \times 126,93) / m \text{ (22)}}$$

Où

- m : La masse de charbon actif (g).
- V2 : Volume de thiosulfate pour le titrage à blanc.
- V1 : Volume de thiosulfate pour le titrage après adsorption.
- N : La normalité de la solution de thiosulfate utilisé.

La valeur est = **512.45 mg/g**

#### IV.1.2.4.7 L'indice de bleu de méthylène :

- 1) Le charbon actif granulé doit être broyé jusqu'à ce qu'au moins 95% passent à travers un tamis 325 (50 $\mu$ m) d'écran. Les charbons en poudre peuvent également subir un broyage pour répondre à cette exigence de taille.
- 2) Régler la longueur d'onde du spectrophotomètre à 620 nm, et en utilisant une cellule de 10 mm pour lire des mesures et enregistrer les absorbances.
- 3) Tracer la courbe d'étalonnage de la concentration du bleu de méthylène par rapport à l'absorbance et calculer la pente de la droite de régression.
- 4) Peser un poids de 0,100 g de l'échantillon séché et l'introduit dans un bécher de 100 ml.
- 5) Ajouter 25 ml de solution de bleu méthylène de concentration 1200 mg / L et mélanger avec un agitateur mécanique pendant 30 minutes.
- 6) Filtrer le mélange à travers le filtre Wattman 44 ou du papier filtre No 3 et jeter d'abord les premières 5 ml du filtrat.
- 7) Mesurer l'absorbance du filtrat à 620 nm (ce qui donne R, la concentration résiduelle de bleu de méthylène à partir de la courbe d'étalonnage).

**Calcul L'adsorption au bleu de méthylène (mg/g) de charbon = (300- R/4)**

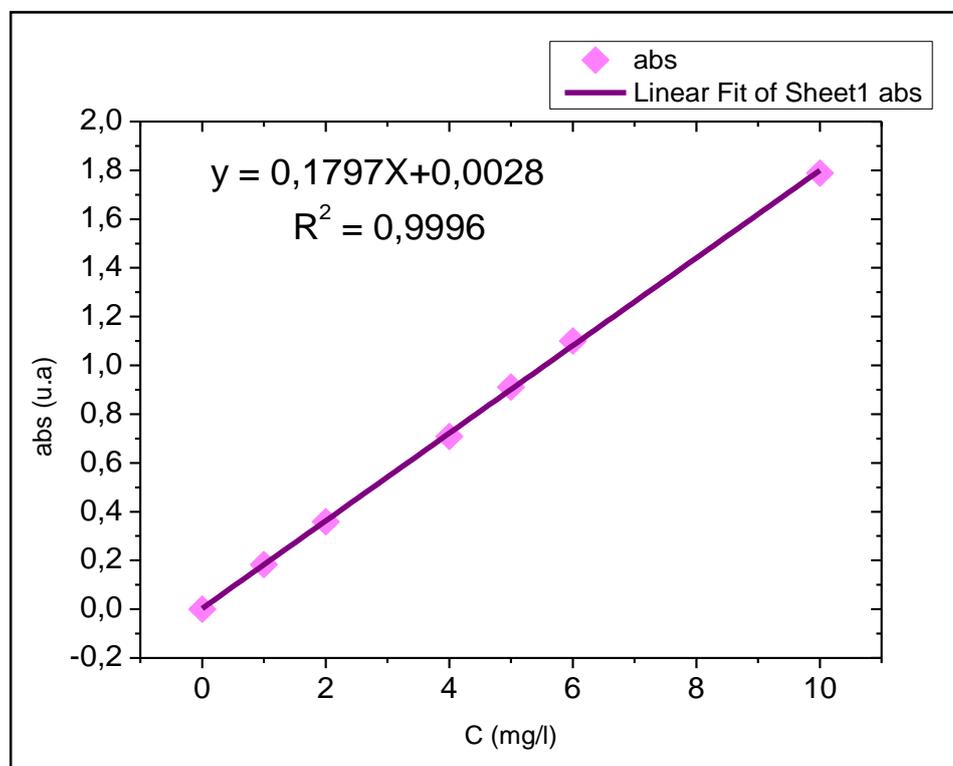
Où :

- R : Concentration résiduelle du Bleu de Méthylène (mg/L<sup>-1</sup>)

La valeur est = **272.18 mg/g**

**Tableau IV.2 : Variation de la densité optique en fonction de la concentration du bleu de méthylène.**

<b>C (mg/l)</b>	0	1	2	4	5	6	10
<b>Abs (u.a)</b>	0	0.183	0.359	0.709	0.911	1.1	1.789

**Figure IV.4 : courbe d'étalonnage de la densité optique en fonction de la concentration du bleu de méthylène****IV.1.2.4.8 Point de charge zéro (PZC) de RB :**

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 pH<sub>i</sub> de chacun des valeurs précises de 2 à 11,95 (par addition de NaOH et HCl (0.1M) tableau).
- ❖ ensuite nous avons ajouté dans chaque bécher 25 mg de la matière brute (RB).
- ❖ 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

$$\Delta pH = pH_f - pH_i \text{ En fonction de } pH_i \text{ avec l'axe des abscisses.}$$

Tableau IV.3 : variation de pHf-pHi 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
pHf	2,08	2,93	4,25	5,58	5,45	5,70	5,86	6,33	6,79	9,31
pHf-pHi	0.08	0.93	0.45	0.68	-0.55	-1.4	-2.14	-2.77	-3.41	-2.64

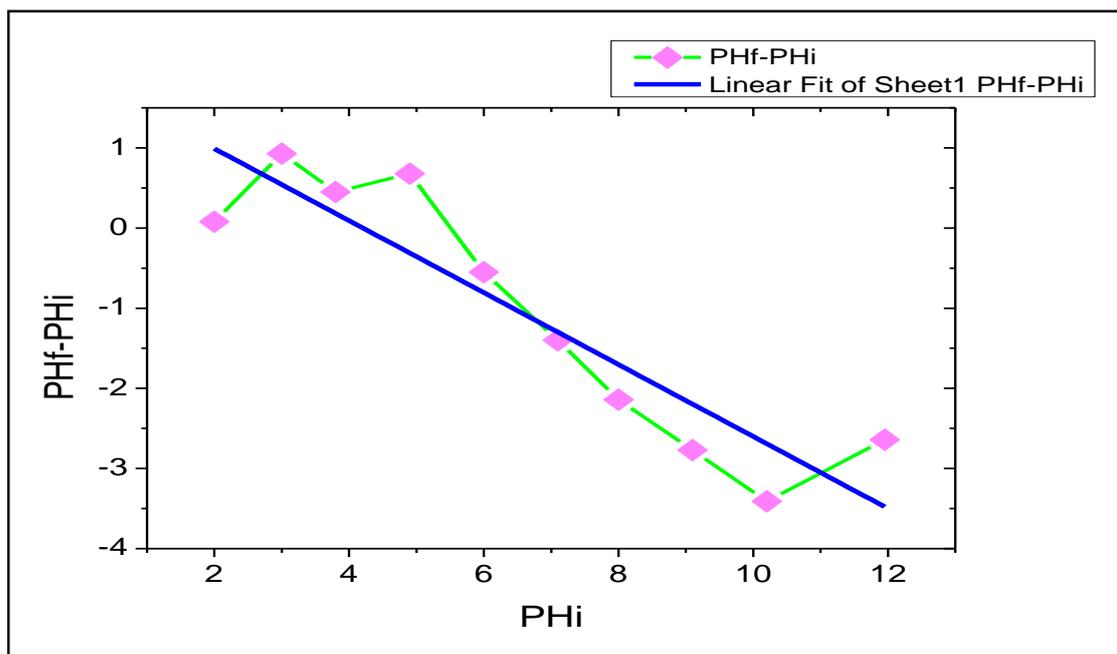


Figure IV.5 : courbe d'étalonnage de la variation de pHf-pHi en fonction de pHi

- Le PZC de charbon actif est de 6.8 ce qui signifie que la surface d'adsorbant est chargée positivement au pH inférieur à 6.8, et négativement à un pH supérieur à 6.8.

#### IV.1.2.5 Optimisation des conditions d'adsorption de l'eau de mer et la saumure :

Dans le but d'optimiser les conditions en faveur d'une meilleure adsorption de l'eau de mer et la saumure sur le charbon actif précédemment caractérisée, nous avons étudié, l'effet de trois paramètres sur le processus d'adsorption à savoir :

1. Le temps de contact.
2. La masse du charbon actif.
3. La température.

✓ Les conditions opératoires sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau IV.4 : les conditions opératoires du processus d'adsorption**

Paramètres	Conditions opératoires
Temps de contact	m (charbon) = 0.5g V (l'eau de mer) = 50 ml temps = (60-120-180-240-300-360) min T (°c) = 20.5°c
Masse du charbon actif	m (charbon) = (0.1-0.2-0.3-0.4-0.5-0.6-0.7) g V = 50ml temps (min) = 120min T (°c) = 20.5°c
Température	m (charbon) = 0.7g V = 50ml temps (min) = 120min T (°c) = 25-30-35-40-45-50

La quantité de l'eau de mer adsorbée par unité de masse de charbon actif est calculée par la formule suivante :

$$Q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} * V$$

**équation 11**

Le Taux d'élimination R% de l'eau de mer on a calculé par cette équation suivante :

$$R\% = \frac{c_0 - c_e}{c_0} \quad \text{équation 12}$$

Les résultats obtenus sont présentés par deux modèles thermodynamiques afin de déterminer lequel d'entre eux est plus adéquat pour la présentation des résultats expérimentaux de cette étude.

#### IV.1.2.6 Caractérisation de charbon actif :

Les principales caractéristiques du charbon actif sont regroupées dans le tableau suivant :

**Tableau IV.5 : Caractéristiques du charbon actif**

Paramètres	Les valeurs
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	0.465
Porosité (%)	41.9
pH	2.35
Taux d'humidité (%)	18.22
Conductivité (μs/cm)	324
L'indice d'iode (mg/g)	512.45
L'indice de bleu de méthylène (mg/g)	272.18

### IV.1.3 Etude fondamentale d'adsorption de l'eau de mer sur le charbon actif :

**Tableau IV.6 : Les valeurs des paramètres chimique et physico-chimique de l'eau de mer (EM) avant et après l'adsorption**

Paramètres	Unités	Avant l'adsorption	Après l'adsorption
Température	°C	16.81	17.2
pH		8.08	7.98
Conductivité	ms/cm	79.4	50.64
Turbidité	NTU	1.99	0.25
TDS	mg/l	39.326	25.08
TH	°F	1220	1099
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	19630
Chlore libre	mg/l	0.02	0.04

#### IV.1.3.1 Effet du temps de contacts :

##### IV.1.3.1.1 Modèle cinétique du pseudo premier ordre :

Les résultats obtenus à partir du graphe nous permettent de conclure si la cinétique de l'adsorption de charbon actif avec l'eau de mer est du premier ordre.

Le tracé de  $\log(q_e - qt) = f(t)$  en utilisant l'équation  $\log(q_e - qt) = -\frac{K_1}{2.303} * t + \log q_e$  donne un droite linéaire de :

- Pente =  $-\frac{K_1}{2.303}$
- L'ordonné à l'origine =  $\log q_e$

Ces paramètres nous permettent de calculer :

- La constante de vitesse  $k_1$
- La capacité d'adsorption à l'équilibre

**IV.1.3.1.2 Modèle cinétique du pseudo second ordre :**

Les résultats obtenus à partir du graphe nous permettent de conclure si la cinétique de l'adsorption de charbon actif avec l'eau de mer est du second ordre.

Le trace de  $f(t) = \frac{t}{qt}$  en utilisant l'équation  $\frac{t}{qt} = \frac{1}{qe} * t + \frac{1}{[K_2(qe)^2]}$  donne une droite linéaire de :

- Pente =  $\frac{1}{qe}$
- L'ordonnée à l'origine =  $\frac{1}{[K_2(qe)^2]}$

Ces paramètres nous permettent de calculer :

- La constante de vitesse  $K_2$
- La capacité d'adsorption à l'équilibre

**Interprétations des résultats :**

L'étude de l'effet de temps d'adsorption de l'eau de mer sur le charbon actif, nous a permis d'étudier les modèles cinétiques. Selon les résultats de la linéarisation des 2 modèles, et qui sont représentés dans les figures, on a observé que le model de 1<sup>er</sup> ordre décrit mieux la cinétique d'adsorption que le 2<sup>ème</sup> modèle, à cause de :

- ✚ N'y a pas d'une grande différence entre les deux linéarisations.
- ✚ Pour les constantes de vitesse on remarque que celui de 1<sup>er</sup> ordre est plus proche par rapport au 2<sup>ème</sup> ordre.
- ✚ Il y a une différence entre les quantités d'adsorbat à l'équilibre.

**IV.1.3.2 Effet de la masse de charbon actif :****Mode opératoire :**

- On a pris 7 béchers, dans chaque bécher il y' a une masse (0.1 ; 0.2 ; 0.3 ; 0.4 ; 0.5 ; 0.6 ; 0.7) g de charbon actif.
- On a ajouté 50ml de l'eau de mer.
- On a fait l'agitation pendant 120min.
- Après l'agitation on a filtré nos mélanges.
- Finalement on a mesuré la conductivité des échantillons.

### IV.1.3.3 Effet de la température :

#### Méthode de travail :

- ❖ On a pris une série des béchers ; dans chaque bécher (0.7g) de masse de charbon actif.
- ❖ On a ajouté 50 ml de l'eau de mer.
- ❖ On les a mis sous agitation pendant 120min dans chaque bécher il y a une température (25 ; 30 ; 35 ; 40 ; 45 ; 50).
- ❖ Après agitation on a filtré nos mélanges.
- ❖ Finalement on a fait l'analyse de conductivité.

#### IV.1.3.3.1 Modèle thermodynamique :

Le tracé de  $\ln K_d = f(1/T)$  en utilisant l'équation :  $\ln K_d = \left(\frac{\Delta S^\circ}{R}\right) - \left(\frac{\Delta H^\circ}{R}\right) * \frac{1}{T}$  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 :  $\Delta G^\circ = -RT \ln K_d$

#### Interprétations des résultats :

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

**Figure IV.10 : effet de la température sur l'adsorption de l'eau de mer**

**Figure IV.11 : influence de la température sur l'adsorption de l'eau de mer**

### IV.1.4 Études fondamentales d'adsorption de la saumure sur le charbon actif :

**Tableau IV.7 : les valeurs des paramètres physico-chimique de l'eau de saumure(ER) avant d'adsorption**

Les paramétré	Unité	Les valeurs (ER)
Conductivité	ms/cm	118.6
Salinité	psu	90.74
TDS	mg/l	51
Température	°C	24.3
pH		8.91
Turbidité	NTU	8.64
TH	°F	12.5
TAC	°F	0.5
Cl <sup>-</sup>	mg/l	49.1
Calcium	mg/l	33.89

#### Mode opératoire :

- Tout d'abord on mesure la conductivité de la saumure (avant l'adsorption).
- Ont pesé 0.7 g de charbon actif dans un bécher.
- On ajoute 50 ml de la saumure.
- On le met sous agitation pendant 120 min à température 25°C.
- Après agitation on filtre notre mélange.
- Finalement on fait l'analyse de la conductivité (après l'adsorption).

Les résultats obtenus dans ce tableau :

**Tableau IV.8 : les valeurs des paramètres physico-chimiques de l'eau de saumure(ER) avant-après d'adsorption**

Les paramétré	Unité	Avant	Après
Conductivité	ms/cm	118.6	88.3
Salinité	Psu	90.74	65.23
TDS	mg/l	51	22.1
Température	°C	24.3	23.3
pH		8.91	8.30
Turbidité	NTU	8.64	0.259
TH	°F	12.5	10.7
TAC	°F	0.5	0.4
Cl <sup>-</sup>	mg/l	49.1	52.4
Calcium	mg/l	33.89	11.62

# Conclusion

## Conclusion

---

Dans le cadre de développement durable et afin de préserver notre environnement, et notamment l'écosystème marin, ce mémoire a fait l'objet d'une étude de l'effet du charbon actif sur l'adsorption de l'eau de mer et la saumure avant et après le dessalement.

1- l'adsorption de l'eau de mer atteint un maximum de 7.102 mg/g au bout de 120 min. cette cinétique plus au moins lent montre qu'il s'agit d'une adsorption chimique en outre de la physisorption.

2- l'augmentation de la masse du charbon actif de (0.1 à 0.7) g augmente le taux de l'élimination de 51.18% à 95.74%.

3- l'augmentation de la température à (25 à 50) °c provoque une diminution de quantité d'adsorbat ( $Q_e$ ) de 4.68 à 3.37 cela indique une diminution de l'absorption ce que nous signifie qu'il y avait une désorption.

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

5- les isothermes d'adsorption sont tous bien décrits par le modèle Freundlich.

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

7- d'une part, grâce à la meilleure adsorption à basse température (faible liaison) qui indique la physisorption, d'autre part à cause de la faiblesse du taux de chlorure il y a aussi une chimisorption.

Nous avons conclu de cette étude que la masse de charbon actif (0.7g) et le temps de contact (120min) avec une température  $\leq 25^\circ\text{c}$ , la capacité d'adsorption du charbon actif pour l'eau de mer 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.

# *Références Bibliographiques*

[1] : ACHOUR S. (2001). Incidence des procédés de minéraux des eaux naturelles, Thèse de Doctorat, Université de Tizi-Ouzou, Algérie p(231).

[2] : <https://www.ade.dz>

[3] : IVER DUEDALL, Notes de cours - Océanographie, Florida Institute of Technology.

[4] : <https://www.aquaportail.com>

[5] : UNESCO, Tables océanographiques internationales, citées par Andrew W.Dickson et Catherine Goyet (éds.), Handbooks of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water, US Department of Energy, version 2, septembre 1994, ORNL/CDIAC-74, chap. 5, partie 6.1.

[6] : FARID TATA-DUCRU (Janvier 2009) .Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes (institut des sciences et industries du vivant de l'environnement paris institut of technology for life, food and environmental science).

[7] : <https://www.futura-sciences.com>

[8] : RODIER J (2009). L'analyse de l'eau .9eme édition© Dunod, Paris. ISBN 978-2-10054179-9.

[9] : JEAN-MARIE PÉRÈS, « océan et mers (Eaux marines) - Propriétés », Encyclopédie Universalise.

[10] : SAVARY. (2010). Guide des analyses de la qualité de l'eau. Ed. Territorial voiron. p261.

[11] : HABET. L (2012). Contribution à l'étude des impacts du dessalement des eaux de mer sur l'environnement, Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara Boumerdes 153p.

[12] : B.HACHEMAOUI. (2014). « qualité physico-chimique de l'eau dessalée et traitée par la station de dessalement de l'eau de mer de souk tlata », Mémoire master, université de telemcen.p91.

[13] : <https://www.cap-sciences.net/>

[14] : COJAN ET RENARD M. (2003). Sédimentologie. Edition Dunod, France p136.

[15] : <https://www.aquaportail.com/>

[16] : <https://www.cnrs.fr>

- [17] : A.KHADRAOUI ET S.TALEB. (2008). « Qualité des eaux dans le Sud Algérien Potabilité – Pollution et impact sur le milieu » Book, p354.
- [18] : DEGUMENT. , (1952). « Mémento technique de l'eau », Première édition.
- [19] : RODIER. (2005). L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer.8eme édition : Dunod, Paris.
- [20] : RODIER J., (1984). « L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. » Edition .Dunod. Paris.
- [21] : DEGUMENT. (1989) « Mémento technique de l'eau », 8 ème Edition.
- [22] : CHAPMAN D. et al. (1996).in GHAZALI D., ZAID A., 2013. « Etude de la qualité physicochimique et bactériologique des eaux de la source Ain Salama-Jerri (Région de Meknès à Maroc). » Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 12, Janvier 2013, p25-36.
- [23] : DEGUMENT. (1989) « Mémento technique de l'eau », 8 ème Edition.
- [24] : GUENTRI S., RAHMANIA F., (2015). «Contribution à la connaissance de la remontée et la pollution des eaux ». Edition : universitaires européennes, P28.
- [25] : AFNOR., (2001). « Qualité de l'eau, analyses organoleptiques- mesures. Physicochimiques paramètres globaux-composés organique ».6eme Edition. ISO 7888-1985 (F) p73.
- [26] : RAMADE., (2011). «Introduction à l'éco chimie, les substances chimique et l'écosphère a l'Homme » Edition. Lavoisire. Paris.
- [27] : DEGUMENT. (1989) « Mémento technique de l'eau », 8 ème Edition.
- [28] : M.TARDAT-HENRY. (1984). «Chimie des eaux», 1ere édition griffon d'argile INC, paris.
- [29] : RODIER J., (1984). « L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. » Edition .Dunod. Paris.
- [30] : DEGUMENT. (1989) « Mémento technique de l'eau », 8 ème Edition.
- [31] : DEGUMENT. (1989) « Mémento technique de l'eau », 8 ème Edition.
- [32] : H.TARDATH et J.P.BEAUDRY. (1984) « chimie des eaux, les griffons d'argile ».

- [33] : DEGREMONT. (1989) « Mémento technique de l'eau », 8<sup>ème</sup> Edition.
- [34] : DESIARDINS RAYMOND., (1990). «Le traitement des eaux éme ED de l'Ecole polytechnique de Montréal ».
- [35] : FARID TATA-DUCRU (Janvier 2009) .Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes (institut des sciences et industries du vivant de l'environnement paris institut of technology for life, food and environmental science).
- [36] : étude économique et impact écologique de la station de dessalement de honaïne (w.tlemcen) ALLAM HADIL(1) ET MELLAH ABDELKRIM(2).
- [37] : BOUGIS J (2013) .Revue des aspects maritimes du dessalement d'eau de mer. Revue Paralia.
- [38] : AZZI ELIAS (Juillet - Août 2014). Le dessalement de l'eau de mer en Espagne : un secteur en réorientation .Service pour la science et la technologie.
- [39] : <https://www.energy.gov.dz/>
- [40] : <https://culturesciences.chimie.ens.fr/>
- [41] : ANOUAR RICH. (2011) « dessalement de l'eau de mer par congélation sur parois froides : aspect thermodynamique et influence des conditions opératoires » thèse de doctorat, p175.
- [42] : <https://culturesciences.chimie.ens.fr/>
- [43] : Bouros, O.K. (1992), Desalting Technologies. The ABCs of Desalting.
- [44] : <https://www.lenntech.fr/>
- [45] : LEGRAND L. et LEROY P. (1995) Prévention de la corrosion et de L'entartrage dans les réseaux de distribution d'eau. Ed. Cifec, p356.
- [46] : BOIXADERA, D. (2001). Le dessalement d'eau de mer. BRL Ingénierie.
- [47] : F. LARABA, programme national de dessalement, conférence, 2012.
- [48] : ONEP, 2010. Impact Environnemental des rejets de stations de dessalement. Mémoire de Magister-Université de Mohammed V- Rabat, 93p.

- [49] : PNUE, 2001. Dessalement de l'eau de mer dans les pays méditerranéens : évaluation des impacts sur l'environnement et lignes directrices proposées pour la gestion de la saumure. Réunion des Points Focaux du PAM, 11-14 septembre 2001, 92p.
- [50] : AKSAS H, 2013. Thèse de Doctorat. Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption des métaux lourds par l'utilisation des adsorbants naturels.
- [51] : M.SEKIRIFA ; étude des propriétés adsorbants des charbons activités issus des noyaux de datte ; application au traitement d'effluent aqueux thèse de doctorat, université BADJI MOKHTAR ; Annaba ; 2012-2013.
- [52] : Etude sur les couts de la réduction des rejets de substances toxiques -Fiches Traitement.
- [53] : C.CHITTOUR : Physico chimie des surfaces.2eme édition, Tome2 (2004) 461 p.
- [54] : VIRABGHAVAN T, KAPOOR A ,2008 . Adsorption of from wastewater by Bentonite. Applied clay science, 9,31-39.
- [55] : N.OUBACHA : Décontamination des eaux contenant des colorants textiles et les adjuvants par des matériaux naturels et synthétiques. Thes, Master, GE, U.Mouloud Mammeri Tizi Ouzou (2011) 122 p.
- [56] : JACQUE OUDAR : La chimie des surfaces (1973) 37- 55.
- [57] : A.DEBBAZ, M.RAACHE ; Préparation et caractérisation d'un charbon actif à partir d'un déchet agricole "Lestiges de palmiers dattier" ; mémoire de master ; université KHASDI MERBEH Ouargla ; 7/06/2017.
- [58] : CARDO C ,1999. Les traitements de l'eau : procédés physico-chimiques, cours et problèmes résolus. Elipses. Paris.
- [59] : BOULKRAH H, 2008. Mémoire de Magister. Etude comparatives de l'adsorption des ions plomb sur différents adsorbants.
- [60] : FERRANDO O, BOUBANE H, 2001. Influence des alcools aliphatiques sur l'adsorption d'acides aminés sur charbon actif. Laboratoire des sciences de l'eau et de l'environnement, France, C.R.Acad. Sci, Chimie/Chemistry.4, 879-883.
- [61] : RIAZ Q, ABDUL HAMEED R, 2002 .A study of adsorption of phenol by activated carbon from aqueous solution. Turk J Chem.26, pp, 357-361.

- [62] : FERRANDO O, BOUBANE H, 2001. Influence des alcools aliphatiques sur l'adsorption d'acides aminés sur charbon actif. Laboratoire des sciences de l'eau et de l'environnement, France, C.R.Acad. Sci, Chimie/Chemistry.4, 879-883.
- [63] : YAHIAOUI N, 2012. Mémoire de Magister. Etude de l'adsorption des composés phénoliques des margines d'olives sur carbonate de calcium, hydroxyapatite et charbon actif.
- [64] : RIAZ Q, ABDUL HAMEED R, 2002 .A study of adsorption of phenol by activated carbon from aqueous solution. Turk J Chem.26, pp, 357-361.
- [65] : SEDDI A ,1988. Contribution à l'étude de la composition chimique et la digestibilité, in, de la MS (Camelin et Ovin) des sous-produits de palmier dattier, Mémo.Ing.Ouarbla.
- [66] : CREANGA C M, 2007. Thèse de Doctorat, Procédé AB-OX d'élimination de polluants organiques non biodégradables (par adsorption puis oxydation catalytique), Ecole doctoral : transferts, dynamique des fluides, énergétique et procédés.
- [67] : O.HOCINE ET AL : Use of montmorillonite clays as adsorbents of hazardous pollutants. Desalination 167 (2004) 141 - 145.
- [68] : D.C.SEO Et Al : Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed Wetland. Water Research 39 (2005) 2445 - 2457.
- [69] : J.M.LI ET AL : Adsorption of phenol, p – chlorophenol and p – nitrophenol onto functional chitosan. Bioresource Technology 100 (2009) 1168 - 1173.
- [70] : J. JIMMY, L. HUMPHRY, E. GEORGE, Procédé de séparation, Technique sélection, Dimensionnement, DUNOD 2001.
- [71] : A.UCER ET AL : Adsorption of Cu (II), Cd (II), Zn (II), Mn (II) and Fe (III) ions by tannic acid immobilized activated carbon. Separation and Purification Technology 47 (2006) 113- 118.
- [72] : N.SEDIRA ; étude de l'adsorption des métaux lourds sur un charbon actif issu de noyaux de dattes, mémoire de magister ; université Mohamed Cherif Massadia SOUK –AHRAS ,2012-2013.
- [73] :N.BELHIRECHE, I.BELEDJALE, contribution à la préparation des matériaux adsorbants à partir des sous-produits du palmier dattier ; mémoire master ; université EchahidHamma Lakhdar .El-Oued ; 25/05/2016.

- [74] : K.A.KRISHNAN ET AL : Kinetic and equilibrium modelling of cobalt (II) adsorption onto bagasse pith based sulphurised activated carbon. Chemical Engineering Journal 137 (2008) 257 - 264.
- [75] : E.KOLLER. Ed DUNOD France ,2004.
- [76] : <https://www.vetofish.com/>
- [77] : <https://www.igz.ch/>
- [78] : R.CHERRAYE ; préparation par voie chimique d'un charbon actif à partir des déchets de café (effet de taux d'adjuvant) ; mémoire master ; université KASDI MERBAH OURGLA ,16/06/2012.
- [79] : A.BOUTALBI ; A.SAKER ; préparation de charbon actif à base de résidus agricole et leur application à l'élimination des colorants, mémoire de master ; université EchahidHamma Lakhdar. El Oud ; 04/6/2018.
- [80] : SUN L M, MEUNIER, 2007. Adsorption : aspects théoriques, techniques de l'ingénieur, J2 730.
- [81] : R. C. BANSAL, J. B. DONNET, F. STOEKLY, dans "Active Carbon", Ed. Marcel Dekker New York, (1988).
- [82] : R. H. BRADLEY, B. RANDES, Activated carbon adsorbents for organic vapors Fuel, 72 (1993) 389-393.
- [83] : DAHOU FARIDA.2020, Etude de l'adsorption de bleu de méthylène sur charbon brute préparé à partir des écorces de chêne. p58.
- [84] : GAID K, 1981. Thèse de Doctorat. Mode d'élimination de polluants sur filtres, Science physiques, University of Rennes ; France, p.200-344.
- [85] : Société Anonyme de Gestion des Eaux de Paris. « Traitement de potabilisation des eaux de surface, adsorption sur charbon actif ». Conf (2006).
- [86] : A. AHMAD pour, D.D. Do, Carbon, 1996, 34, 471.
- [87] : A. DEMIRBAS. «Agricultural based activated carbons for the removal of dyes from aqueous solutions : à review», Journal of Hazardous Materials 167 (2009) 1-9.

- [88] : J.M. Dias, M.C.M. Alvim-Ferraz, M.F. Almeida, J. Rivera-Utrilla, M. Sánchez- Polo, J. Environ. Manage, 85, 833. 2007.
- [89] : ZEROUAL S, HAZOURI S, GUERFI K, 2007.Caractérisation de charbon actif fabrique à base de noyaux de dattes, Sngid-07, enset-oran.
- [90] : VILLA P, 2003. La culture de l'olivier. Edition De Vecchi S.A.Paris.
- [91] : YAHIAOUI N, 2012.Mémoire de Magister. Etude de l'adsorption des composés. Phénoliques des margines d'olives sur carbonate de calcium, hydroxyapatite et charbon actif
- [92] : STÜBER F, FONT J, FORTUNY A, BENGUA C, EFTAXIAS A, FABREGAT A. Carbon materials and catalytic wet air oxidation of organic pollutants in wastewater. Topics in Catalysis 33 : 3-50, 2005.
- [93] : R.C. BANSAL, J.B. DONNET, F. STOECKLI. Active Carbon, New York, (1988).
- [94] : A.BENARIMA-R.KOUADRI MOULAY Préparation et caractérisation d'un charbon actif à partir de coquilles d'œufs, université M.KASDI Ouargla, master 2017.
- [95] : N.GHALMI et A. SIFER, " Essais d'adsorption du phénol et du cuivre sur charbon actif valorisé à base de grignon d'olives " .Mémoire d'Ingénieur, Boumerdès, 2006.
- [96] : DEGREMONT, " Mémento. Technique de l'eau 10 ." ème édition copyright, 2005.
- [97] : E. FERNANDEZ IBAÑEZ, Etude de la carbonisation et l'activation de précurseurs végétaux durs et mous, Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel, p.12-16(2002).
- [98] : DJIDEL TADJIA. « Étude de la préparation d'un charbon actif à partir des grains d'olives et application sur des rejets industriels», Université Med-BOUDIAF d'Oran, Thèse magister, (2011).
- [99] : G.MARTIN, P LE CROIREC, M.BAUDU, first approach of desorption energies of water and organic molecules onto activated carbon by differential scanning calorimetry studies, printed in Great Britain 27(1993) 69-96.
- [100] : BOUCHELTA CHAFIA , «étude de l'adsorption des métaux Hg<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Cr<sup>6+</sup> sur charbon actif en grain. Modélisation » mémoire magister, Université Badji Mokhtar-Annaba (2003).
- [101] : F.EDDILINE : L'épuration physico chimique des eaux (1998) 251- 271.

[102] : JC BOEGLIN : Traitement physico chimique de la pollution soluble. Technique de l'ingénieur, traité environnement, pp G2 271-8-10.

[103] : P.MOUCHET : Traitement des eaux avant utilisation, substances dissoutes. Technique de l'ingénieur, traité environnement, pp G1 171-8-11.

[104] : Memento technique, 1989 Memento technique de l'eau. 9ème Edition (1989).